



ISSN 2304-4497
eISSN 2307-1710

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Научный журнал

ВЕСТНИК
Сибирского государственного
индустриального университета

№ 1 (51), 2025

Издается с июня 2012 года
Выходит 4 раза в год

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Scientific journal

BULLETIN
of the Siberian State Industrial University

No. 1 (51), 2025

Published since June 2012
It is published 4 times a year

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации:

ПИ № ФС77-77872 от 03.03.2020 г.

Адрес редакции:

Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет

каб. 483 ГТ, тел. 8-950-270-4488

[http: www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)

e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Адрес издателя:

Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет

каб. 336 Г, тел. 8-3843-46-35-02

e-mail: rector@sibsiu.ru

Адрес типографии:

Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет

каб. 280 Г, тел. 8-3843-46-44-02

Подписные индексы:

Объединенный каталог «Пресса России» – 41270

Founder

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Siberian State Industrial University»

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor)

Certificate of registration:

PI No. FS77-77872 dated 03.03.2020

Editorial office address:

42 Kirova Str., Central district, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation, Siberian State Industrial University office 483 GT, tel. 8-950-270-4488

[http: www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)

e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Publisher's address:

42 Kirova Str., Central district, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation, Siberian State Industrial University office 336 G, tel. 8-3843-46-35-02

e-mail: rector@sibsiu.ru

Printing house address:

42 Kirova Str., Central district, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation, Siberian State Industrial University office 280 G, tel. 8-3843-46-44-02

Subscription indexes:

United catalog «Press of Russia» – 41270

Подписано в печать

31.03.2025 г.

Выход в свет

31.03.2025 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл. печ. л. 3,9.

Уч.-изд. л. 4,2.

Тираж 300 экз.

Заказ № 54.

Цена свободная

Signed to the press

30.09.2024

Coming out

31.03.2025

The paper size is 60×88 1/8.

Writing paper.

Offset printing.

Usl. pech. l. 3,9.

Uch.-ed. l. 4,2.

The circulation is 300 copies.

Order no. 54.

The price is free

Редакционная коллегия

Главный редактор

Коновалов Сергей Валерьевич, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Ответственный секретарь

Запольская Екатерина Михайловна, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Редакционная коллегия:

Агеев Евгений Викторович, д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Бецофен Сергей Яковлевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

Бондарев Николай Сергеевич, д.э.н., доцент, заведующий кафедрой управления качеством, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

Ганиева Ирина Александровна, д.э.н., доцент, директор, АНО «Научно-образовательный центр «Кузбасс», г. Кемерово, Россия

Гречников Федор Васильевич, Академик Российской академии наук, д.т.н., профессор, профессор кафедры обработки металлов давлением, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия

Громов Виктор Евгеньевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Данилов Владимир Иванович, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия

Деев Владислав Борисович, д.т.н., профессор, профессор кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, г. Москва, Россия; главный научный сотрудник Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

Ершова Ирина Геннадьевна, д.э.н., профессор, профессор кафедры финансов и кредита, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Jayalakshmi Subramanian, PhD, профессор, Технологический институт MLR, г. Хайдарабад, Индия

Жеребцов Сергей Валерьевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Затепякин Олег Аркадьевич, д.э.н., профессор, профессор кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Кириенко Анна Павловна, д.э.н., профессор, директор Байкальского института БРИКС, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, профессор кафедры финансового и налогового менеджмента, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Климков Алексей Григорьевич, к.э.н., начальник научно-исследовательского отдела ЗАО «Структурные технологии», г. Минск, Республика Беларусь

Колубаев Евгений Александрович, д.т.н., профессор Российской академии наук, директор, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия

Копеин Валерий Валентинович, д.э.н., доцент, профессор кафедры бухгалтерского учета, налогообложения и финансов, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

Коган Антон Борисович, д.э.н., доцент, профессор кафедры экономики предпринимательской деятельности и логистики, Новосибирский государственный университет экономики и управления «НИНХ», г. Новосибирск, Россия

Нехорошева Людмила Николаевна, д.э.н., профессор, заведующий кафедрой экономики промышленных предприятий, Белорусский государственный экономический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Namrata Gangil, PhD, доцент кафедры машиностроения, Инженерный колледж Аджая Кумара Гарга, г. Газиабад, Индия

Осколкова Татьяна Николаевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Пантелеев Василий Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электроэнергетики, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Петрова Татьяна Викторовна, д.э.н., профессор, профессор кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Ramachandra Arvind Singh, PhD, профессор, Технологический институт MLR (MLRI), г. Хайдарабад, Индия

Rongshan Qin, профессор перспективного материаловедения факультета инженерии и инноваций, Открытый университет Уолтон Хол, г. Милтон Кейнс, Великобритания

Симченко Наталья Александровна, д.э.н., профессор, профессор кафедры экономической теории и истории экономической мысли, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Siddiquee Arshad Noor, PhD, профессор кафедры машиностроения Джамия Миллия Исламия, Центральный университет, г. Нью-Дели, Индия

Стрижак Павел Александрович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией тепломассопереноса, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Султангузин Ильдар Айдарович, д.т.н., профессор, профессор кафедры промышленных теплоэнергетических систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

Solotareff Stefan, PhD, доктор теоретической физики, профессор психологии-математики, Государственный университет Уджда, Марокко

Sonar Tushar Madhukar, Ph.D., старшего научного сотрудника кафедры сварочного оборудования и технологий Южно-Уральского государственного университета (Национального исследовательского университета), г. Челябинск, Россия

Темлянец Михаил Викторович, д.т.н., профессор, проректор по реализации стратегического проекта, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Уманский Александр Александрович, д.т.н., доцент, директор Института металлургии и материаловедения, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Хамзаева Айнура Мураталиевна, к.э.н., доцент, заведующий кафедрой бухгалтерского учета и аудита, Ошский технологический университет им. Академика М.М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан

Chen Xizhang, PhD, профессор, профессор университета Вэньчжоу, г. Вэньчжоу, Китай

Федулова Елена Анатольевна, д.э.н., доцент, заведующий кафедрой экономической теории и государственного управления, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

Шваков Евгений Евгеньевич, д.э.н., профессор, директор Международного института экономики, менеджмента и информационных систем, Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия

Юлдашев Носиржон Хайдарович, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики, Ферганский политехнический институт, г. Фергана, Узбекистан

Юрьев Алексей Борисович, д.т.н., профессор, ректор, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Members of the editorial board

Chief Editor

Konovalov Sergey Valerievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Executive Secretary

Zapolskaya Ekaterina Mikhailovna, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Editorial team:

Ageev Evgeny Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology of Materials and Transport, Southwestern State University, Kursk, Russia

Betsofen Sergey Yakovlevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Computer-Aided Design of Metallurgical Processes, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Bondarev Nikolay Sergeevich, Doctor of Economics, Associate Professor, Head of the Department of Quality Management, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Ganieva Irina Aleksandrovna, Doctor of Economics, Associate Professor, Director, ANO "Scientific and Educational Center "Kuzbass", Kemerovo, Russia

Gromov Viktor Evgenievich, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Grechnikov Fedor Vasilyevich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Metal Forming, Samara National Research University named after Academician S.P. Koroleva, Samara, Russia

Danilov Vladimir Ivanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IFPM SB RAS), Tomsk, Russia

Deev Vladislav Borisovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Foundry Technologies and Artistic Processing of Materials, National Research Technological University "MISiS", Moscow, Russia; Chief Researcher, Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov, Vladimir, Russia

Ershova Irina Gennadievna, Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Finance and Credit, Southwestern State University, Kursk, Russia

Fedulova Elena Anatolyevna, Doctor of Economics, Associate Professor, Head of the Department of Economic Theory and Public Administration, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Jayalakshmi Subramanian, PhD, Professor, MLR Institute of Technology, Hyderabad, India

Zherebtsov Sergey Valerievich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Materials Science and Nanotechnology, Belgorod State National Research University (NRU "BelGU"), Belgorod, Russia

Zatepyakin Oleg Arkadyevich, Doctor of Economics, Professor, Department of Management and Sectoral Economics, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Kiriyenko Anna Pavlovna, Doctor of Economics, Professor, Director of the Baikal BRICS Institute, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Professor of the Department of Financial and Tax Management, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Khamzaeva Ainura Muratalievna, Candidate of Economics, Associate Professor, Head of the Department of Accounting and Auditing, Osh Technological University. Academician M.M. Adysheva, Osh, Kyrgyzstan

Klimkov Aleksey Grigoryevich, Ph.D. in Economics, Head of the Research Department of Closed Joint-Stock Company "Structural Technologies", Minsk, Republic of Belarus

Kopein Valery Valentinovich, Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of the Department of Accounting, Taxation and Finance, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Kogan Anton Borisovich, Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of the Department of Business Economics and Logistics, Novosibirsk State University of Economics and Management "NINH", Novosibirsk, Russia

Kolubaev Evgeny Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Director, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

Namrata Gangil, PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ajay Kumar Garg Engineering College, Ghaziabad, India

Nehorosheva Lyudmila Nikolaevna, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Economics of Industrial Enterprises, Belarusian State Economic University, Minsk, Republic of Belarus

Oskolkova Tatyana Nikolaevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Pantelev Vasily Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Power Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Petrova Tatyana Viktorovna, Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Management and Sectoral Economics, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Ramachandra Arvind Singh, PhD, Professor, MLR Institute of Technology, Hyderabad, India

Rongshan Qin, Professor in Advanced Materials Engineering Faculty of Science, Technology, Engineering & Mathematics School of Engineering & Innovation, The Open University, Milton Keynes, Great Britain

Siddiquee Arshad Noor, PhD, Professor of Mechanical Engineering Jamia Millia Islamia, Central University, New Delhi, India

Simchenko Natalya Alexandrovna, Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Economic Theory and History of Economic Thought, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Shvakov Evgeny Evgenievich, Doctor of Economics, Professor, Director of the International Institute of Economics, Management and Information Systems, Altai State University, Barnaul, Russia

Solotareff Stefan, Doctor of Theoretical Physics, Professor of Psychology and Mathematics, State University of Oujda, Morocco

Sonar Tushar Madhukar, Ph.D., Senior Researcher, Department of Welding Equipment and Technologies, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Strizhak Pavel Aleksandrovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Heat and Mass Transfer, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Sultanguzin Ildar Aidarovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Industrial Heat and Power Systems, National Research University "MPEI", Institute of Energy Efficiency and Hydrogen Technologies, Moscow, Russia

Temlyantsev Mikhail Viktorovich, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Strategic Project Implementation, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Umansky Alexander Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Metallurgy and Materials Science, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Chen Xizhang, PhD, professor, professor of Wenzhou University. Wenzhou, China

Yuldashev Nosirjon Khaydarovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physics, Fergana Polytechnic Institute, Fergana, Uzbekistan

Yuryev Aleksey Borisovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Попов И.П.** Магнитные особенности проводников с различной проводимостью9
- Сарычев В.Д., Володин Т.В., Громов В.Е., Грановский А.Ю., Иванов Ю.Ф.** Магнитно-импульсная обработка стали Р6М5: структура и свойства.....15
- Шерина Ю.В., Луц А.Р., Закамов Д.В.** Исследование влияния кремния на стабильность фазы TiC при получении композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC методом СВС.....25
- Игнатенко Н.М., Солдатов А.А., Ершов Н.Ю., Петрова Л.П.** Кластеризация в жидкостях: теоретические основы, модели и практическое применение.....35
- Громов В.Е., Иванов Ю. Ф., Юрьев А.Б., Миненко С.С., Коновалов С.В.** Модификация структуры переходной зоны наплавка из быстрорежущей стали – подложка электронно-лучевой обработкой.....43

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Исаев С.Л., Баранов Д.А., Муратов В.С.** Механические свойства и структура сварного шва сплава ЭП-718, полученного электронно-лучевой сваркой.....51
- Ковалев Р.Ю., Никитин А.П.** Термическая обработка электродных каменноугольных пеков и смесей на их основе.....63
- Кашин А.Д., Седельникова М.Б., Химич М.А., Уваркин П.В., Лугинин Н.А., Иванов К.В.** Модификация поверхности микродуговых покрытий на основе диатомита с помощью импульсного электронного облучения.....72
- Лысых С.А., Корнопольцев В.Н., Калашников С.В., Мишигдоржийн У.Л.** Износостойкость слоев на стали марки 5ХНМ, полученных порошковым боромеднением.....85
- Бондарева О.С.** Влияние температуры и времени выдержки в расплаве на микроструктуру и фазовое строение покрытия Zn + 7 % Al на сталях различных марок.....93

CONTENTS

CONDENSED MATTER PHYSICS

- Popov I.P.** Magnetic features of conductors with different conductivity.....9
- Sarychev V.D., Volodin T.V., Gromov V.E., Granovskii A.Yu., Ivanov Yu.F.** Magnetic pulse treatment of steel P6M5: structure and properties.....15
- Sherina Yu.V., Lutz A.R., Zakamov D.V.** Study of the influence of silicon on the stability of the TiC phase in the production of composite material AK10M2N – 10 % TiC by the shs method.....25
- Ignatenko N.M., Soldatov A.A., Ershov N.Yu., Petrova L.P.** Clusterization in liquids: theoretical foundations, models and practical application.....35
- Gromov V.E., Ivanov Yu. F., Yuryev A.B., Minenko S.S., Konovalov S.V.** Modification of transition zone structure of high-speed steel surfacing – substrate by electron-beam treatment.....43

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

- Isaev S.L., Baranov D.A., Muratov V.S.** Mechanical properties and structure of the welded seam of the IP-718 (Inconel 718) alloy obtained by electron beam welding...51
- Kovalev R.Yu., Nikitin A.P.** Heat treatment of electrode coal pitches and mixtures based on them.....63
- Kashin A.D., Sedelnikova M.B., Khimich M.A., Uvarkin P.V., Luginin N.A., Ivanov K.V.** Surface modification of diatomite-based micro-arc coatings using pulsed electron beam irradiation.....72
- Lysykh S.A., Kornopoltsev V.N., Kalashnikov S.V., Mishigdorzhiiin U.L.** Wear resistance of layers on 5KHNM grade steel obtained by powder boromedning.....85
- Bondareva O.S.** Effect of temperature and holding time in the melt on the microstructure and phase structure of the Zn + 7 % Al coating on steels of various grades.....93

Протопопов Е.В., Уманский А.А., Шакиров М.К., Беленецкий Е.А., Фатьянов С.С. Физико-химическая модель рафинирования расплава в конвертерах с жидкофазным восстановлением.....102	Protopopov E.V., Umansky A.A., Shakirov M.K., Belenetsky E.A., Fatyanov S.S. Physico-chemical model of melt refining in liquid-phase reduction converters.....102
---	--

**ЭКОНОМИКА. УПРАВЛЕНИЕ.
ФИНАНСЫ**

**ECONOMY. MANAGEMENT.
FINANCE**

Феоктистов А.В., Шипунова В.В., Лашкова Е.Г., Гринкевич О.В., Колпакова Н.П. С юбилеем, экономический факультет – Институт экономики и менеджмента – Институт технологий устойчивого развития! 30 лет на благо города, Кузбасса, России!.....110	Feoktistov A.V., Shipunova V.V., Lashkova E.G., Grinkevich O.V., Kolpakova N.P. Happy anniversary, Faculty of Economics– Institute of Economics and Management – Institute of Sustainable Development Technologies! 30 years for the benefit of the city, Kuzbass, Russia!.....110
Иванова Е.В., Ивушкина Н.В., Перекрест Н.В. Оценка результатов реализации стратегии развития туризма в Кемеровской области – Кузбассе в контексте обеспечения устойчивости региональной экономики.....118	Ivanova E.V., Ivushkina N.V., Perekrest N.V. Assessment of the results of the implementation of the tourism development strategy in the Kemerovo region – Kuzbass in the context of ensuring the sustainability of the regional economy...118
Жданова Н.Г., Садыкина Р.А. Практические аспекты технологий устойчивого развития промышленных предприятий.....130	Zhdanova N.G., Sadykina R.A. Practical aspects of sustainable industrial development technologies.....130
К сведению авторов.....139	To the authors attention.....140

Оригинальная статья

УДК 538.915; 538.955; 538.945

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-9-14

МАГНИТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОВОДНИКОВ С РАЗЛИЧНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

© 2025 г. И. П. Попов

Курганский государственный университет (Россия, 640020, Курган, ул. Советская, 63/4)

Аннотация. Проведена проверка правомерности приписывания кванта момента импульса \hbar любой многочастичной квантовой системе, в том числе куперовской паре электронов. Последние образуются в проводниках с малой длиной свободного пробега электронов и не образуются в проводниках с большой длиной свободного пробега электронов. Куперовскую пару электронов получают в результате парной корреляции, обусловленной электрон-фононным притяжением между электронами, превышающим кулоновское отталкивание (фононы возникают при колебаниях кристаллической решетки). Наделение куперовской пары электронов квантом момента импульса \hbar произошло исключительно при определении кванта магнитного потока. Если электронов будет не один, а два (коррелированных куперовских или некоррелированных), учитывая, что магнитный поток величина аддитивная, то суммарный поток будет в четыре раза больше, чем принято считать. Микроскопическая теория сверхпроводимости БКШ (теория Бардина – Купера – Шриффера) удовлетворяет только парными корреляциями электронов, однако, нет никаких противопоказаний для возникновения многочастичных корреляций. При этом квант магнитного потока будет неограниченно уменьшаться. Момент импульса – величина аддитивная. Это значит, что квант момента импульса \hbar , приписанный многочастичной квантовой системе, должен делиться между частицами системы. Поэтому каждая частица будет обладать меньшим моментом импульса, чем квант, что неприемлемо. Наделение куперовской пары электронов квантом момента импульса \hbar является неправомерным. Квант момента импульса \hbar может приписываться только одной квантовой частице, и не может учитываться для квантовой совокупности частиц. Квантом магнитного потока является исключительно квант Ф. Лондона.

Ключевые слова: квант момента импульса, куперовская пара, корреляция, фонон, квант магнитного потока

Для цитирования: Попов И.П. Магнитные особенности проводников с различной проводимостью. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):9–14. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-9-14](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-9-14)

Original article

MAGNETIC FEATURES OF CONDUCTORS WITH DIFFERENT CONDUCTIVITY

© 2025 I. P. Popov

Kurgan State University (63/4 Sovetskaja Str., Kurgan, 640020, Russian Federation)

Abstract. The validity of attributing a quantum of angular momentum to any multiparticle quantum system, including a Cooper pair of electrons, has been verified. The latter are formed in conductors with a short free path of electrons and are not formed in conductors with a long free path of electrons (to clarify the wording – avoid repetitions). A Cooper pair of electrons is obtained as a result of pair correlation due to electron-phonon attraction between electrons exceeding Coulomb repulsion (phonons arise when the crystal lattice vibrates). The assignment of the Cooper pair of electrons to the quantum of angular momentum \hbar occurred exclusively when determining the quantum of the magnetic flux. If there are not one, but two electrons (correlated Cooper or uncorrelated), and given that the magnetic flux is additive, the total flux will be four times greater than is commonly assumed.

Microscopic Theory of BCS Superconductivity (Bardeen theory – Cooper–Schrieffer) satisfies only paired correlations of electrons, however, there are no contraindications for the occurrence of multiparticle correlations. In this case, the quantum of the magnetic flux will decrease indefinitely. The angular momentum is an additive quantity. This means that the angular momentum quantum l , attributed to a multiparticle quantum system, must be shared between the particles of the system. Therefore, each particle will have a moment of momentum less than a quantum, which is unacceptable. Endowing a Cooper pair of electrons with a quantum of angular momentum l is illegal. The angular momentum quantum l can be attributed to only one quantum particle, and cannot be attributed to a quantum set of particles. The quantum of the magnetic flux is exclusively the quantum of F. London.

Keywords: angular momentum quantum, Cooper pair, correlation, phonon, magnetic flux quantum

For citation: Popov I.P. Magnetic features of conductors with different conductivity. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):9–14. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-9-14](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-9-14)

Введение

Куперовская пара электронов [1 – 4] образуется в результате парной корреляции, обусловленной электрон-фононным притяжением между электронами [5 – 7], превышающим кулоновское отталкивание (фононы возникают при колебаниях кристаллической решетки [8]).

Наделение куперовской пары электронов квантом момента импульса \hbar произошло исключительно при определении кванта магнитного потока [9]. В результате квант магнитного потока, образованный двумя электронами, вдвое меньше кванта, созданного одним электроном (квантом Φ . Лондона). Это противоречит аддитивности магнитного потока [10].

Целью настоящей работы является проверка правомерности приписывания кванта момента импульса \hbar любой многочастичной квантовой системе, в том числе куперовской паре электронов.

Используется теоретический метод исследования, основанный на квантово-механическом и полуклассическом рассмотрении [11; 12].

Приоритет куперовских пар над некоррелированными электронами

Куперовские пары электронов образуются в проводниках с малой длиной свободного пробега электронов и не образуются в проводниках с большой длиной свободного пробега электронов [13 – 15]. Экспериментально зафиксирован минимальный магнитный поток, созданный одной парой электронов (куперовской) в проводнике с малой длиной свободного пробега электронов. Это означает, что нет принципиальных препятствий для регистрации минимального магнитного потока, созданного единственным электроном в проводнике с большой длиной свободного пробега (особенно с учетом того, что поток вдвое больше) [16 – 18]. Приоритета куперовских пар над некоррелированными (единичными) электронами не существует. Поток от одного электрона зарегистриро-

вать не сложнее, чем поток от двух (в соответствии с существующей парадигмой он в два раза больше).

Квант магнитного потока с большой длиной свободного пробега электронов

Энергия единичного некоррелированного электрона в проводнике с большой длиной свободного пробега

$$E = \frac{I\Phi}{2}, \quad (1)$$

где I – ток, созданный движением этого электрона; Φ – магнитный поток, образованный током I .

Ток от единственного электрона определяется по следующей формуле:

$$I = \frac{e}{T}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона; $T = \frac{2\pi R}{v}$ – период обра-

щения электрона в кольцевом проводнике; R – радиус кольца; v – скорость электрона.

С другой стороны, энергию электрона можно определить по следующему уравнению:

$$E = \frac{m_e v^2}{2}, \quad (3)$$

где m_e – масса электрона.

Учитывая формулы (1) – (3), получаем

$$\Phi = \frac{2\pi R m_e v}{e} = \frac{2\pi R p}{e}, \quad (4)$$

где p – импульс электрона.

Поскольку электрон один (неспаренный), то не возникает никаких разночтений при наделении его квантом момента импульса \hbar :

$$m_e v R = p R = \hbar, \quad (5)$$

отсюда получаем выражение для определения кванта магнитного потока Φ . Лондона:

$$\Phi_L = \frac{2\pi\hbar}{e} = \frac{h}{e}. \quad (6)$$

где h – постоянная Планка.

Магнитный поток двух электронов

Если электронов будет не один, а два (коррелированных куперовских или некоррелированных), учитывая, что магнитный поток является аддитивной величиной, то в соответствии с уравнением (6) суммарный поток равен

$$\Phi_2 = 2\Phi_L = \frac{2h}{e}. \quad (7)$$

Это в четыре раза больше, чем принято считать.

Для того, чтобы он стал равен величине, которую принято считать квантом магнитного потока

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} \quad (8)$$

следует складывать обратные величины:

$$\frac{1}{\Phi} = \frac{1}{\Phi_L} + \frac{1}{\Phi_L} = \frac{2}{\Phi_L} = \frac{2e}{h}. \quad (9)$$

Многочастичные корреляции

Микроскопическая теория сверхпроводимости БКШ (теория Бардина – Купера – Шриффера) реализуется только парными корреляциями электронов [19; 20]. В то же время нет никаких противопоказаний для возникновения многочастичных корреляций.

При этом квант магнитного потока будет неограниченно уменьшаться:

$$\Phi_0 = \frac{h}{ne}, \quad (10)$$

где n – кратность корреляции.

Квант магнитного потока с малой длиной свободного пробега электронов

Пусть имеет место квант магнитного потока (8).

В силу аддитивности магнитного потока при двухчастичной корреляции электронов в проводнике с малой длиной свободного пробега электронов магнитный поток, созданный одним электроном, равен

$$\Phi_0 = \frac{1}{2} \frac{h}{2e} = \frac{h}{4e}. \quad (11)$$

При многочастичной корреляции

$$\Phi_0 = \frac{1}{n} \frac{h}{ne} = \frac{h}{n^2 e}. \quad (12)$$

Электрон (магнитный поток) так же неисчерпаем, как атом.

Эталонная верификация наделения куперовской пары квантом момента импульса \hbar

Мотив приписывания куперовской паре электронов кванта момента импульса \hbar состоит в том, что пары электронов образуют квантовую систему (пара электронов атома гелия (эталон), вместо фононов «посредником» является кулоновское притяжение ядра).

Поэтому также, как и куперовской паре, спаренным электронам гелия следует применять квант момента импульса

$$2m_e v r_{\text{He}} = \hbar. \quad (13)$$

Баланс сил, действующих на любой электрон гелия

$$\frac{2e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{He}}^2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 (2r_{\text{He}})^2} = \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}}; \quad (14)$$

$$1,75 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{\text{He}}^2} = \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}}, \quad (15)$$

где ϵ_0 – постоянная электрическая.

Из уравнения (13) следует, что

$$4m_e^2 v^2 r_{\text{He}}^2 = \hbar^2, \\ r_{\text{He}}^3 = \frac{\hbar^2}{4m_e^2 v^2},$$

подставив в формулу (15), получим

$$1,75 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{4m_e^2 v^2}{\hbar^2} = \frac{m_e v^2}{r_{\text{He}}}; \\ r_{\text{He}} = \frac{m_e v^2 4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{1,75 e^2 4m_e^2 v^2} = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{1,75 e^2 4m_e} = \frac{a_0}{7}.$$

В численном значении

$$r_{\text{He}} = \frac{a_0}{7} = \frac{5,2917721092 \cdot 10^{-11}}{7} \approx 7,56 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

Это почти в четыре раза меньше установленного радиуса гелия.

Легко убедиться, что при использовании вместо уравнения (13) формулу (5) получим практически табличное значение. Использование выражения (6) для определения величины \hbar многочастичной квантовой системы является неправомерным. Во избежание противоречий его нельзя приписывать и другим многочастичным квантовым системам (в том числе куперовской паре).

Выводы

Квант момента импульса \hbar , применяемый для многочастичной квантовой системы, должен делиться между частицами системы. Поэтому каждая частица будет обладать моментом импульса меньше кванта, что неприемлемо. Таким образом, наделение куперовской пары электронов квантом момента импульса \hbar является неправомерным.

Квант момента импульса \hbar можно применять только для одной квантовой частицы, и не может приписываться квантовой совокупности частиц. Подтверждением этого является атом гелия. Квантом магнитного потока является исключительно квант Φ Лондона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Seeger R.L., Forestier G., Gladii O., Leiviskä M., Auffret S., Joumard I., Rubio-Roy M., Baltz V., Gomez C., Buzdin A.I., Houzet M. Penetration depth of cooper pairs in the irnm antiferromagnet. *Physical Review B*. 2021;104:054413. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.054413>
- Daido A., Yanase Y. Rectification and nonlinear hall effect by fluctuating finite-momentum cooper pairs. *Physical Review Research*. 2024;6:L022009. <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.6.1022009>
- Chan A.K., Cubukcu M., Montiel X., Komori S., Vanstone A., Thompson J.E., Perkins G.K., Kinane C.J., Caruana A.J., Boldrin D., Blamire M., Robinson J., Eschrig M., Kurebayashi H., Cohen L.F. Controlling spin pumping into superconducting nb by proximity-induced spin-triplet cooper pairs. *Communications Physics*. 2023;6:287. <https://doi.org/10.1038/s42005-023-01384-w>
- Furukawa T., Miyagawa K., Matsumoto M., Sasaki T., Kanoda K. Microscopic evidence for preformed cooper pairs in pressure-tuned organic superconductors near the MOTT transition. *Physical Review Research*. 2023;5:023165. <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.5.023165>
- Ishida K., Matsueda H. Two-step dynamics of photoinduced phonon entanglement generation between remote electron-phonon systems. *Journal of the Physical Society of Japan*. 2021;90:104714. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.90.104714>
- Liu Y., Han Ya., Yu Ju., Zhang H., Yin Q., Lei H., Hu J., Zhang D. Visualizing electron-phonon and anharmonic phonon-phonon coupling in the kagome ferrimagnet GDMN6SN6. *Applied Physics Letters*. 2023;122. <https://doi.org/10.1063/5.0152116>
- Wu Ch., Liu Ch. Effects of phonon bandgap on phonon-phonon scattering in ultrahigh thermal conductivity θ -phase TAN. *Chinese Physics B*. 2023;32:046502. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/acb201>
- Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Исследование параметров кристаллической решетки, фазового состава и структуры сплава АК5М2 после поверхностного модифицирования титаном и последующего облучения электронным пучком. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2022;1:63–68.
- Жерновой А.И. Квантование магнитного потока, создаваемого наночастицей магнетита. *Научное приборостроение*. 2018;2:45–48.
- Popov I.P. Combined Vectors and Magnetic Charge. *Tech. Phys.* 2024;69:2397–2405. <https://doi.org/10.1134/S1063784224700415>
- Попов И.П. Сведение постоянной Планка к классическим фундаментальным константам. *Вестник Удмуртского университета. Физика и химия*. 2014;3:51–54.
- Popov I.P. Seven Singular Points in Quantum Mechanics. *Tech. Phys.* 2024;69:2406–2408. <https://doi.org/10.1134/S1063784224700427>
- Сивухин Д.В. *Атомная и ядерная физика*. Москва: Физматлит. 2002:784.
- Шляров В.В., Загуляев Д.В., Аксенова К.В. Изменение механических характеристик технически чистого алюминия в условиях воздействия магнитного поля. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2022;2:10–16.
- Лосев Г.Л., Ельищев В.А. Электромагнитные измерения уровня и проводимости цветных металлов. *Вестник Пермского университета. Физика*. 2020;4:63–68. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2020-4-63-68>
- Azar M.El., Bouhlal A., Jellal A. Boosting energy levels in graphene magnetic quantum dots through magnetic flux and inhomogeneous gap. *Physica B: Condensed Matter*. 2024;685:416005. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416005>

17. Azar M.El., Bouhlal A., Alhaidari A.D., Jellal A. Effect of magnetic flux on scattering in a graphene magnetic quantum dot. *Physica B: Condensed Matter*. 2024;675:415610. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415610>
 18. Bryon Ja., Weiss D.K., You X., Sussman S., Croot X., Huang Z., Koch J., Houck A.A. Time-dependent magnetic flux in devices for circuit quantum electrodynamics. *Physical Review Applied*. 2023;19:034031. <https://doi.org/10.1103/physrevapplied.19.034031>
 19. Павлов В.Д. Расчетный минимальный радиус позитрония. *Инженерная физика*. 2024;2:24–29. <https://doi.org/10.25791/in-fizik.2.2024.1385>
 20. Павлов В.Д. О корректности размера позитрония. *Вестник Томского государственного университета. Химия*. 2024; 33:24–32. <https://doi.org/10.17223/24135542/33/2>
- REFERENCES**
1. Seeger R.L., Forestier G., Gladii O., Leiviskä M., Auffret S., Joumard I., Rubio-Roy M., Baltz V., Gomez C., Buzdin A.I., Houzet M. Penetration depth of cooper pairs in the irnm antiferromagnet. *Physical Review B*. 2021;104:054413. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.104.054413>
 2. Daido A., Yanase Y. Rectification and nonlinear hall effect by fluctuating finite-momentum cooper pairs. *Physical Review Research*. 2024;6:L022009. <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.6.l022009>
 3. Chan A.K., Cubukcu M., Montiel X., Komori S., Vanstone A., Thompson J.E., Perkins G.K., Kinane C.J., Caruana A.J., Boldrin D., Blamire M., Robinson J., Eschrig M., Kurebayashi H., Cohen L.F. Controlling spin pumping into superconducting nb by proximity-induced spin-triplet cooper pairs. *Communications Physics*. 2023;6:287. <https://doi.org/10.1038/s42005-023-01384-w>
 4. Furukawa T., Miyagawa K., Matsumoto M., Sasaki T., Kanoda K. Microscopic evidence for preformed cooper pairs in pressure-tuned organic superconductors near the MOTT transition. *Physical Review Research*. 2023;5:023165. <https://doi.org/10.1103/physrevresearch.5.023165>
 5. Ishida K., Matsueda H. Two-step dynamics of photoinduced phonon entanglement generation between remote electron-phonon systems. *Journal of the Physical Society of Japan*. 2021;90:104714. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.90.104714>
 6. Liu Y., Han Ya., Yu Ju., Zhang H., Yin Q., Lei H., Hu J., Zhang D. Visualizing electron-phonon and anharmonic phonon-phonon coupling in the kagome ferrimagnet GDMN6SN6. *Applied Physics Letters*. 2023;122. <https://doi.org/10.1063/5.0152116>
 7. Wu Ch., Liu Ch. Effects of phonon bandgap on phonon–phonon scattering in ultrahigh thermal conductivity θ -phase TAN. *Chinese Physics B*. 2023;32:046502. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/acb201>
 8. Serebryakova A.A., Zagulyaev D.V., Shlyarova Yu.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Study of the crystal lattice parameters, phase composition and structure of the AK5M2 alloy after surface modification with titanium and subsequent irradiation with an electron beam. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022;1:63–68. (In Russ.).
 9. Zhernovoi A.I. Quantization of magnetic flux created by a magnetite nanoparticle. *Scientific instrumentation*. 2018;2:45–48. (In Russ.).
 10. Popov I.P. Combined Vectors and Magnetic Charge. *Tech. Phys*. 2024. <https://doi.org/10.1134/S1063784224700415>
 11. Popov I.P. Reduction of Planck's constant to classical fundamental constants. *Bulletin of Udmurt University. Physics and chemistry*. 2014; 3: 51–54. (In Russ.).
 12. Popov I.P. Seven Singular Points in Quantum Mechanics. *Tech. Phys*. 2024;69:2406–2408. <https://doi.org/10.1134/S1063784224700427>
 13. Sivukhin D.V. *Atomic and nuclear physics*. Moscow: Fizmatlit. 2002:784. (In Russ.).
 14. Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V., Aksenova K.V. Changes in the mechanical characteristics of commercially pure aluminum under exposure to a magnetic field. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022;2:10–16. (In Russ.).
 15. Losev G.L., Eltishchev V.A. Electromagnetic measurements of level and conductivity of non-ferrous metals. *Bulletin of Perm University. Physics*. 2020;4:63–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2020-4-63-68>
 16. Azar M.El., Bouhlal A., Jellal A. Boosting energy levels in graphene magnetic quantum dots through magnetic flux and inhomogeneous gap. *Physica B: Condensed Matter*. 2024;685:416005. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2024.416005>
 17. Azar M.El., Bouhlal A., Alhaidari A.D., Jellal A. Effect of magnetic flux on scattering in a graphene magnetic quantum dot. *Physica B: Condensed Matter*. 2024;675:415610. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415610>
 18. Bryon Ja., Weiss D.K., You X., Sussman S., Croot X., Huang Z., Koch J., Houck A.A. Time-dependent magnetic flux in devices for circuit quantum electrodynamics. *Physical Review Applied*. 2023;19:034031.

<https://doi.org/10.1103/physrevapplied.19.034031>

19. Pavlov V.D. Estimated minimum radius of positronium. *Engineering physics*. 2024;2: 24–29. (In Russ.).

https://doi.org/10.25791/infi_zik.2.2024.1385

20. Pavlov V.D. On the correct size of positronium. *Bulletin of Tomsk State University. Chemistry*. 2024;33:24–32. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17223/24135542/33/2>

Сведения об авторе:

Игорь Павлович Попов, к.т.н., доцент кафедры теоретической, экспериментальной физики и компьютерных методов физики, Курганский государственный университет

E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

ORCID: 0000-0001-8683-0387

SPIN-код: 9668-2780

Information about the author:

Igor' P. Popov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Theoretical, Experimental Physics and Computer Methods of Physics, Kurgan State University

E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

ORCID: 0000-0001-8683-0387

SPIN-код: 9668-2780

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 25.06.2024

После доработки 06.11.2024

Принята к публикации 07.11.2024

Received 25.06.2024

Revised 06.11.2024

Accepted 07.11.2024

Оригинальная статья

УДК 621.791.92:621.727:620.178

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-15-24

**МАГНИТО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ Р6М5:
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА**

© 2025 г. В. Д. Сарычев¹, Т. В. Володин¹, В. Е. Громов¹, А. Ю. Грановский¹, Ю. Ф. Иванов²

¹Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

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

Аннотация. Проведена магнитно-импульсная обработка (МИО) кольцевого образца стали марки Р6М5. Результаты рентгеноструктурного и рентгенофазового анализов исследуемых образцов свидетельствуют о том, что основной фазой материала до и после магнитно-импульсного воздействия является α -фаза Fe. В исходном состоянии концентрация углерода в α -фазе составляет 0,040 %, после магнитно-импульсной обработки концентрация углерода – 0,082 % (таким образом формируется пересыщенный по углероду твердый раствор). При магнитно-импульсной обработке происходит уменьшение области когерентного рассеяния (ОКР) α -фазы в 2,1 раза и γ -фазы в 1,5 раза. В α -фазе увеличивается микроискажения кристаллической решетки фаз ($\Delta d/d$) в десять раз, в γ -фазе уменьшается в 1,6 раз. В ходе изучения травленого шлифа методами сканирующей электронной микроскопии показано, что карбидные включения имеют глобулярную форму и расположены в объеме стали хаотическим образом. Методами микрорентгеноспектрального анализа установлено, что независимо от места анализа рассматриваемого включения обогащены атомами вольфрама, молибдена и железа, могут являться карбидами сложного состава типа Me_6C . Исследования структуры травленого шлифа стали марки Р6М5, выполненные методами сканирующей электронной микроскопии, выявили визуальные различия в размерах включений карбидной фазы: среднее значение включений образца без магнитно-импульсной обработки (МИО) $D = 0,623$ мкм; после МИО $D = 0,30$ мкм. Выполненные исследования трибологических свойств материала образца показали, что без МИО параметр износа k составляет $4,0 \times 10^{-5}$ мм³/Н·м, коэффициент трения $\mu = 0,58$; после МИО величина $k = 8,4 \times 10^{-5}$ мм³/Н·м, коэффициент трения $\mu = 0,59$. Магнитно-импульсная обработка стали марки Р6М5 приводит к повышению износостойкости материала.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка, сталь марки Р6М5, α -фаза Fe, область когерентного рассеяния, карбидные включения, трибологические свойства

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10229, <https://rscf.ru/project/22-79-10229/>

Для цитирования: Сарычев В.Д., Володин Т.В., Громов В.Е., Грановский А.Ю., Иванов Ю.Ф. Магнитно-импульсная обработка стали Р6М5: структура и свойства. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):15–24. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-15-24](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-15-24)

Original article

MAGNETIC PULSE TREATMENT OF STEEL P6M5 STRUCTURE AND PROPERTIES

© 2025 V. D. Sarychev¹, T. V. Volodin¹, V. E. Gromov¹, A. Yu. Granovskii¹, Yu. F. Ivanov²

¹Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

²Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

Abstract. In this work, magnetic-pulse treatment (MPT) of a ring sample of P6M5 steel was carried out. The results of X-ray structural and X-ray phase analysis of the studied samples indicate that the main phase of the studied material before and after magnetic-pulse action is the α -phase of Fe. In the initial state, the concentration of carbon in the α -phase is 0,040 %. After magnetic-pulse treatment, the carbon concentration is 0,082 %, and thus a solid solution supersaturated with carbon is formed. During magnetic-pulse treatment, the size of the coherent scattering regions (CSR) of the α -phase decreases by 2,1 times and of the γ -phase by 1,5 times. In the α -phase, the value of microdistortions of the crystal lattice of the phases ($\Delta d/d$) increases by ten times, in the γ -phase it decreases by 1,6 times. During the study of the etched section using scanning electron microscopy methods, it was shown that the carbide inclusions have a globular shape and are located in the volume of the steel in a chaotic manner. Using micro-X-ray spectral analysis methods, it was established that, regardless of the location of analysis, these inclusions are enriched with atoms of tungsten, molybdenum and iron and may be carbides of complex composition of the Me_6C type. Studies of the structure of the etched section of P6M5 steel, carried out using scanning electron microscopy methods, revealed visual differences in the sizes of inclusions of the carbide phase: the average value of inclusions of the sample without magnetic pulse treatment (MPT) $D = 0,623 \mu\text{m}$; after MPT $D = 0,30 \mu\text{m}$. The conducted studies of the tribological properties of the sample material showed that without MPT the wear parameter $k = 4,0 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, the friction coefficient $\mu = 0,58$ and after MPT $k = 8,4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, the friction coefficient $\mu = 0,59$. Thus, magnetic pulse treatment of P6M5 steel leads to increased wear resistance of the material.

Keywords: magnetic pulse treatment, steel P6M5, α -phase Fe, coherent scattering region, carbide inclusions, tribological properties

Financing. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation no. 22-79-10229, <https://rscf.ru/project/22-79-10229/>

For citation: Sarychev V.D., Volodin T.V., Gromov V.E., Granovskii A.Yu., Ivanov Yu.F. Magnetic pulse treatment of steel P6M5: structure and properties. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):15–24. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-15-24](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-15-24)

Введение

Высокие эксплуатационные свойства быстрорежущих сталей достигаются при использовании покрытий AlCrN [1; 2], Ti [3;4], комплексной термической обработки [5], различных видов облучения (электронно-пучковой обработкой) [6; 7]. Последнее относится к импульсным методам воздействия и обеспечивает повышенную твердость и износостойкость при механических и термических нагрузках, а также предотвращает преждевременное зарождение хрупких микротрещин. Проводимые в последнее время исследования в области применения внешних энергетических воздействий с целью повышения надежности и долговечности рабочих поверхностей механизмов и конструкций свидетельствуют о том, что использование рассматриваемых технологий наиболее полно отвечает требованиям промышленности (как по уровню достигаемых свойств, так и с точки зрения экономической эффективности) [8].

Магнитно-импульсная обработка быстрорежущих сталей обладает преимуществами по сравнению с другими импульсными способами модифицирования рабочих поверхностей. Процесс магнитно-импульсной обработки (МИО) материалов основан на преобразовании электрической энергии, запасенной в накопителе, в переменное магнитное поле, выполняющее нагрев поверхностных слоев, работу по пластической деформации

заготовки [9; 10]. Для создания электродинамических сил, способных деформировать обрабатываемую заготовку, необходимо обеспечить протекание по индуктору тока силой порядка десятков, сотен тысяч ампер. При протекании столь мощных токов в индукторе и заготовке выделяется тепло. Следовательно, при магнитно-импульсной обработке силовое воздействие на заготовку сопровождается ее нагревом. Температура нагрева заготовки определяется характеристиками разрядного тока, толщиной заготовки и физическими свойствами материала, из которого она изготовлена. Следует иметь в виду, что тепло выделяется в скин-слое. Во время протекания импульса тока приповерхностные слои заготовки и рабочая поверхность индуктора могут нагреваться до высоких температур. В дальнейшем за счет теплопроводности происходит перераспределение тепла по всему объему индуктора и заготовки. Магнитно-импульсная обработка характеризуется значительным вводом тепла в поверхностный объем материала и узкой зоной влияния больших деформации (порядка 30 – 100 мкм) [11; 12].

Применение МИО с целью модификации поверхности приводится в работах [13 – 15]. Работ по выявлению природы и механизмов изменения поверхностных свойств быстрорежущих сталей при использовании МИО крайне мало.

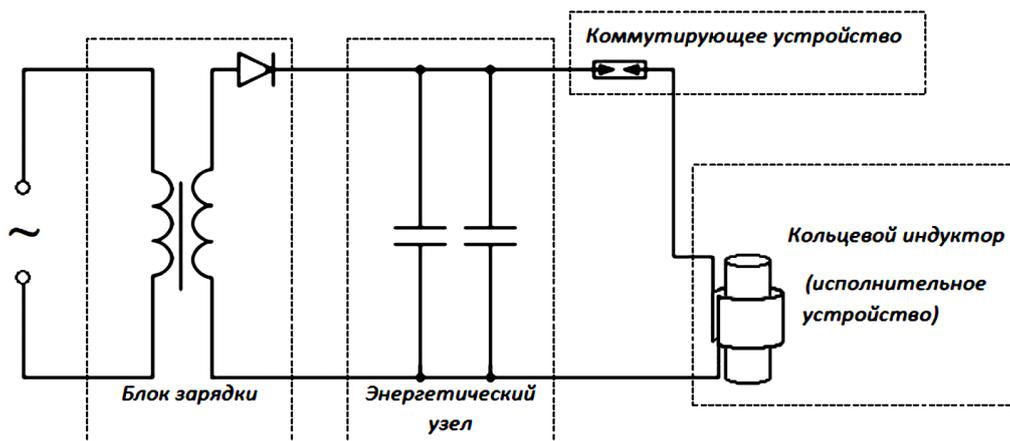


Рис. 1. Схема установки для магнито-импульсной обработки
 Fig. 1. Scheme of the installation for magnetic pulse treatment

Целью настоящей работы является исследование структурно-фазовых преобразований, трибологических свойств стали марки Р6М5, подвергнутой магнито-импульсной обработке.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования использовали образцы из быстрорежущей стали марки Р6М5, изготовленные в виде колец. Внешний диаметр кольцевого образца 55 мм, внутренний – 45 мм, толщина кольца 10 мм. Магнито-импульсную обработку стали осуществляли на установке [9; 10] с напряжением 3 кВ при десяти разрядах. Индуктор изготовлен из медной ленты толщиной 10 мм, согнутой в кольцо диаметром 55 мм. Схема установки представлена на рис. 1.

Исследование элементного состава и состояние дефектной субструктуры образцов, подвергнутых магнито-импульсной обработке, осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (прибор Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV). Исследование фазового состава и состояния кристаллической решетки фаз осуществляли методами рентгенофазового и рентгеноструктурного анализов (дифрактометр XRD-6000 на $\text{CuK}\alpha$ -излучении). Анализ фазового состава проводили с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4. Трибологические испытания (определение износостойкости и коэффициента трения) осуществляли на приборе TRIBOTester при следующих условиях: нагрузка на индентор 10 Н; скорость вращения образца 25 мм/с; радиус трека 2 мм; индентор – шарик Al_2O_3 диаметром 6 мм; длина пути индентирования 50 м (для образца без МИО) и 100 м (для образца после МИО). Трибологические испытания проводили при комнатной температуре в условиях сухого трения.

Результаты и обсуждение

Результаты рентгеноструктурного и рентгенофазового анализов исследуемых образцов представлены на рис. 2 и в табл. 1, где ОКР – области когерентного рассеивания.

Основной фазой исследуемого материала до и после магнито-импульсного воздействия является α -фаза (ОЦК твердый раствор на основе железа). В существенно меньшем количестве в исследуемом материале присутствует γ -фаза (ГЦК твердый раствор на основе железа) и карбиды Fe_3C и WC .

В исходном состоянии (состояние стали до обработки) параметр кристаллической решетки α -фазы $a = 0,28828$ нм. Учитывая, что параметр кристаллической решетки α -железа $a_0 = 0,28668$ нм, и предполагая, что увеличение обусловлено наличием в твердом растворе атомов углерода, можно оценить [16; 17] концентрацию ΔC_α углерода, расположенного в кристаллической решетке α -фазы. Выполненные оценки показали, что $\Delta C_\alpha = 0,040$ %. Параметр кристаллической решетки γ -фазы $a = 0,3699$ нм. Используя выражение, приведенное в работе [18], и принимая во внимание, что параметр кристаллической решетки γ -железа $a_0 = 0,3555$ нм, можно получить, что концентрация ΔC_γ углерода, расположенного в кристаллической решетке γ -фазы, составляет 0,33 %.

Магнито-импульсная обработка стали сопровождается $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением, что приводит к снижению (на 58 %) относительного содержания γ -фазы (табл. 1). Относительное содержание в материале карбидных фаз и тип карбидных фаз не меняется. Параметр кристаллической решетки α -фазы увеличивается до 0,28997 нм. Это соответствует содержанию в кристаллической решетке α -фазы атомов углерода $\Delta C_\alpha = 0,082$ %, то

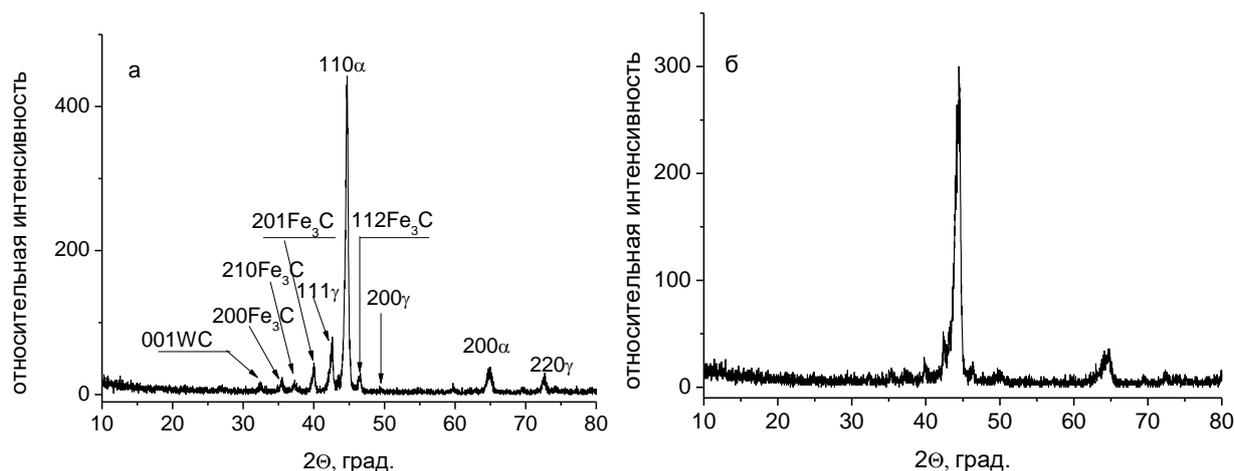


Рис. 2. Фрагменты рентгенограмм образцов стали марки Р6М5 в исходном состоянии (а) и после магнито-импульсной обработки (б)

Fig. 2. Fragments of X-ray diffraction patterns obtained from samples of P6M5 steel in the initial state (a) and after magnetic pulse treatment (b)

есть соответствует формированию пересыщенного по углероду твердого раствора. Параметр кристаллической решетки γ -фазы в результате магнито-импульсной обработки снижается до 0,36867 нм. Это соответствует концентрации атомов углерода в кристаллической решетке γ -фазы $\Delta C_\gamma = 0,30\%$.

Магнито-импульсная обработка сопровождается преобразованием дефектной субструктуры стали, о чем свидетельствует уменьшение области когерентного рассеяния α -фазы в 2,1 раза и γ -фазы – в 1,5 раза (табл. 1). Существенным образом изменяется микроискажение кристаллической решетки фаз ($\Delta d/d$). Параметр $\Delta d/d$ α -фазы увеличи-

вается в 10 раз, а γ -фазы снижается в 1,6 раза. Изменение микроискажения коррелируется с изменением концентрации атомов углерода в кристаллической решетке α - и γ -фаз: увеличение концентрации атомов углерода в кристаллической решетке α -фазы с 0,040 до 0,082 % приводит к увеличению микроискажений кристаллической решетки в 10 раз. Подобная же взаимосвязь микроискажения и для концентрации атомов углерода в твердом растворе наблюдается для γ -фазы.

Следовательно, исходя из результатов, полученных методами рентгенофазового и рентгеноструктурного анализов, магнито-импульсная обработка стали марки Р6М5 сопровождается пре-

Т а б л и ц а 1

Результаты рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа

Table 1. Results of X-ray structural and X-ray phase analysis

Образец	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, %	Параметры решетки, Å	Размер ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^{-3}$
Исходное состояние	α -Fe	74	$a = 2,8828$	41	0,3
	γ -Fe	19	$a = 3,6990$	24	3,9
	Fe_3C	4	$a = 5,1785$ $b = 6,8175$ $c = 4,4690$	–	–
	WC	Менее 3	$a = 2,8162$ $c = 2,9370$	–	–
После МИО	α -Fe	80	$a = 2,8997$	20	3,0
	γ -Fe	11	$a = 3,6867$	16	2,5
	Fe_3C	6	$a = 5,1006$ $b = 6,7961$ $c = 4,5160$	–	–
	WC	Менее 3	$a = 2,8972$ $c = 2,9370$	–	–

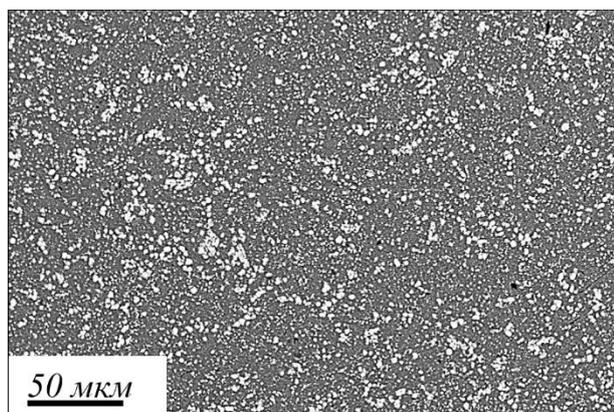


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры травленого шлифа стали марки Р6М5
Fig. 3. Electron microscopic image of the structure of an etched section of P6M5 steel

образованием структуры материала: изменением относительного содержания α - и γ -фаз в результате протекания $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения; изменением состояния твердых растворов на основе кристаллических решеток α - и γ -фаз и преобразованием дефектной субструктуры. Процесс преобразования структуры стали протекает в направлении увеличения прочности модифицированного слоя, что обусловлено следующими физическими механизмами [19]: твердорастворным (обусловлен увеличением концентрации атомов углерода в кристаллической решетке α -фазы) и субструктурным (обусловлен диспергированием структуры α -фазы, о чем свидетельствует кратное уменьшение областей когерентного рассеивания). Не следует исключать и увеличения вклада в упрочнение модифицированного слоя внутренних полей напряжений [19 – 21].

Структура стали марки Р6М5 характеризуется наличием включений карбидной фазы (рис. 2). Методами сканирующей электронной микроскопии травленого шлифа показано, что рассматриваемые включения имеют глобулярную форму и

расположены в объеме стали хаотическим образом (рис. 3).

Методами микрорентгеноспектрального анализа установлено, что, независимо от места анализа (участок, подвергнутый или не подвергнутый МИО), включения обогащены атомами вольфрама, молибдена и железа (рис. 3, табл. 2), то есть могут являться карбидом сложного состава Me_6C .

Исследования структуры травленого шлифа стали марки Р6М5, выполненные методами сканирующей электронной микроскопии, выявили визуальные различия в размерах включений карбидной фазы образца без и после МИО (рис. 4, а, в).

Результаты количественного анализа размеров включений карбидной фазы образца без и после МИО (рис. 5, б, г) свидетельствуют о том, что средний размер D включений образца без МИО составляет 0,623 мкм, интервал изменения размеров частиц – от 0,11 до 2,32 мкм. Средний размер включений слоя образца стали после МИО 0,30 мкм, размеры включений изменяются в пределах от 0,06 до 1,49 мкм. Магнито-импульсная обработка стали марки Р6М5 сопровождается существенным (более чем в два раза) уменьшением средних размеров включений карбидной фазы.

Преобразование структуры стали в результате МИО должно отразиться и на трибологических свойствах материала. Для образца стали без МИО параметр износа $k = 4,0 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$, коэффициент трения $\mu = 0,58$; для образца стали после МИО $k = 8,4 \times 10^{-5} \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$, $\mu = 0,59$. Таким образом, магнито-импульсная обработка стали марки Р6М5 приводит к повышению износостойкости материала. Это может быть обусловлено как двукратным уменьшением средних размеров частиц карбидной фазы, так и многократным увеличением микроскажений кристаллической решетки (внутренних напряжений) α -фазы (основной фазы исследуемой стали).

Т а б л и ц а 2

Результаты микрорентгеноспектрального анализа участка стали марки Р6М5

Table 2. The results of the micro-X-ray spectral analysis of a section of P6M5 steel

Элемент	Элементный состав включения (рис. 3, а, спектр 1)		Элементный состав стали с площади (рис. 3, а)	
	Весовой %	Атомный %	Весовой %	Атомный %
V (K)	2,86	4,91	3,38	4,21
Cr (K)	3,91	6,58	4,70	5,74
Fe (K)	30,13	47,24	70,47	80,11
Mo (L)	25,70	23,46	8,00	5,30
W (M)	37,40	17,81	13,45	4,65

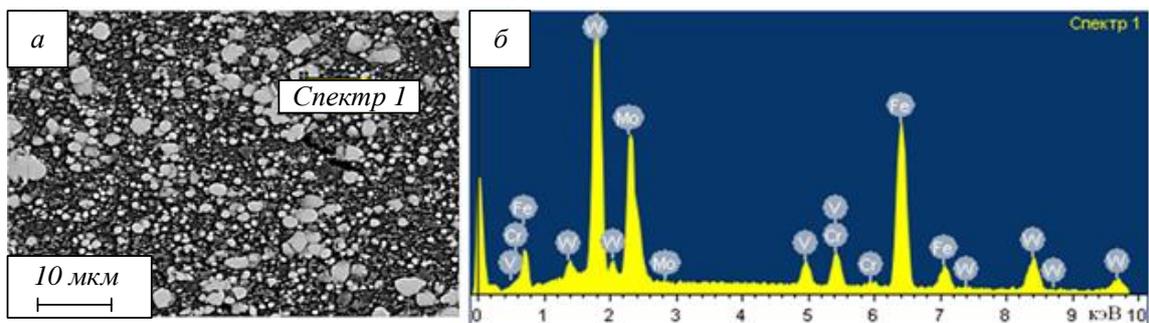


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры травленого шлифа стали марки Р6М5 (а); энергетические спектры (б), полученные с участка спектр 1
 Fig. 4. Electron microscopic image of the structure of an etched R6M5 steel strip (a); energy spectra (b) obtained from the spectrum 1 site

Определенным образом изменяется коэффициент трения исследуемой стали (рис. 6). Коэффициент трения стали без МИО изменяется в две стадии: линейно увеличивается в течение первых 600 с испытаний и, далее, выходит на насыщение.

Для стали после МИО изменение коэффициента трения протекает в три стадии: на первой стадии (400 с) коэффициент трения увеличивается, достигая 0,3; на второй стадии (400 с) коэффициент трения не изменяется; на третьей стадии (400 с) коэффициент трения вновь увеличивается, достигая насыщения.

Можно предположить, что первые две стадии изменения коэффициента трения (800 с) соответствуют трибологическим испытаниям именно поверхностного слоя, структура и фазовый состав которого был подвергнут преобразованиям в результате магнито-импульсной обработки. Таким образом, выполненные трибологические испытания позволили показать, что магнито-импульсная обработка стали марки Р6М5 приводит к снижению коэффициента трения почти в два раза относительно необработанного материала.

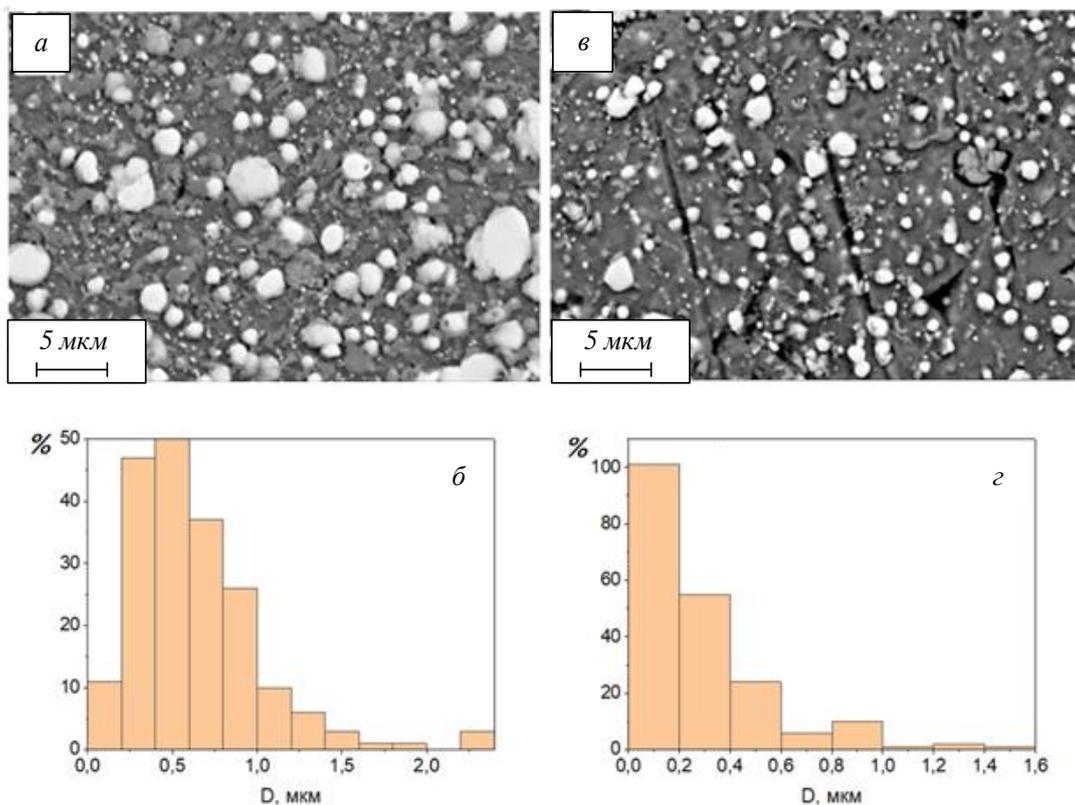


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали марки Р6М5 в исходном состоянии (а) и после МИО (б); б и з – гистограммы включений карбидной фазы участка образца без и после МИО
 Fig. 5. Electron microscopic image of the structure of R6M5 grade steel in the initial state (a) and after MIO (b); б and з – are histograms of inclusions of the carbide phase of the sample section without and after MIO

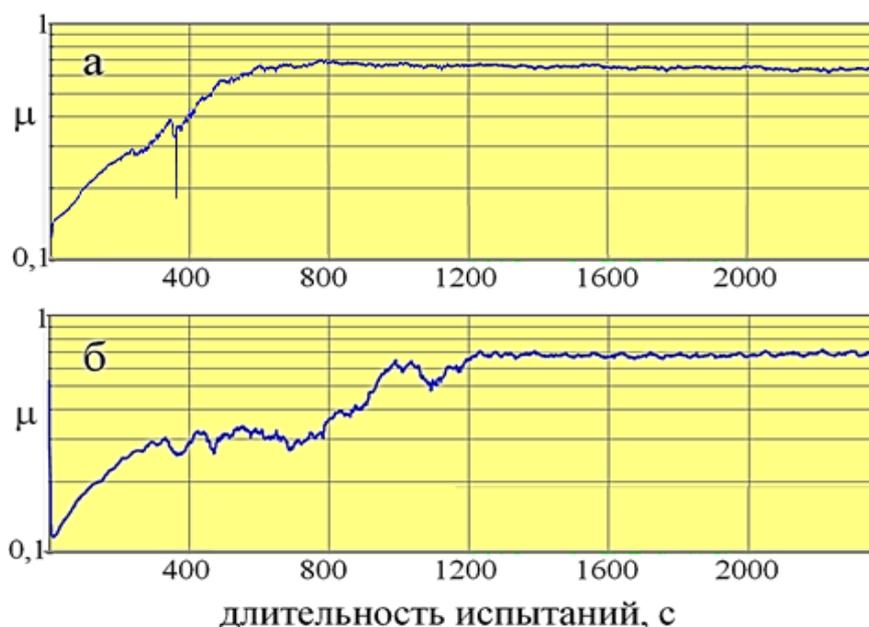


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от длительности трибологических испытаний образца стали Р6М5 без (а) и после (б) МИО
 Fig. 6. Dependence of the friction coefficient on the duration of tribological tests of a P6M5 steel sample without (a) and after (b) MIO

Выводы

Выполнена магнито-импульсная обработка образцов стали марки Р6М5, сопровождающаяся следующими основными преобразованиями структуры поверхностного слоя:

- $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением стали, что приводит к снижению (на 58 %) относительного содержания γ -фазы;
- повышением концентрации углерода в кристаллической решетке α -фазы более чем в два раза;
- преобразованием дефектной субструктуры поверхностного слоя стали, о чем свидетельствует уменьшение области когерентного рассеяния α -фазы в 2,1 раза и γ -фазы – в 1,5 раза;
- увеличением микроискажений кристаллической решетки α -фазы в 10 раз;
- существенным (более чем в два раза) уменьшением средних размеров включений карбидной фазы.

Высказано предположение, что выявленное преобразование структуры стали протекает в направлении увеличения прочности модифицированного слоя обусловлено увеличением концентрации атомов углерода в кристаллической решетке α -фазы и диспергированием структуры α -фазы, о чем свидетельствует кратное уменьшение областей когерентного рассеивания. Не следует исключать вклад в упрочнение модифицированного слоя внутренних полей напряжений.

Установлено, что магнито-импульсная обработка стали марки Р6М5 приводит к повышению

износостойкости материала, что может быть обусловлено как двукратным уменьшением средних размеров частиц карбидной фазы, так и многократным увеличением микроискажений кристаллической решетки (внутренних напряжений) α -фазы (основной фазы исследуемой стали). Выявлено многостадийное изменение коэффициента трения при трибологических испытаниях стали, подвергнутой магнито-импульсной обработке. Высказано предположение, что магнито-импульсная обработка стали марки Р6М5 приводит к формированию поверхностного слоя, коэффициент трения которого почти в два раза ниже коэффициент трения необработанного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wu W., Chen W., Yang S., Lin Y., Zhang S., Cho T-Y., Lee G.H., Kwon S.-Ch. Design of AlCrSiN multilayers and nanocomposite coating for HSS cutting tools. *Appl. Surf. Sci.* 2015;351:803–810.
2. Cho I.S., Amanov A., Kim J.D. The effects of AlCrN coating, surface modification and their combination on the tribological properties of high speed steel under dry conditions. *Tribol. Int.* 2015;81:61–72.
3. Kottfer D., Ferdinandy M., Kaczmarek L., Maňková I., Beňo J. Investigation of Ti and Cr based PVD coatings deposited onto HSS Co 5 twist drills. *Applied Surface Science.* 2013;282:770–776.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.06.051>

4. Gerth J., Wiklund U. The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel. *Wear*. 2008;264:885–892. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.11.053>
5. Chaus A.S., Rudnitskii F.I. Structure and Properties of Cast Rapidly Cooled High-Speed Steel R6M5. *Metal Science and Heat Treatment*. 2003;45:157–162. <http://doi.org/10.1023/A:1025997100645>
6. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменной обработке / Под ред. Н.Н. Ковалева, Ю.Ф. Иванова. Томск: НТЛ. 2016:298.
7. Коваль Н.Н. Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке. *Известия вузов. Физика*. 2008;51(5):60–70. EDN: IXVYKN.
8. Чапайкин А.С., Громов В.Е., Чжан П., Иванов Ю.Ф., Крюков Р.Е., Шляров В.В., Семин А.П. Структурно-фазовые состояния и свойства плазменной наплавки быстрорежущей стали в среде азота. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):35–47. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-35-47](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-35-47)
9. Володин В.А., Сарычев В.Д., Гудимова Л.Н., Яницкий И.Е. Влияние импульсных магнитных полей на структуру и свойства металлических сплавов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1990;10:77–79.
10. Володин В.Л., Хасанов О.Л., Володин Т.В., Громов В.Е., Коновалов С.В. *Формирование структурно-фазовых состояний металлических сплавов при магнитно-импульсной обработке*. Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2011:221.
11. Volodin V.L., Kon'kov Yu.D., Gaiduk V.V., Volodin T.V., Sarychev V.D. Resistance to fatigue failure of bimetal after pulsed treatment with electric currents in an alternating magnetic field. *Steel in Translation*. 2002;32(2):68–74.
12. Гагарин А.Ю., Сарычев В.Д., Черемушкина Е.В., Грановский А.Ю., Громов В.Е. Импульсное магнитное поле для создания на поверхности металлов полей высоких температур. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2016;21(3):926–929.
13. Алифанов А.В., Ционенко Д. А., Милукова А.М. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса. В кн. *Перспективные материалы и технологии*. Витебск: ВГТУ, 2017:31–52.
14. Kostyk K., Kuric I., Saga M., Kostyk V., Ivanov V., Kovalov V., Pavlenko I. Impact of Magnetic- Pulse and Chemical-Thermal Treatment on Alloyed Steels' Surface Layer. *Applied Sciences*. 2022;12(1):469. <https://doi.org/10.3390/app12010469>
15. Stolyarov V., Misochenko A.A. Pulsed Current Application to the Deformation Processing of Materials. *Materials*. 2023;16(18):6270. <https://doi.org/10.3390/ma16186270>
16. Fasiska E.J., Wagenblat H. Dilatation of alpha-iron by carbon. *Trans. Met. Soc. AIME*. 1967;239(11):1818–1820.
17. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. *Превращения в железе и стали*. Москва: Наука. 1977:236.
18. Ridley N., Stuart H., Zwell L. Lattice parameter of Fe – C austenite of room temperature. *Trans. Met. Soc. AIME*. 1969;246(8):1834–1836.
19. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Попова Н.Н., Коновалов С.В., Конева Н.А. *Структурно-фазовые состояния и механизмы упрочнения деформированной стали*. Новокузнецк: Полиграфист. 2016:510. EDN: ZQOUNB.
20. Конева Н.А., Киселева С.Ф., Попова Н.А. *Эволюция структуры и внутренние поля напряжений*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing RU. 2017:148.
21. Попова Н.А., Громов В.Е., Порфирьев М.А., Иванов Ю.Ф., Никоненко Е.Л., Невский С.А. Механизмы упрочнения тяжело нагруженных рельсов из заэвтектоидной стали при длительной эксплуатации. *Вопросы материаловедения*. 2024;1(117):20–39.

REFERENCES

1. Wu W., Chen W., Yang S., Lin Y., Zhang S., Cho T-Y., Lee G.H., Kwon S.-Ch. Design of AlCrSiN multilayers and nanocomposite coating for HSS cutting tools. *Appl. Surf. Sci.* 2015;351:803–810.
2. Cho I.S., Amanov A., Kim J.D. The effects of AlCrN coating, surface modification and their combination on the tribological properties of high speed steel under dry conditions. *Tribol. Int.* 2015;81:61–72.
3. Kottfer D., Ferdinandy M., Kaczmarek L., Maňková I., Beňo J. Investigation of Ti and Cr based PVD coatings deposited onto HSS Co 5 twist drills. *Applied Surface Science*. 2013;282:770–776. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.06.051>
4. Gerth J., Wiklund U. The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel. *Wear*. 2008;264:885–892. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.11.053>

5. Chaus A.S., Rudnitskii F.I. Structure and Properties of Cast Rapidly Cooled High-Speed Steel R6M5. *Metal Science and Heat Treatment*. 2003;45:157–162.
<http://doi.org/10.1023/A:1025997100645>
6. Kovalya N.N., Ivanova Yu.F. ed. *Evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma treatment*. Tomsk:NTL. 2016:298. (In Russ.).
7. Koval' N.N. Ivanov Yu.F. . Nanostructuring of the surface of metal-ceramic and ceramic materials using pulsed electron-beam processing *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2008;51(5):60–70. (In Russ.). EDN: IXVYKN.
8. Chapaikin A.S., Gromov V.E., Chzhan P., Ivanov Yu.F., Kryukov R.E., Shlya-rov V.V., Semin A.P. Structural-phase states and properties of plasma surfacing of high-speed steel in a nitrogen environment. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2024;1(47):35–47. (In Russ.).
[http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-35-47](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-35-47)
9. Volodin V.A., Sarychev V.D., Gudimova L.N., Yanitskii I.E. The influence of pulsed magnetic fields on the structure and properties of metal alloys. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1990;10:77–79. (In Russ.).
10. Volodin V.L., Khasanov O.L., Volodin T.V., Gromov V.E., Konovalov S.V. Formation of structural-phase states of metal alloys during magnetic-pulse treatment. Novokuznetsk: Izdvo «Inter-Kuzbass», 2011:221. (In Russ.).
11. Volodin V.L., Kon'kov Yu.D., Gaiduk V.V., Volodin T.V., Sarychev V.D. Resistance to fatigue failure of bimetal after pulsed treatment with electric currents in an alternating magnetic field. *Steel in Translation*. 2002;32(2):68–74.
12. Gagarin A.Yu., Sarychev V.D., Cheremushkina E.V., Granovskii A.Yu., Gromov V.E. Pulsed magnetic field for creating high temperature fields on the surface of metals. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2016;21(3):926–929. (In Russ.).
13. Alifanov A.V., Tsionenko D. A., Milyukova A. M. Physics of the process of magnetic pulse hardening of steel products, calculation of inductors and process parameters. In.: *Advanced materials and technologies*. Vitebsk: VGTU. 2017:31–52. (In Russ.).
14. Kostyk K., Kuric I., Saga M., Kostyk V., Ivanov V., Kovalov V., Pavlenko I. Impact of Magnetic-Pulse and Chemical-Thermal Treatment on Alloyed Steels' Surface Layer. *Applied Sciences*. 2022;12(1):469.
<https://doi.org/10.3390/app12010469>
15. Stolyarov V., Misochenko A.A Pulsed Current Application to the Deformation Processing of Materials. *Materials*. 2023;16(18):6270.
<https://doi.org/10.3390/ma16186270>
16. Fasiska E.J., Wagenblat H. Dilatation of alpha-iron by carbon. *Trans. Met. Soc. AIME*. 1967;239(11):1818–1820.
17. Kurdyumov V.G., Utevskii L.M., Entin R.I. *Transformations in iron and steel*. Moscow: Nauka. 1977:236. (In Russ.).
18. Ridley N., Stuart H., Zwell L. Lattice parameter of Fe–C austenite of room temperature. *Trans. Met. Soc. AIME*. 1969;246(8):1834–1836.
19. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Popova N.N., Konovalov S.V., Koneva N.A. *Structural-phase states and strengthening mechanisms of deformed steel*. Novokuznetsk: Poligrafist. 2016:510. (In Russ.). EDN: ZQOUNB.
20. Koneva N.A., Kiseleva S.F., Popova N.A. *Evolution of structure and internal stress fields*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing RU. 2017:148. (In Russ.).
21. Popova N.A., Gromov V.E., Porfir'ev M.A., Ivanov Yu.F., Nikonenko E.L., Nevskii S.A. Mechanisms for strengthening heavily loaded hypereutectoid steel rails during long-term operation. *Voprosy materialovedeniya*. 2024;1(117):20–39. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Владимир Дмитриевич Сарычев, к.т.н., ведущий научный сотрудник Управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: sarychev_vd@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4861-0778

Тарас Витальевич Володин, соискатель, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: volodin_tv@mail.ru

ORCID: 0009-0008-1160-675X

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

Алексей Юрьевич Грановский, к.т.н., старший научный сотрудник Управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: legatokun@gmail.com

ORCID: 0009-0006-4583-8431

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0271-5504

Information about the authors:

Vladimir D. Sarychev, *Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University*

E-mail: sarychev_vd@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4861-0778

Taras V. Volodin, *PhD candidate, Siberian State Industrial University*

E-mail: volodin_tv@mail.ru

ORCID: 0009-0008-1160-675X

Viktor E. Gromov, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University*

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

Alexey Yu. Granovsky, *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University*

E-mail: legatokun@gmail.com

ORCID: 0009-0006-4583-8431

Yuri F. Ivanov, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Institute of High-Current Electronics SB RAS*

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0271-5504

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 20.08.2024

После доработки 09.12.2024

Принята к публикации 12.12.2024

Received 20.08.2024

Revised 09.12.2024

Accepted 12.12.2024

Оригинальная статья

УДК 669.017

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-25-34

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРЕМНИЯ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ФАЗЫ TiC ПРИ ПОЛУЧЕНИИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АК10М2Н – 10 % TiC МЕТОДОМ СВС

© 2025 г. Ю. В. Шерина, А. Р. Луц, Д. В. Закамов

Самарский государственный технический университет (Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244)

Аннотация. Алюмоматричные композиционные материалы (АМКМ) сочетают в себе комплекс свойств матричного сплава и армирующего наполнителя, что привлекает к ним большой интерес. Для их изготовления наиболее целесообразно применение жидкофазных методов, особое место в числе которых занимает метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Он позволяет получать ультрадисперсные армирующие фазы непосредственно в расплаве из исходных элементарных порошков микронных размеров, исключить закупку дорогостоящих высокодисперсных порошков, а также сократить энергозатраты и время получения готового продукта. При использовании этого метода возможен синтез керамической фазы TiC с размерами частиц от 100 нм, причем не только в расплаве технического алюминия, но и в присутствии легирующих элементов. Рассматриваемая технология открывает большие возможности для повышения комплекса свойств существующих промышленных алюминиевых сплавов и особенно привлекательна для сплавов системы Al – Si, широко востребованных, но не отличающихся высокими механическими характеристиками. Приводятся результаты исследования по изучению влияния кремния в составе матричного сплава АК10М2Н на стабильность фазы TiC, образуемой в его расплаве методом СВС. В ходе экспериментальных исследований увеличивали время выдержки расплава при температуре 900 °С. Установлено, что по истечении 5 мин в составе образуется исключительно требуемая фаза TiC, однако дальнейшая выдержка приводит к ее деградации и после 15 мин выдержки образуется фаза SiC, а после 30 мин – МАХ-фаза состава Ti₃SiC₂, что приводит к снижению твердости композиционного материала. По результатам исследования сделан вывод, что наличие кремния в составе матричного сплава может оказывать негативное влияние на стабильность целевой фазы карбида титана, что обуславливает необходимость строгого соблюдения технологии и не превышения времени выдержки расплава более 5 мин.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, карбид титана, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, композиционный материал

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

Для цитирования: Шерина Ю.В., Луц А.Р., Закамов Д.В. Исследование влияния кремния на стабильность фазы TiC при получении композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC методом СВС. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):25–34. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-25-34](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-25-34)

*Original article***STUDY OF THE INFLUENCE OF SILICON ON THE STABILITY OF THE TiC PHASE IN THE PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIAL AK10M2N – 10 % TiC BY THE SHS METHOD**

© 2025 Yu. V. Sherina, A. R. Lutz, D. V. Zakamov

Samara State Technical University (Russia, 443100, Samara, 244 Molodogvardeyskaya St.)

Abstract. Aluminum matrix composite materials (AMCM) combine a set of properties of a matrix alloy and a reinforcing filler, which attracts great interest from researchers. For their manufacture, it is most advisable to use liquid-phase methods, a special place among which is occupied by the method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS), which allows to produce ultrafine reinforcing phases directly in the melt from the initial micron-sized elemental powders and exclude the purchase of expensive highly dispersed powders, as well as reduce energy consumption and time to obtain the finished product. Using this method, it is possible to synthesize the ceramic phase of TiC with particle sizes from 100 nm, not only in the melt of technical aluminum, but also in the presence of alloying elements. This technology opens up great opportunities for improving the complex properties of existing industrial aluminum alloys and is especially attractive for alloys of the Al-Si system, which are widely in demand, but do not differ in high mechanical characteristics. The presented paper presents the results of a study on the effect of silicon in the matrix alloy AK10M2H on the stability of the TiC phase formed in its melt by the SHS method. During experimental studies, the melt holding time was increased at a temperature of 900 °C and it was found that after 5 minutes, the exclusively required TiC phase is formed in the composition, however, further exposure leads to its degradation and after 15 minutes of exposure, the SiC phase is formed, and after 30 minutes, the MAX phase of the Ti_3SiC_2 composition, which leads to reducing the hardness of the composite material. According to the results of the study, it was concluded that the presence of silicon in the matrix alloy may have a negative effect on the stability of the target phase of titanium carbide, which necessitates strict compliance with the technology and not exceeding the melt holding time of more than 5 minutes.

Keywords: aluminum alloys, titanium carbide, self-propagating high-temperature synthesis, composite material

Acknowledgements. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (topic no. AAAAA-A12-2110800012-0).

For citation: Sherina Yu.V., Lutz A.R., Zakamov D.V. Study of the influence of silicon on the stability of the TiC phase in the production of composite material AK10M2N – 10 % TiC by the shs method. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):25–34. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-25-34](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-25-34)

Введение

Сплавы на основе алюминия и кремния (силумины) широко используются в промышленности благодаря их небольшой массе, устойчивости к коррозии и высоким литейным свойствам (жидкотекучесть, малая линейная усадка). Они широко применяются для производства средних и крупных литых деталей (головки цилиндров, поршни двигателей внутреннего сгорания и др.). Наибольшее распространение получили специальные силумины, в составе которых, помимо кремния, присутствуют и другие легирующие элементы (медь, магний, марганец, титан, никель, цирконий и хром). Даже после легирования силумины уступают по прочности и износостойкости другим сплавам, например, дюралюминам. Поэтому задача улучшения механических характеристик силуминов остается актуальной [1].

Одним из наиболее перспективных способов улучшения показателей прочности и износостойкости силуминов является армирование их дисперсными керамическими фазами, в качестве которых эффективно используются частицы карбидов кремния или титана [2]. Несмотря на то, что соединение SiC производится в промышленных объемах и экономически более выгодно, его применение может привести к образованию пластинчатой фазы Al_4C_3 , наличие которой приводит к ухудшению адгезионной связи, и, следовательно, физико-механических свойств [3]. Использование карбида титана для армирования менее распространено в силу его высокой стоимости, но является более предпочтительным, так как TiC обладает более высокими физико-механическими свойствами (температура плавления, твердость, термодинамическая стабильность и др.) и

имеет ГЦК решетку, близкую по размерам к решетке матричного алюминия. Это дает возможность выступать частицам в качестве центров кристаллизации и обладать более высокой смачиваемостью [4].

На конечные характеристики любого дисперсно армированного композита большое влияние оказывает способ его производства. Среди существующих методов производства алюмоматричных композиционных материалов (АМКМ) [5] наиболее часто применяют жидкофазные методы, среди которых особое место занимает самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) в расплаве, разработанный в Самарском государственном техническом университете [6; 7]. Метод СВС подразумевает синтез карбидной фазы из элементных порошков непосредственно в расплаве, что позволяет устранить проблемы загрязнения расплава оксидами и обеспечивает хорошую смачиваемость керамической фазы матричным расплавом, а также снижает энергетические и временные затраты на производство АМКМ.

Проведенный анализ отечественных работ в рассматриваемой области показал, что АМКМ на основе силуминов получают преимущественно методом механического замешивания. В работе [8] установлено, что армирование матричных сплавов АК12 и АК12М2МгН карбидом кремния в количестве 5 и 3 % (здесь и далее по массе) способствует повышению твердости с 624 до 712 НВ для первого сплава и с 988 до 1070 НВ для второго, а также увеличению их износостойкости не менее чем в 2 раза. В работах [9; 10] проведено сравнение влияния армирования фазами SiC и TiC в количестве 5 и 10 % на свойства сплавов АК12 и АК12М2МгН, а также показано, что максимальное увеличение твердости (не менее чем на 10 НВ) и износостойкости (не менее чем в 2 раза) с обеспечением малого коэффициента трения (примерно 0,33) наблюдается при добавлении именно фазы TiC в количестве 10 %.

В работах [11; 12] также активно исследуется армирование фазой карбида титана как вводимой извне, так и синтезируемой непосредственно в расплаве методом СВС. В работе [13] показана возможность успешного формирования фазы TiC в составе сплава, содержащем до 40 % кремния. В работе [12] хотя и показана возможность ввода фазы карбида титана методом механического замешивания в состав сплава Al – 7 % Si – 4 % Cu (с примесями железа и марганца), но посредством рентгенофазового анализа установлено, что количество усвоенной армирующей фазы значительно меньше вводимого (5 вместо 20 %). В работе [14] сделан вывод о том, что при арми-

ровании силуминов карбидом титана наличие кремния приводит к снижению смачиваемости, и, как следствие, меньшему усвоению карбидной фазы. Кремний способствует распаду карбидной фазы с образованием интерметаллических фаз Al_4C_3 и затем соединения TiSi, в результате чего итоговая смачиваемость в системе Al – Si/TiC оказывается ниже, чем у системы Al – TiC. В ходе армирования фазой карбида титана силуминов особое внимание следует уделять выбору температурно-временных режимов [15 – 17], так как в работе [15] показана возможность армирования сплава Al – 7 % Si 10 % TiC при температуре расплава 800 °С, но проводимая далее длительная выдержка расплава в течение 6 ч приводит к распаду TiC с образованием тройной фазы Ti – Al – Si и интерметаллической – Al_4C_3 , хотя при этом отмечается возможность восстановления фазы TiC при увеличении температуры расплава выше 800 °С. В работе [16] отмечается, что при синтезе фазы карбида титана в составе АМКМ на основе Al – 12 % Si при температуре 800 °С увеличение времени выдержки с 5 до 20 мин приводит к практически полному распаду карбида титана без возможности последующего восстановления. Такое явление связывают со способностью кремния диффундировать в решетку карбида титана, разрушая его структуру [17]. При введении в лигатуру Al – 3 % Ti – 0,75 % C (полученную методом СВС при температуре 1000 °С) 7 или 13 % Si при температуре 800 °С (с выдержкой расплава 10 мин) формируются фазы Al_4C_3 и $TiAl_xSi_y$, а увеличение температуры до 900 °С способствует образованию фаз Al_4C_3 и Ti_3SiC_2 . В целом, анализ работ зарубежных исследователей по влиянию кремния в составе алюминиевых сплавов на стабильность армирующей фазы карбида титана показывает неоднозначность выводов, однако большинство из них все же указывают на вероятную деградацию фазы TiC в присутствии кремния при длительной выдержке с образованием побочных карбидных, интерметаллических фаз или MAX-фаз.

В Самарском государственном техническом университете ранее были проведены исследования по разработке технологии армирования методом СВС востребованного промышленностью поршневого сплава АК10М2Н, что позволило получить композиционный материал АК10М2Н – 10 % TiC, содержащий основные фазы Si и TiC и отличающийся повышенными характеристиками твердости и износостойкости [18; 19]. В рамках предложенной технологии после проведения синтеза предусмотрена технологическая выдержка расплава при температуре 900 °С в течение 5 мин, предназначенная для завершения химического взаимодействия компонентов. Од-

нако, с учетом того, что оценка термодинамической стабильности карбидной фазы в присутствии кремния существенно отличается, необходимо дальнейшее изучение влияния длительности времени выдержки на конечный фазовый состав композиционного материала, синтезированного методом СВС, что и было поставлено целью настоящей работы.

Методы и принципы исследования

В качестве матрицы использовали промышленный алюминиевый сплав АК10М2Н (ГОСТ 30620–98). В составе шихты использовали порошки титана марки ТПП-7 (ТУ 1791-449-05785388 – 2010), технического углерода П-701 (ГОСТ7885 – 86), взятые в стехиометрическом соотношении, а также галогидной соли Na_2TiF_6 (ТУ 6-09-01-425 – 77) в количестве 5 % от массы шихтовой смеси. Композиционные материалы получали методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза по методике, приведенной в работе [18], однако, варьировали время выдержки расплава после синтеза при температуре 900 °С от 5 до 30 мин. Металлографический анализ осуществляли на растровом электронном микроскопе JSM-6390А с приставкой микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) JSM-2200. Исследование фазового состава происходило с применением рентгенофазового анализа (РФА). Съемку рентгеновских спектров проводили посредством автоматизированного дифрактометра ARL X'trA при непрерывном сканировании в интервале углов 2θ от 20 до 80° со скоростью 2 град./мин Си-излучения. Количественное содержание фаз определяли при помощи программы HighScorePlus. Твердость исследовали на твердомере ТШ-2М (ГОСТ 9012 – 59).

Основные результаты

На рис. 1 представлены микроструктуры композиционного материала на основе матричного сплава АК10М2Н, армированного 10 % TiC, с различным временем выдержки расплава при температуре 900 °С после завершения СВС-реакции взаимодействия компонентов шихты (титана и углерода). Анализ микроструктур после выдержки расплава в течение 5 мин позволяет сделать вывод о наличии фазы карбида титана глобулярной формы с размерами частиц от 180 нм до 2 мкм, расположенными преимущественно на границах с кристаллами кремния (рис. 1, а, б). Полученные данные МРСА для этого об-

разца подтверждают, что в составе частиц блочной фазы присутствуют только титан и углерод (рис. 2, а, спектр 001).

Дальнейшее увеличение времени выдержки расплава до 15 и 30 мин показало качественное изменение микроструктуры и вместо глобулярных частиц, свойственных по форме карбиду титана, преобладающими становятся частицы игольчатой и остроугольной формы (рис. 1, в – е), что дает возможность предположить изменение фазового состава композиционного материала и образование фаз Al_3Ti , SiC, Ti_3SiC_2 [4; 20; 21].

Микрорентгеноспектральный анализ образцов композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC с увеличенным временем выдержки (рис. 2, б, в) показывает отсутствие фаз, состоящих только из титана и углерода, что дает возможность предполагать несколько иной фазовый состав композиционного материала.

С целью установления точного фазового состава был проведен рентгенофазовый анализ синтезированных образцов, результаты которого приведены на рис. 3. Согласно полученным результатам, образец композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC после стандартной выдержки расплава в течение

5 мин включает только фазы кремния и карбида титана (рис. 3, а). Количественная обработка дифрактограммы показывает содержание кремния в количестве 10 % и карбидной фазы не менее 9 %, что дает возможность сделать вывод о сохранении химического состава матричного сплава и подтверждает обеспечение смачиваемости карбидных частиц расплавом [4; 22]. Полученные данные подтверждают, что вследствие быстротечности процесса СВС и малого времени выдержки процесс деградации образуемой фазы карбида титана не происходит [23; 24].

Однако с увеличением времени выдержки происходит качественное изменение фазового состава и после выдержки 15 мин появляется соединение SiC с массовым соотношением фаз в образце 7 % Si; 8 % TiC и 2 % SiC (рис. 3, б), а после 30 мин – Ti_3SiC_2 с соотношением 8 % Si, 5 % TiC и 2 % Ti_3SiC_2 (рис. 3, в).

Полученные результаты подтверждают данные работ [15 – 17], увеличение времени выдержки после синтеза карбидной фазы в расплаве силумина способствует распаду TiC и образованию фаз SiC или Ti_3SiC_2 . Характер изменения фазового состава в зависимости от времени выдержки представлен на рис. 4.

С целью оценки влияния изменения фазового состава на свойства композиционного материала

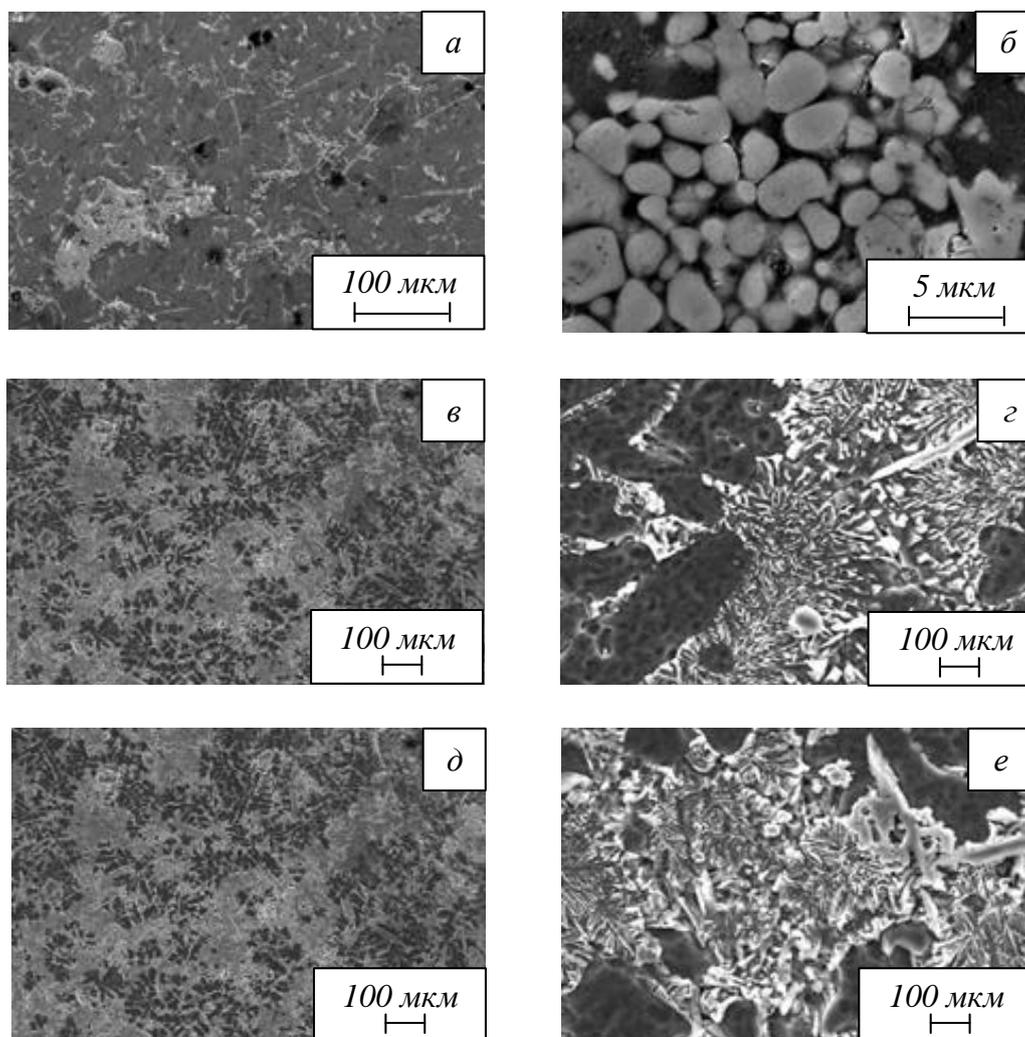


Рис. 1. Микроструктура композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC при выдержке 5 (а, б), 15(в, з), 30 мин (д, е)
 Fig. 1. The microstructure of the composite material АК10М2Н is 10 % TiC at an exposure time of 5 (а, б), 15 (в, з), 30 min (д, е)

были проведены замеры твердости полученных образцов (рис. 5). Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что любое армирование приводит к повышению твердости матричного сплава, однако наибольший показатель твердости (122 НВ) наблюдается в композиционных материалах АК10М2Н – 10 % TiC и АК10М2Н – 8 % TiC – 2 % SiC, что обусловлено высокой твердостью рассматриваемых карбидных фаз [4] и согласуется с данными работы [25]. В образце АК10М2Н – 5 % TiC – 2 % Ti₃SiC₂ твердость снижается до 115 НВ, что объясняется аномальной «мягкостью» фазы Ti₃SiC₂ по сравнению с большинством карбидов [26].

Выводы

По результатам проведенного исследования получено, что после завершения синтеза фазы карбида титана в расплаве, содержащем кремний, в ходе временной выдержки расплава при температуре 900 °С происходит ряд фазовых превращений с деградацией фазы TiC и образованием кремнийсодержащих фаз SiC и Ti₃SiC₂. Помимо

этого установлено, что наличие МАХ-фазы Ti₃SiC₂ приводит к снижению твердости композиционного материала. На основании полученных данных сделан вывод о нецелесообразности увеличения времени выдержки расплава и сохранения ее длительности в течение не более 5 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Н.А. *Фазовый состав алюминиевых сплавов*. Москва: МИСИС, 2009:234.
2. Рафальский И.В. *Ресурсосберегающий синтез сплавов на основе алюминия с использованием дисперсных неметаллических материалов и интеллектуальные методы контроля металлургических процессов их получения*. Минск: БНТ, 2016:209.
3. Курбаткина Е.И., Косолапов Д.В., Ходькин Л.Д., Нигметов М.С. Исследование влияния добавки кремния на фазовый состав алюминиевых композиционных материалов, армированных частицами карбида кремния. *Труды ВИАМ*. 2014;6:35–38.
<http://doi.org/10.1186/s40712-014-0012-9>.

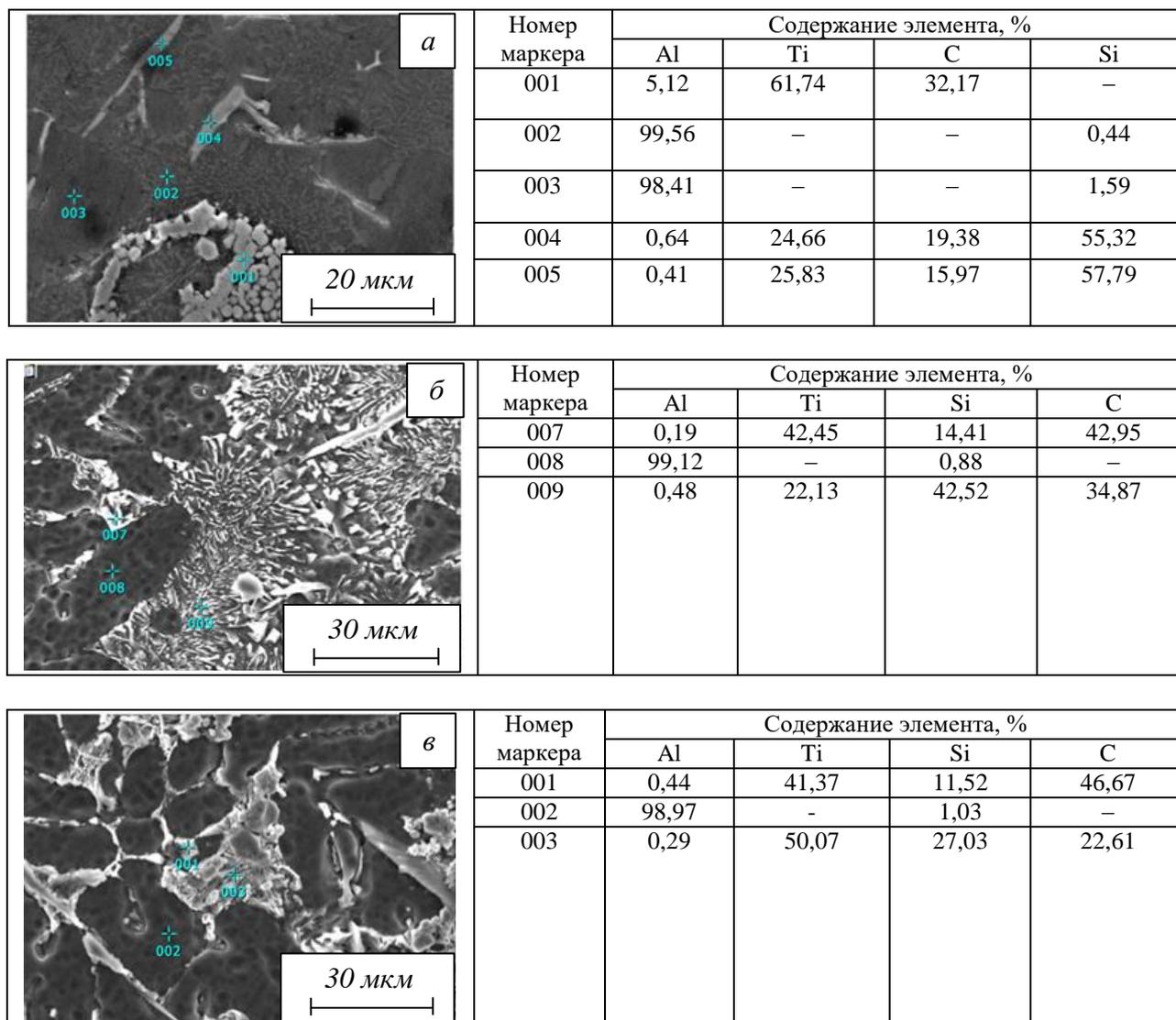


Рис. 2. МРСА композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC:

а – в – время выдержки 5, 15, 30 мин

Fig. 2. MPSA of composite material AK10M2N – 10 % TiC:

a – v – exposure time 5, 15, 30 min

- Михеев Р.С., Чернышова Т.А. Дискретно-армированные композиционные материалы системы Al – TiC (обзор). *Заготовительные производства в машиностроении*. 2008;11:44–53.
- Кулик В.И., Нилов А.С. *Композиционные материалы с металлической матрицей*. Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т, 2020:69.
- Луц А.Р., Амосов А.П., Латухин Е.И., Рыбаков А.Д., Шигин С.В. Получение легированного композиционного материала Al – Cu – Mn – TiC с повышенными триботехническими свойствами. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2020;18(6):278–282. <http://doi.org/10.36652/1684-1107-2020-18-6-278-282>
- Амосов А.П., Луц А.Р., Латухин Е.И., Ермошкін А.А. Применение процессов СВС для получения in situ алюмоматричных композиционных материалов, дискретно армированных наноразмерными частицами карбида титана: обзор. *Известия вузов. Цветная металлургия*, 2016;1:39–49. <http://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-39-49>.
- Курганова Ю.А. Разработка и применение дисперсно упрочненных алюмоматричных композиционных материалов в машиностроении. Автореф. дис. док. техн. наук. Москва;2008:20.
- Чернышова Т.А., Калашников И.Е., Болотова Л.К. Трибологические характеристики литых алюмоматричных композиционных материалов, модифицированных наноразмерными тугоплавкими порошками. *Российские нанотехнологии*. 2011;6(1–2):135–142. <http://doi.org/10.1134/S1995078011010095>.
- Калашников И.Е. Развитие методов армирования и модифицирования структуры алюмоматричных композиционных материалов. Автореф. дис. док. техн. наук. Москва;2011:22.

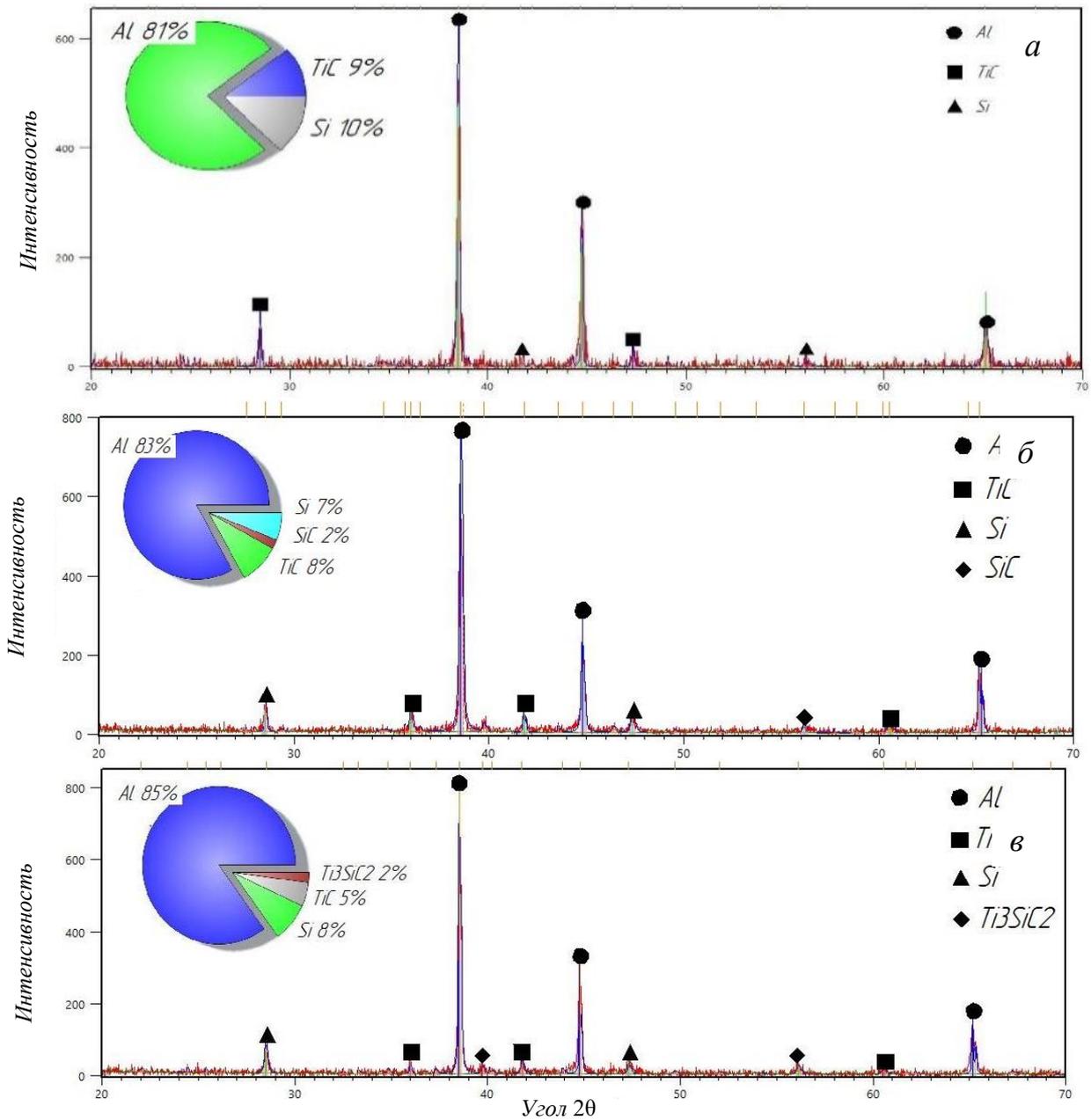


Рис. 3. РФА композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC:

a – в – время выдержки 5, 15, 30 мин

Fig. 3. RFA of composite material AK10M2N – 10 % TiC (exposure time 5 min)

a – в – exposure time 5, 15, 30 min

11. Joseph O. O., Afolalu A. S., Abioyeetal A.A. Effect of TiC addition on the mechanical properties and microstructure of Al-Si alloy. *Materials Today: Proceedings*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.544>
12. Karantzalis A.E., Lekatou A., Georgatis E., Poulas V., Mavros H. Microstructural Observations in a Cast Al – Si – Cu/TiC Composite. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2010;19(4):585–590. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9505-8>
13. Zhang M, Huo Y., Ma L., Huang B., Hu Q. In SituTiC Ceramic Particles Locally Reinforced Al – Si Matrix Composites Prepared by SHS-Casting Method from the Al – Si – Ti – C System. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2013;11(4):723–731. <https://doi.org/10.1111/ijac.12097>
14. Guo R.-F., Wang Y., Ma Y.-H., Shen P. Role of Si in the wetting of TiC by Al. *Journal of Materials Science*. 2020;2. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05496-4>
15. López V.H., Scoles A., Kennedy A.R. The thermal stability of TiC particles in an Al 7wt.% Si alloy / V.H. López, A. Scoles, A.R. Kennedy. *Materials Science and Engineering: A*. 2002;356(1-2): 316–325. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(03\)00143-6](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(03)00143-6)

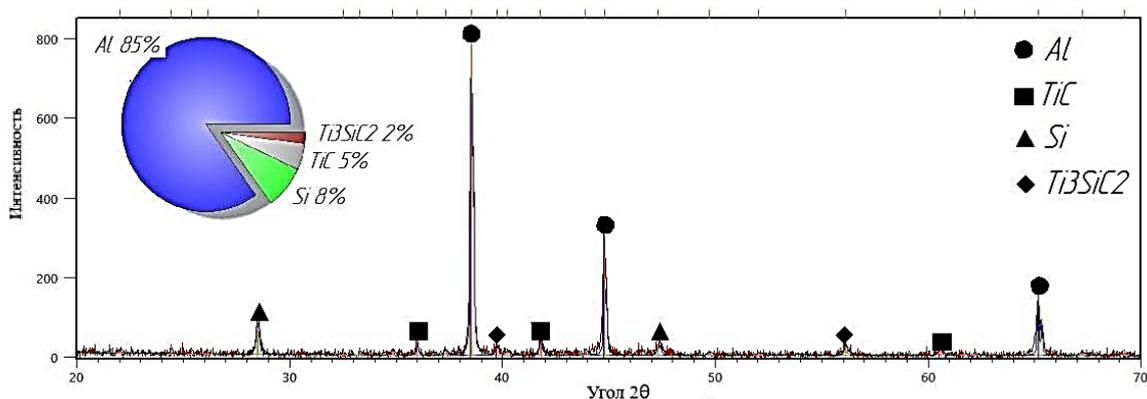


Рис. 4. Изменение фазового состава композиционного материала в зависимости от времени выдержки
 Fig. 4. Change in the phase composition of the composite material depending on the exposure time

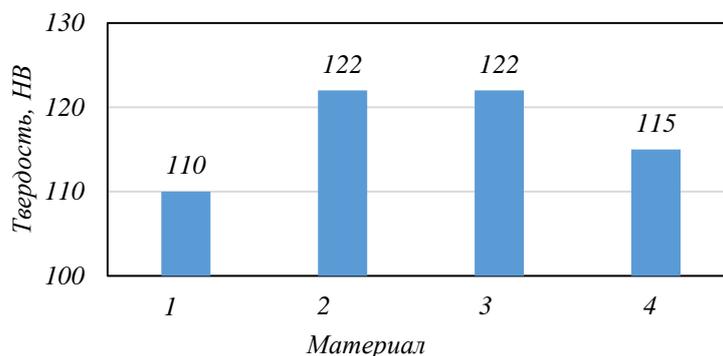


Рис. 5. Изменение твердости композиционных материалов:
 1 – АК10М2Н; 2 – АК10М2Н – 10 % TiC; 3 – АК10М2Н – 8 % TiC – 2 % SiC; 4 – АК10М2Н – 5 % TiC – 2 % Ti₃SiC₂
 Fig. 5. Change in hardness of composite materials:
 1 – АК10М2Н; 2 – АК10М2Н – 10 % TiC; 3 – АК10М2Н – 8 % TiC – 2 % SiC; 4 – АК10М2Н – 5 % TiC – 2 % Ti₃SiC₂

16. Xia F., Liang M.X., Gao X.S., Guo Y.C., Li J.P., Yang W., Zhang Z.K. Instability of in situ TiC particles in an Al–12Si. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):11361–11369. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.063>.
17. Ding H., Liu X. Influence of Si on stability of TiC in Al melts. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011;21(7):1465–1472. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(11\)60882-0](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(11)60882-0)
18. Луц А.Р., Шерина Ю.В., Амосов А.П., Минаков Е.А., Ибатуллин И.Д. Выбор термической обработки и исследование ее влияния на структуру и свойства композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC, полученного методом СВС в расплаве. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2024;30(2):30–43. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-30-43>
19. Шерина Ю.В., Луц А.Р., Ибатуллин И.Д. Разработка композиционного материала на основе сплава АК10М2Н и исследование его триботехнических свойств. *Научные технологии в машиностроении*. 2022;2(128):11–16. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-2-11-16>.
20. Рыбаков А.Д. Применение различных форм углерода для СВС высокодисперсного карбида титана в расплаве при получении алюмоматричных композиционных материалов. Автореф. дис. канд. техн. наук. Самара, 2021:18.
21. Амосов А.П., Латухин Е.И., Умеров Э.Р. Применение процессов инфильтрации и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения керметов: обзор. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021;27(6):52–75. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-6-52-75>
22. Шерина Ю.В. Влияние армирования высокодисперсной фазой карбида титана, синтезированной в расплаве, и термообработки на структуру и свойства промышленных алюминиевых сплавов. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Самара, 2024:20.
23. Шерина Ю.В., Луц А.Р. Влияние термической обработки на свойства композиционных материалов АМг2 – 10 % TiC и АМг6 – 10 % TiC, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. *Frontier Materials & Technologies*. 2024;1: 105–112. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2024-1-67-10>

24. Шерина Ю.В. Исследование влияния добавки высокодисперсной фазы карбида титана, синтезированной в расплаве, и термообработки на структуру и свойства сплава АМ4,5Кд. *Транспортное машиностроение*. 2024;3:59–59. <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2024-3-59-69>
25. Vishnuvardhan Reddy D., Salonica Sravani P., Deepthi N. The investigation of mechanical and metallurgical properties on Al7075-TiC-SiC reinforced hybrid composites by stir casting. *International Journal of Mechanical and Production*, 2019;9:769–776. <https://doi.org/10.24247/ijmperdapr201976>.
26. Каченюк М.Н., Сметкин А.А., Андраковская К.Э. Влияние условий механоактивации и консолидации на формирование композиционного материала Ti_3SiC_2/TiC . *Современные проблемы науки и образования*, 2014;2.
- REFERENCES**
1. Belov N.A. *Phase composition of aluminum alloys*. Moscow: MISIS, 2009:234. (In Russ.).
 2. Rafal'skii I.V. *Resource-saving synthesis of aluminum-based alloys using dispersed non-metallic materials and intelligent methods for controlling metallurgical processes for their production*. Minsk: BNT, 2016:209. (In Russ.).
 3. Kurbatkina E.I., Kosolapov D.V., Khodykin L.D., Nigmatov M.S. Study of the influence of silicon additive on the phase composition of aluminum composite materials reinforced with silicon carbide particles. *Trudy VIAM*. 2014;6:35–38. (In Russ.). <http://doi.org/10.1186/s40712-014-0012-9>
 4. Mikheev R.S., Chernyshova T.A. Discretely reinforced composite materials of the Al – TiC system (review). *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2008;11:44–53. (In Russ.).
 5. Kulik V.I., Nilov A.S. Composite materials with a metal matrix: a manual. Saint-Petersburg: Balt. gos. tekhn. un-t, 2020:69. (In Russ.).
 6. Luts A.R., Amosov A.P., Latukhin E.I., Rybakov A.D., Shigin S.V. Production of alloyed composite material Al – Cu – Mn – TiC with improved tribotechnical properties. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2020;18(6):278–282. (In Russ.). <http://doi.org/10.36652/1684-1107-2020-18-6-278-282>.
 7. Amosov A.P., Luts A.R., Latukhin E.I., Ermoshkin A.A. Application of SHS processes for in situ fabrication of aluminomatrix composites discretely reinforced with nanosized titanium carbide particles: a review. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2016;1:39–49. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-39-49>
 8. Kurganova Yu.A. Development and application of dispersion-hardened aluminum matrix composite materials in mechanical engineering. Avtoref. dis. dok. tekhn. nauk. Moscow;2008:20. (In Russ.).
 9. Chernyshova T.A., Kalashnikov I.E., Bolotova L.K. Tribological characteristics of cast aluminum matrix composite materials modified with nanoscale refractory powders. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2011;6(1-2):135–142. (In Russ.). <http://doi.org/10.1134/S1995078011010095>.
 10. Kalashnikov I.E. *Development of methods for reinforcing and modifying the structure of aluminum matrix composite materials*. Avtoref. dis. dok. tekhn. nauk. Moscow;2011:428. (In Russ.).
 11. Joseph O.O., Afolalu A.S., Abioyeetal A.A. Effect of TiC addition on the mechanical properties and microstructure of Al-Si alloy. *Materials Today: Proceedings*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.544>.
 12. Karantzalis A.E., Lekatou A., Georgatis E., Poulas V., Mavros H. Microstructural Observations in a Cast Al-Si-Cu/TiC Composite. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2010;19 (4):585–590. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9505-8>.
 13. Zhang M, Huo Y., Ma L., Huang B., Hu Q. In Situ TiC Ceramic Particles Locally Reinforced Al-Si Matrix Composites Prepared by SHS-Casting Method from the Al-Si-Ti-C System. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2013;11(4):723–731. <https://doi.org/10.1111/ijac.12097>.
 14. Guo R.-F., Wang Y., Ma Y.-H., Shen P. Role of Si in the wetting of TiC by Al. *Journal of Materials Science*. 2020;2. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05496-4>.
 15. López V.H., Scoles A., Kennedy A.R. The thermal stability of TiC particles in an Al 7 wt. % Si alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2002;356(1–2):316–325. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(03\)00143-6](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(03)00143-6).
 16. Xia F., Liang M. X., Gao X. S., Guo Y. C., Li J. P., Yang W., Zhang Z. K. Instability of in situ TiC particles in an Al-12Si. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):11361–11369. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.063>.
 17. Ding H., Liu X. Influence of Si on stability of TiC in Al melts. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011;21(7):1465–1472. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(11\)60882-0](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(11)60882-0).
 18. Luts A.R., Sherina Yu.V., Amosov A.P., Minakov E.A., Ibatullin I.D. Selection of heat treatment and study of its influence on the structure and properties of composite material AK10M2N-10%TiC obtained by the SHS method in the melt. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2024;30(2):30–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-30-43>
 19. Sherina Yu.V., Luts A.R., Ibatullin I.D. Development of a composite material based on the AK10M2N alloy and study of its tribotechnical properties. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2022;2(128):11–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-2-11-16>

20. Rybakov A.D. *Application of various forms of carbon for SHS of highly dispersed titanium carbide in the melt in the production of aluminum matrix composite materials*. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. Samara, 2021:18. (In Russ.).
21. Amosov A.P., Latukhin E.I., Umerov E.R. Application of infiltration and self-propagating high-temperature synthesis processes to produce cermets: review. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2021;27(6):52–75.
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-6-52-75>
22. Sherina Yu.V. *Effect of reinforcement with highly dispersed phase of titanium carbide synthesized in the melt and heat treatment on the structure and properties of industrial aluminum alloys*. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. Samara, 2024:20. (In Russ.).
23. Sherina Yu.V., Luts A.R. The influence of heat treatment on the properties of composite materials AMg2 – 10 % TiC and AMg6 – 10 % TiC obtained by the method of self-propagating high-temperature synthesis. *FrontierMaterials&Technologies*. 2024;1:105–112.
<https://doi.org/10.18323/2782-4039-2024-1-67-10>
24. Sherina Yu.V. Study of the influence of the addition of highly dispersed phase of titanium carbide synthesized in the melt and heat treatment on the structure and properties of the alloy AM4, 5Kd. *Transportnoe mashinostroenie*. 2024;3:59–59.
<https://doi.org/10.30987/2782-5957-2024-3-59-69>
25. Vishnuvardhan Reddy D., Salonica Sravani P., Deepthi N. The investigation of mechanical and metallurgical properties on Al7075-TiC-SiC reinforced hybrid composites by stir casting. *International Journal of Mechanical and Production*, 2019;9:769–776.
<https://doi.org/10.24247/ijmperdapr201976>
26. Kachenyuk M.N., Smetkin A.A., Andrakovskaya K.E. The influence of mechanical activation and consolidation conditions on the formation of Ti₃SiC₂/TiC composite material. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014;2.

Сведения об авторах:

Юлия Владимировна Шерина, аспирант кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов, Самарский государственный технический университет

E-mail: yulya.makhonina.97@inbox.ru
ORCID: 0000-0002-5451-7107

Альфия Расимовна Луц, к.т.н., доцент кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов, Самарский государственный технический университет
E-mail: alya_luts@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7889-9931

Дмитрий Васильевич Закамов, к.т.н., доцент кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов, Самарский государственный технический университет
E-mail: zeus65@mail.ru
ORCID: 0000-0001-9520-5671

Information about the authors:

Yulia V. Sherina, postgraduate student of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, Samara State Technical University
E-mail: yulya.makhonina.97@inbox.ru
ORCID: 0000-0002-5451-7107

Alfiya R. Luts, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, Samara State Technical University
E-mail: alya_luts@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7889-9931

Dmitriy V. Zakamov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, Samara State Technical University
E-mail: zeus65@mail.ru
ORCID: 0000-0001-9520-5671

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 29.08.2024
После доработки 17.10.2024
Принята к публикации 23.10.2024

Received 29.08.2024
Revised 17.10.2024
Accepted 23.10.2024

Оригинальная статья

УДК 539.21

DOI: 10.57070/2304-4497-2021-1(51)-35-42

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ В ЖИДКОСТЯХ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МОДЕЛИ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

© 2025 г. Н. М. Игнатенко, А. А. Солдатов, Н. Ю. Ершов, Л. П. Петрова

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

Аннотация. Приведены результаты литературно-аналитического обзора работ, связанных с процессом кластеризации в жидкостях (образования устойчивых групп молекул (кластеров) под воздействием межмолекулярных сил). Рассматриваемые жидкости можно назвать наноструктурированными. Кластерная модель играет важную роль в описании физических и микроструктурных свойств жидкостей, в том числе теплоемкости, вязкости и сжимаемости. Кластеры могут значительно влиять на процессы в жидкостях, особенно вблизи критических точек. Рассмотрены теоретические аспекты кластерной модели, методы ее исследования и практическое применение в различных областях науки и техники. Одним из ключевых направлений исследований является изучение влияния внешних факторов (электрические и магнитные поля, температура, давление и другие) на формирование и развитие кластеров в жидкостях. Эти воздействия существенно изменяют их структуру, размеры и временные характеристики. Исследования показали, что переменные электрические поля могут вызывать динамические колебания плотности кластеров, что оказывает влияние на их оптические и диэлектрические свойства. Результаты подобных экспериментов открывают широкие перспективы для создания жидкостей с регулируемыми характеристиками (электропроводящие или магнитные жидкости). Эти материалы находят применение в устройствах новой генерации, например, в умных системах управления или адаптивной оптике.

Ключевые слова: кластеризация в жидкостях, кластерная модель, кластеры, давление, температура, кристаллы, электрические поля, магнитные поля

Для цитирования: Игнатенко Н.М., Солдатов А.А., Ершов Н.Ю., Петрова Л.П. Кластеризация в жидкостях: теоретические основы, модели и практическое применение. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):35–42. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-35-42](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-35-42)

Original article

CLUSTERING IN LIQUIDS: THEORETICAL FOUNDATIONS, MODELS AND PRACTICAL APPLICATION

© 2025 N. M. Ignatenko, A. A. Soldatov, N. Yu. Ershov, L. P. Petrova

Southwest State University (94 50 let Oktyabrya Str., Kursk, 305040, Russian Federation)

Abstract. The results of a literary and analytical review of works related to the clustering process in liquids (formation of stable groups of molecules (clusters)) are presented, under the influence of intermolecular forces). The liquids under consideration can be called nanostructured. The cluster model plays an important role in describing the physical and microstructural properties of liquids, including heat capacity, viscosity, and compressibility. Clusters can significantly affect processes in liquids, especially near critical points. The theoretical aspects of the cluster model, its research methods and practical application in various fields of science and technology are considered. One of the key areas of research is to study the influence of external factors (electric and magnetic fields, temperature, pressure, and others) on the formation and development of clusters in liquids. These impacts significantly change their structure, size, and time characteristics. Studies have shown that alternating electric fields can cause dynamic fluctuations in cluster density, which affects their optical and dielectric properties. The results of such experiments open up broad prospects for creating liquids with controlled characteristics (electrically

conductive or magnetic liquids). These materials are used in new generation devices, for example, in smart control systems or adaptive optics.

Keywords: clustering in liquids, cluster model, clusters, pressure, temperature, crystals, electric fields, magnetic fields

For citation: Ignatenko N.M., Soldatov A.A., Ershov N. Yu., Petrova L.P. Clusterization in liquids: theoretical foundations, models and practical application. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):35–42. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-35-42](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-35-42)

Введение

История исследования кластеров в жидкостях восходит к концу XIX в., когда ученые впервые начали изучать агрегационные процессы в конденсированных средах. В 1939 г. И. Френкель предложил дырочную теорию жидкостей, которая стала основой для современных представлений о кластеризации. С развитием рентгеноструктурного анализа и нейтронографии стало возможным экспериментально подтвердить наличие кластеров в жидкостях. В 1950-х гг. Дж. Бернал заложил основы компьютерного моделирования кластерных систем с использованием модели стальных сфер.

Основой теоретической модели является функция распределения количества частиц в кластерах. Важной характеристикой кластера является средний его размер, который определяется количеством Z .

Распределение кластеров по количеству частиц описывается функцией плотности, имеющей вид Эрлангового распределения:

$$f(Z) = \frac{\lambda^m Z^{m-1} e^{-\lambda Z}}{(m-1)!}, \quad (1)$$

где $Z > 0$; λ – масштабный параметр, который зависит от плотности жидкости и характеризует интенсивность процесса; m – порядок распределения, определяющий форму и параметры функции; Z – количество частиц в кластере.

Среднее количество частиц в кластере \bar{Z} вычисляется по формуле:

$$\bar{Z} = \frac{m}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ может быть определено как отношение плотности жидкости к ее критической плотности:

$$\lambda = \frac{\rho_{кр}}{\rho}, \quad (3)$$

Наиболее вероятное число частиц Z_{mode} в кластере вычисляется по формуле [1]:

$$Z_{mode} = \frac{m-1}{\lambda}. \quad (4)$$

В работе [2] рассматривается распределение кластеров в простых и органических жидкостях. Для примера расчета возьмем криптон при температуре $T = 117$ К и плотности $\rho = 2442$ кг/м³, критическое значение плотности $\rho_{кр} = 911$ кг/м³:

$$\lambda = \frac{911}{2442} = 0,373. \quad (5)$$

Подставляя полученное значение в уравнение для величин \bar{Z} и Z_{mode} , получим:

$$\bar{Z} = \frac{4}{0,373} \approx 10,72 \quad Z_{mode} = \frac{3}{0,373} \approx 8,04$$

Таким образом, среднее число частиц в кластере составляет 10,72, а наиболее вероятное 8,04.

В табл. 1 приведены результаты расчетов величин \bar{Z} и Z_{mode} для различных типов жидкостей.

Вклад кластеров в уравнение состояния жидкости можно выразить через изотермическую сжимаемость β_T [3]. Этот параметр характеризует изменение объема жидкости при изменении давления при постоянной температуре. Его расчет может быть представлен следующим уравнением:

$$\beta_T = \alpha \rho \left(\frac{RT}{M} \right) + B, \quad (6)$$

где α – коэффициент, отражающий степень ассоциации молекул в кластере и определяющий их склонность объединяться в стабильные группы; R – универсальная газовая постоянная; M – молярная масса вещества; B – эмпирическая или теоретическая добавки, учитывающие дополнительные взаимодействия между молекулами; ρ – плотность жидкости; T – абсолютная температура.

Это уравнение позволяет описывать макроскопические свойства жидкостей с учетом образования кластеров и является важным инструментом для

Результаты расчетов величин \bar{Z} и Z_{mode} для различных типов жидкостейTable 1. Calculation results \bar{Z} и Z_{mode} for different types of liquids

Жидкость	T , К	$\rho_{кр}$, кг/м ³	\bar{Z}	Z_{mode}	Z_1
Аргон	85	1407	10,5	7,9	8,9
Неон	25	1240	10,3	7,7	8,5
Криптон	117	2442	10,7	8,1	8,5

Пр и м е ч а н и е: Z_1 – это среднее число ближайших соседей у входящих в состав кластера частиц.

прогнозирования фазовых переходов и других явлений в жидкостях.

Ключевую роль в исследовании кластерных систем играют экспериментальные методы. К наиболее часто используемым методам относятся рентгеноструктурный анализ, нейтронография и молекулярная динамика.

Рентгеноструктурный анализ позволяет изучать координационные числа и радиальные функции распределения молекул $g(r)$. В свою очередь рассматриваемые функции описывают взаимосвязь (корреляцию) между частицами в системе [4]. На рис. 1 представлена радиальная функция распределения для жидкого аргона при температуре 85 К.

Молекулярная динамика используется для моделирования взаимодействий между частицами в жидкости в наномасштабе с учетом межмолекулярного (ван-дер-ваальсова) взаимодействия.

Этот метод позволяет подробно изучить процессы образования и разрушения кластеров, а также предсказать их влияние на макроскопические свойства жидкости. Однако на вопрос о тонкой структуре кластера, о роли эффекта Ефимова [5] молекулярная динамика в настоящее время не дает четкого ответа и вопрос о формировании кластеров остается дискуссионным.

Кластерные модели [6] успешно используются во многих сферах науки и промышленности благодаря их способности описывать сложные системы [7] и процессы [8], которые применяют в следующих областях:

1. Нефтехимическая промышленность – модели позволяют детально исследовать фазовые переходы углеводородов, а также предсказывать их физико-химические свойства при изменении внешних условий (температура и давление). Это особенно важно для оптимизации технологических

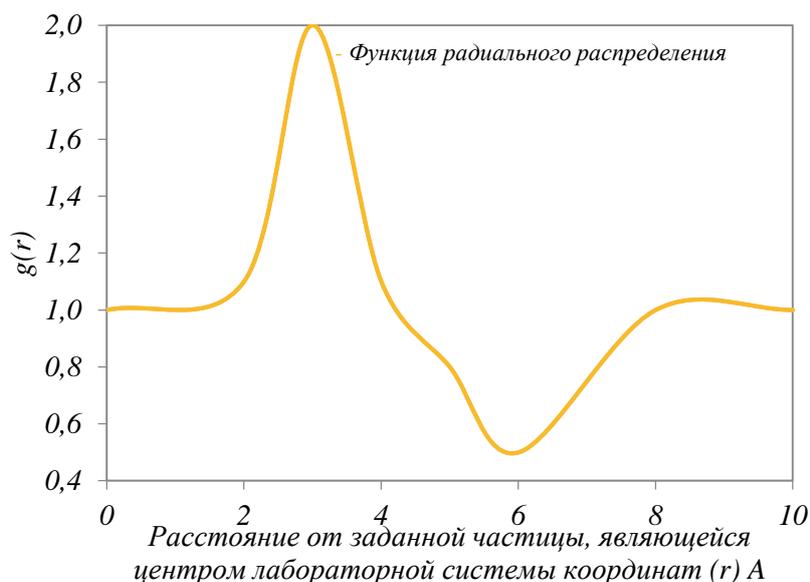


Рис. 1. Радиальная функция распределения для аргона при температуре 85 К
Fig. 1. Radial distribution function for argon at 85 К

процессов, связанных с добычей, переработкой и транспортировкой нефти и газа [9].

2. Биофизика – анализ поведения биологических жидкостей (крови или плазмы) невозможен без учета кластеризации [10]. Эти исследования имеют большое значение для медицинской диагностики и разработки новых методов лечения [11].

3. Материаловедение – в области нанотехнологий кластерные модели используются для проектирования материалов с заданными характеристиками (повышенная прочность, теплоустойчивость или электрическая проводимость).

В последние годы наблюдается значительное расширение исследовательского интереса к поведению жидкостей в экстремальных условиях, включая сверхвысокие температуры, давления и воздействие внешних полей. Особое внимание уделяется наноструктурированным жидкостям, где формируются кластеры с уникальными характеристиками. Современные методы (молекулярная динамика) позволяют не только моделировать подобные системы, но и выявлять новые закономерности в их поведении. Применение технологий машинного обучения упрощает обработку данных и ускоряет поиск решений.

Одним из ключевых направлений исследований является изучение влияния внешних факторов (электрические и магнитные поля) на формирование и развитие кластеров в жидкостях [12]. Эти воздействия существенно изменяют их структуру, размеры и временные характеристики.

В жидких кристаллах под действием электрических полей наблюдается упорядочение ориентации молекул, что приводит к изменениям в плотности, форме и геометрии кластеров.

Исследования показали, что переменные электрические поля могут вызывать динамические колебания плотности кластеров, что оказывает влияние на их оптические и диэлектрические свойства.

Результаты подобных экспериментов открывают широкие перспективы для создания жидкостей с регулируемыми характеристиками (электропроводящие или магнитные жидкости). Эти материалы находят применение в устройствах новой генерации, например, в умных системах управления или адаптивной оптике.

В настоящей работе было проведено теоретическое исследование структурных перестроек жидких аренов с позиции кластерной модели строения жидкостей с использованием методов статистической термодинамики и ИК-спектроскопии [13].

Полученные в ходе вычислений колебательные и либрационные частоты димеров представлены в табл. 2.

Жидкие металлы (ртуть, галлий и другие) [14; 15] представляют собой сложные системы, в которых кластеры формируются благодаря сильным межатомным взаимодействиям. Для их описания часто используется модель Линнарда-Джонса, которая эффективно описывает взаимодействия между атомами в условиях высоких температур и давления. Например, исследования жидкого галлия продемонстрировали, что при температуре, близкой к точке плавления, атомы в кластерах образуют упорядоченные структуры, похожие на твердые тела. Это уникальное поведение наблюдается даже при значительных температурных флуктуациях, что указывает на высокую стабильность подобных систем.

Важным инструментом для изучения динамических характеристик кластеров является метод комбинационного рассеяния света [16]. С его помощью можно анализировать временные корреляции в движении молекул, а также исследовать процессы образования, распада и рекомбинации кластеров.

В ходе одного из экспериментов проводили анализ кластеров в углеводородных жидкостях. Полученные данные показали, что малые кластеры, состоящие из 3 – 10 молекул, имеют существенно более короткое время жизни по сравнению с крупными образованиями. Это связано с высокой подвижностью молекул в рассматриваемых кластерах, что делает их более чувствительными к изменениям окружающей среды. Данные исследования находят применение в разработке инновационных видов топлива с улучшенными теплофизическими свойствами. Учет поведения кластеров позволяет повысить эффективность процессов горения и снизить выбросы вредных веществ.

В настоящее время для анализа и прогнозирования поведения кластеров начали активно применяться методы машинного обучения. Последнее позволяет находить корреляции между структурными и термодинамическими параметрами кластеров в жидкостях. Одним из подходов является использование нейронных сетей для предсказания размеров кластеров в зависимости от температуры и плотности жидкости. В одном из недавних исследований была разработана модель машинного обучения для предсказания времени жизни кластеров в жидких углеводородах. Эта модель была обучена на основе данных молекулярно-динамических симуляций и экспериментальных результатов, что позволило значительно улучшить точность прогнозов и ускорить вычисления. Рассматриваемые технологии могут стать основой для создания новых материалов с заданными свойствами.

Колебательные и либрационные частоты димеров
Table 2. Oscillatory and libration frequencies of dimers

Конфигурация димера	ΔH_{dim} , ккал/моль	r , Å	ω_{vib} (расчет по (1)), см ⁻¹	ω_{vib} (эксперимент), см ⁻¹	ϵ_0/k , К	J_{dim} , 10 ⁻⁴⁵ кг·м ²	ω^*_{lib} (расчет по (2)), см ⁻¹	ω^*_{lib} (эксперимент), см ⁻¹
Бензол [2 – 4]								
Sandwich	-1,124	4,03	57,5	60	567	5,86	8,24 14,7	6,0 11
Parallel-displaced	-1,983	4,011	76,8	78	1000	8,79	9,0 16,9	11 21
T-shaped	-1,938	5,137	59,2	61	978	4,48	12,4 22,1	11 21
Толуол [2; 3]								
Параллельная	-3,50	4,89	77,0	81	1768	6,67	19,3 34,5	23 30
Антипараллельная	-4,30	3,40	122,6	118	2167	7,48	20,2 36,0	23 42
Хлорбензол [2]								
Димер 1	-4,92	4,28	94,2	107	2481	10,64	22,8 12,8	23 –
Димер 2	-4,63	4,05	96,7	107	2333	10,28	22,5 12,6	23 –

Отдельно следует отметить работы, посвященные созданию макроскопических бионических роботов [17], и, тесно связанные с ними, исследования по проектированию искусственных мышц [18] на основе жидких металлов [19]. Особенно перспективным для этих целей является эвтектический галлий – индий (EGaIn), поскольку он по своей природе хорошо деформируем и способен генерировать значительную силу и изменение формы посредством стимуляции низким напряжением [20].

Выводы

Полученные результаты теоретических исследований, посвященных процессам кластеризации в жидкостях и особенностям протекания в них физических процессов, в частности результаты

исследований по спектрам ИК-излучения в жидких аренах, находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными. При этом электромагнитное излучение в далекой области ИК-спектра жидкости может быть связано с формированием и развалом кластеров, то есть с энергетической перестройкой кластерных систем.

Современные методы моделирования и экспериментальные данные позволяют глубже изучить рассматриваемый процесс кластеризации и использовать его для прогнозирования поведения жидкостей в самых разных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горлова М.Р. Кластеры в жидкостях. В кн.: *Перспективные материалы науки, технологий и производства. Сборник научных ста-*

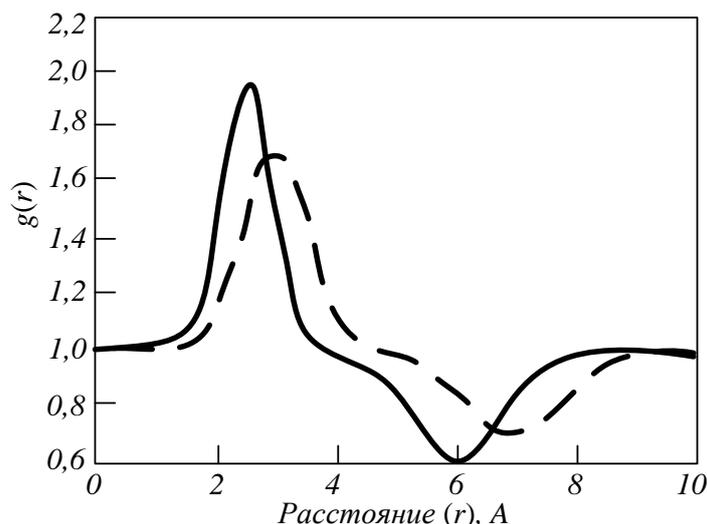


Рис. 2. Моделирование кластеров криптона при изменении температуры [8]:
 — и - - - - - скопления криптона при низкой и высокой температурах
 Fig. 2. Simulation of Krypton clusters under temperature change [8]:
 — and - - - - - krypton accumulations at low and high temperatures

- тей Международной научно-практической конференции. Курск: изд. ЮЗГУ, 2022:81–89.
2. Неручев Ю.А., Рышкова О.С., Радченко А.К., Шкурина В.А. Кластерная структура простой жидкости. В кн.: *Нанотехнологии: образование, наука, инновации. Сборник статей XI Всероссийской научно-практической конференции*. Курск: изд. Курский государственный университет. 2020;11:131–135.
 3. Сабиров Л.М., Исмаилов Ф.Р., Кадилов Ш.А., Каршибаев Ш.Э. Температурные и концентрационные зависимости соотношения Ландау-Плачека в водных растворах γ -пиколина. *Журнал технической физики*. 2020;128(12):1837–1841.
 4. Герман Е.И. *Теплофизические свойства и структурные характеристики аргона в условиях термобарического воздействия по данным компьютерных экспериментов*. Автореф. дисс. к-та. техн. наук. Улан-Удэ. 2023:23.
 5. Мельников Г.А., Игнатенко Н.М., Сучилкин В.В., Громков А.С. Формирование кластерных систем в хаотичных конденсированных средах. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023;13(2):164–176.
 6. Клумов Б.А. Кластеризация дефектов и кристаллитов в двумерной жидкости Юкавы. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2024;120(9):675–680. <https://doi.org/10.31857/S0370274X24110049>
 7. Gao Y., Fang H., Ni K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. *Scientific Reports*. 2021;11(9542). URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-88810-7> (дата обращения: 01.03.2025).
 8. Yu L., Qi X., Liu Y. et al. Transportable, endurable, and recoverable liquid metal powders with mechanical sintering conductivity for flexible electronics and electromagnetic interference shielding. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022;14(42):48150–48160.
 9. Терещенко С.Н., Осипов А.Л., Моисеева Е.Д. Прогнозирование состава широкой фракции легких углеводородов методами машинного обучения при трубопроводной транспортировке. *Автоматрия*. 2022;58(1):104–110.
 10. Павлов А.Н. Исследование реакции кластеров в водной среде на электромагнитное воздействие. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2020;5:72–79.
 11. Dong J., Peng Y., Nie X. etc. Hierarchically designed super-elastic metafabric for thermal-wet comfortable and antibacterial epidermal electrode. *Advanced Functional Materials*. 2022;32(48):2209762–2209774.
 12. Vasco M. Worlitzer, Gil Ariel, Avraham Be'er, Holger Stark, Markus Bär and Sebastian Heidenreich. Turbulence-induced clustering in compressible active fluids. *Soft Matter*. 2021;17(46):10447–10457.
 13. Мельников Г.А., Игнатенко Н.М., Громков А.С., Сучилкин В.В. О структурных превращениях в жидких аренах. В кн.: *Необратимые процессы в природе и технике: XIII Всероссийская конференция (Москва, 28-30 января 2025 года). Сборник статей*. Москва: изд. Московского гос. тех. ун-та имени Н.Э. Баумана, 2025;1:164–167.

14. Guixuan Lu, Erli Ni, Yanyan Jiang, Weikang Wu, Hui Li Room-Temperature Liquid Metals for Flexible Electronic Devices. *Small*. 2024;20(9):e2304147.
15. Kim J.H., Park Y.J., Kim S. etc. Effect of surrounding solvents on interfacial behavior of gallium-based liquid metal droplets. *Materials*. 2022;15(3):706–715. <https://doi.org/10.3390/ma15030706>.
16. Мельников Г.А., Игнатенко Н.М., Петрова Л.П., Громков А.С., Манжос О.А. Исследование комбинационного рассеяния света в жидких аренах и их галогенозамещенных в низкочастотной области спектра. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2024;14(1):88–103. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-88-103>
17. Zhao J., Li H., Bi X. etc. Rapidly reversible discoloration of liquid metal by contact or separation. *Materials Chemistry and Physics*. 2022;291:126726. <https://doi.org/10.1016/j.matchphys.2022.126726>
18. Shu J., Ge D.A., Wang E., Ren H., Cole T., Tang S.Y., Li X., Zhou X., Li R., Jin H., Li W., Dickey M.D., Zhang S. A Liquid Metal Artificial Muscle. *Adv Mater*. 2021;33(43):e2103062.
19. Tao Y., Han F., Shi C. et al. Liquid Metal-Based Flexible and Wearable Sensor for Functional Human – Machine Interface. *Micromachines*. 2022;13(9):1429–1443.
20. Liao J., Majidi C. Muscle-Inspired Linear Actuators by Electrochemical Oxidation of Liquid Metal Bridges. *Advanced Science*. 2022;9(26). URL: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/advs.202201963> (дата обращения: 01.03.2025).
4. German E.I. *Thermophysical properties and structural characteristics of argon under thermobaric conditions according to computer experiments*. Avtoref. diss. k-ta. tekhn. nauk. Ulan-Ude. 2023:23. (In Russ.).
5. Mel'nikov G.A., Ignatenko N.M., Suchilkin V.V., Gromkov A.S. Formation of cluster systems in chaotic condensed media. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2023;13(2):164–176. (In Russ.).
6. Klumov B.A. Clusterization of defects and crystallites in a two-dimensional Yukawa liquid. *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*. 2024;120(9):675–680. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0370274X24110049>
7. Gao Y., Fang H., Ni K. A hierarchical clustering method of hydrogen bond networks in liquid water undergoing shear flow. *Scientific Reports*. 2021;11(9542). URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-88810-7> (accessed: 01.03.2025).
8. Yu L., Qi X., Liu Y. et al. Transportable, endurable, and recoverable liquid metal powders with mechanical sintering conductivity for flexible electronics and electromagnetic interference shielding. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022;14(42):48150–48160.
9. Tereshchenko S.N., Osipov A.L., Moiseeva E.D. Forecasting the composition of a wide fraction of light hydrocarbons by machine learning methods in pipeline transportation. *Avtometriya*. 2022;58(1):104–110. (In Russ.).
10. Pavlov A.N. Investigation of the reaction of clusters in the aquatic environment to electromagnetic effects. *Biomeditsinskaya radioelektronika*. 2020;5:72–79. (In Russ.).
11. Dong J., Peng Y., Nie X. etc. Hierarchically designed super-elastic metafabric for thermal-wet comfortable and antibacterial epidermal electrode. *Advanced Functional Materials*. 2022;32(48):2209762–2209774.
12. Vasco M. Worlitzer, Gil Ariel, Avraham Be'er, Holger Stark, Markus Bär and Sebastian Heidenreich. Turbulence-induced clustering in compressible active fluids. *Soft Matter*. 2021;17(46):10447–10457.
13. Mel'nikov G.A., Ignatenko N.M., Gromkov A.S., Suchilkin V.V. On structural transformations in liquid arenas. In: *Irreversible Processes in Nature and Technology: The XIII All-Russian Scientific and Practical Conference (Moscow, January 28-30, 2025)*. Collection of articles. Moscow: izd. Moskovskogo gos. tekhn. un-ta imeni N.E. Bauman, 2025;1:164–167. (In Russ.).
14. Guixuan Lu, Erli Ni, Yanyan Jiang, Weikang Wu, Hui Li Room-Temperature Liquid Metals for

REFERENCES

1. Gorlova M.R. Clusters in liquids. In: *Advanced Materials of Science, Technology and Production. Collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference*. Kursk: izd. YuZGU, 2022:81–89. (In Russ.).
2. Neruchev Yu.A., Ryshkova O.S., Radchenko A.K., Shkurina V.A. Cluster structure of a simple liquid. In: *Nanotechnology: education, Science, Innovation. Collection of articles of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference*. Kursk: izd. Kurskii gosudarstvennyi universitet. 2020;11:131–135. (In Russ.).
3. Sabirov L.M., Ismailov F.R., Kadirov Sh.A., Karshibaev Sh.E. Temperature and concentration dependences of the Landau-Placzek ratio in aqueous solutions of γ -picoline. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2020;128(12):1837–1841. (In Russ.).

- Flexible Electronic Devices. *Small*. 2024;20(9):e2304147.
15. Kim J.H., Park Y.J., Kim S. etc. Effect of surrounding solvents on interfacial behavior of gallium-based liquid metal droplets. *Materials*. 2022;15(3):706–715.
<https://doi.org/10.3390/ma15030706>.
 16. Mel'nikov G.A., Ignatenko N.M., Petrova L.P., Gromkov A.S., Manzhos O.A. Investigation of raman scattering of light in liquid arenes and their halogenated ones in the low-frequency range of the spectrum. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudar-stvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2024;14(1):88–103. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-1-88-103>
 17. Zhao J., Li H., Bi X. etc. Rapidly reversible discoloration of liquid metal by contact or separation. *Materials Chemistry and Physics*. 2022;291:126726.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126726>
 18. Shu J., Ge D.A., Wang E., Ren H., Cole T., Tang S.Y., Li X., Zhou X., Li R., Jin H., Li W., Dickey M.D., Zhang S. A Liquid Metal Artificial Muscle. *Adv Mater*. 2021;33(43):e2103062.
 19. Tao Y., Han F., Shi C. et al. Liquid Metal-Based Flexible and Wearable Sensor for Functional Human – Machine Interface. *Micromachines*. 2022;13(9):1429–1443.
 20. Liao J., Majidi C. Muscle-Inspired Linear Actuators by Electrochemical Oxidation of Liquid Metal Bridges. *Advanced Science*. 2022;9(26).
URL: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/advs.202201963> (accessed: 01.03.2025).

Сведения об авторах

Николай Михайлович Игнатенко, д.ф.-м.н., профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет

E-mail: inmkstu@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2807-9887

SPIN-код: 3931-5320

Андрей Александрович Солдатов, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет

E-mail: soldatovandal@gmail.com

ORCID: 0009-0003-1108-8511

Николай Юрьевич Еришов, студент кафедры финансов и кредита, Юго-Западный государственный университет

E-mail: kolia.04071@yandex.ru

ORCID: 0009-0008-5169-4213

SPIN-код: 8238-2385

Людмила Павловна Петрова, к.ф.-м.н., доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет

E-mail: luci78@mail.ru

ORCID: 0009-0007-8883-5983

SPIN-код: 7656-4073

Information about the author:

Nikolay M. Ignatenko, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University

E-mail: inmkstu@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2807-9887

SPIN-код: 3931-5320

Andrey A. Soldatov, postgraduate student at the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University

E-mail: soldatovandal@gmail.com

ORCID: 0009-0003-1108-8511

Nikolay Yu. Yershov, student at the Department of Finance and Credit, Southwest State University

E-mail: kolia.04071@yandex.ru

Lyudmila P. Petrova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University

E-mail: luci78@mail.ru

ORCID: 0009-0007-8883-5983

SPIN-код: 7656-4073

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.02.2025

После доработки 24.02.2025

Принята к публикации 04.03.2025

Received 10.02.2025

Revised 24.02.2025

Accepted 04.03.2025

Original article

UDC 621.791.92:621.727:620.178

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-43-50

MODIFICATION OF TRANSITION ZONE STRUCTURE OF HIGH-SPEED STEEL SURFACING – SUBSTRATE BY ELECTRON-BEAM TREATMENT

© 2025 V. E. Gromov¹, Yu. F. Ivanov², A. B. Yuryev¹, S. S. Minenko¹, S. V. Konovalov¹

¹Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

²Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

Abstract. The structural-phase states and defect substructure of transition zone of plasma surfacing with non-current flux-cored wire in the nitrogen medium of R2M9 high-speed steel on the substrate of medium-carbon steel 30HGSA in the initial state, after high-temperature tempering and electron beam treatment were analyzed using scanning and transmission electron microscopy. The formed deposited layer with a thickness of ~5 mm has a frame-type carbide structure, which is not fractured during subsequent tempering and pulsed electron beams irradiation. Regardless of the state of the studied material, a martensitic structure with retained austenite, located along the boundaries of martensite plates and in the form of individual grains of submicron sizes, is formed in the “deposited layer – substrate” transition zone. Nanosized particles of the carbide phase of various morphologies (plates, globules, spheres), located along the grain boundaries of martensite crystals and austenite layers, were identified in the transition zone. Carbides Fe₃C, V₂C, W₂C, CrC, Cr₃₂C₂, Cr₇C₃, MoC, Mo₂C, as well as carbides such as Fe₃W₃C and Fe₆W₆C, the elemental composition of which is determined by the complex composition of the surfacing, were identified. Irradiation of the transition zone with a pulsed electron beam leads to high-speed hardening of the material with the formation of martensite structure of predominantly lamellar morphology. In the volume of martensite plates, particles of chromium carbide of composition CrC were detected.

Keywords: deposited layer, electron microscopy, transition zone, tempering, pulsed electron beam, structure, properties

Acknowledgments. The work was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186>

For citation: Gromov V.E., Ivanov Yu. F., Yuryev A.B., Minenko S.S., Konovalov S.V. Modification of transition zone structure of high-speed steel surfacing – substrate by electron-beam treatment. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):43–50. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-43-50](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-43-50)

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ НАПЛАВКА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ – ПОДЛОЖКА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКОЙ

© 2025 г. В. Е. Громов¹, Ю. Ф. Иванов², А. Б. Юрьев¹, С. С. Миненко¹, С. В. Коновалов¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет (654006, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

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

Аннотация. С помощью сканирующей просвечивающей электронной микроскопии проведен анализ структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры переходной зоны плазменной наплавки нетокопроводящей порошковой проволокой в среде азота быстрорежущей стали марки Р2М9 на подложке из среднеуглеродистой стали марки 30ХГСА в исходном состоянии, после высокотемпературного отпуска и электронно-лучевой обработки. Сформированный наплавленный слой толщиной примерно 5 мм имеет

каркасную карбидную структуру, которая не разрушается при последующих отпусках и облучении импульсными электронными пучками. Независимо от состояния исследуемого материала в переходной зоне наплавленный слой – подложка формируется мартенситная структура с остаточным аустенитом, расположенным по границам мартенситных пластин в виде отдельных зерен субмикронных размеров. В переходной зоне выявлены наноразмерные частицы карбидной фазы различной морфологии (пластины, глобулы, сферы), расположенные по границам зерен мартенситных кристаллов и аустенитных прослоек. Выявлены карбиды Fe_3C , V_2C , W_2C , CrC , $Cr_{32}C_2$, Cr_7C_3 , MoC , Mo_2C , Fe_3W_3C и Fe_6W_6C , элементный состав которых определяется сложным составом наплавки. Облучение переходной зоны импульсным электронным пучком приводит к высокоскоростному упрочнению материала с образованием мартенситной структуры преимущественно пластинчатой морфологии. В объеме мартенситных пластин обнаружены частицы карбида хрома CrC .

Ключевые слова: наплавленный слой, электронная микроскопия, переходная зона, отпуск, импульсный электронный пучок, структура, свойства

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186>

Для цитирования: Громов В.Е., Иванов Ю. Ф., Юрьев А.Б., Миненко С.С., Коновалов С.В. Модификация структуры переходной зоны наплавка из быстрорежущей стали – подложка электронно-лучевой обработкой. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):43–50. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-43-50](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-43-50)

Introduction

Reliability and durability of the working surfaces of equipment and mechanisms are determined mainly by the quality of their protection against wear and corrosion. The most common causes of premature failure of machine and equipment parts are abrasive and impact-abrasive wear, cavitation, corrosion, and fatigue processes. This problem is solved by controlled changes in the properties of working surfaces through surfacing that provides the required set of properties [1 – 4]. Development of coatings with improved performance characteristics under extreme conditions is a fundamental task of great economic importance [5 – 7].

High performance properties of deposited high-speed steels (HSS) are achieved by special alloying and complex heat treatment, which ensures a certain phase composition [8 – 12]. High hardness and wear resistance of high-speed steels are due to their alloying with carbide-forming elements: tungsten, vanadium, molybdenum and chromium. These elements, under certain temperature and time conditions, form particles of the carbide phase in steel, which are the strengthening phase of the material [13].

Recent research and development in the field of plasma surface technology with high-speed steels indicate that its application most fully meets the requirements of industry both in terms of the level of properties achieved and in terms of economic efficiency [1; 2]. Plasma surfacing is used not only for the repair and restoration of worn-out equipment, but also for imparting special properties to the surfaces of new products before they are put into operation. The properties of the selected surfacing material will

be the main factor providing the required parameters of the hardened surface.

The use of a shielding and alloying medium of nitrogen during plasma surface treatment, which has significant advantages over other methods, substantially improves abrasive wear resistance, corrosion and impact resistance, and strength due to the formation of carbonitrides with increased microhardness [14; 15]. Plasma surfacing in the nitrogen medium with a non-current-carrying flux-cored wire leads to the production of deposited high-speed steels alloyed with nitrogen and aluminum, which increases their hardness and wear resistance and reduces the cost of surfacing [1; 14; 15]. Improvement of tribological and mechanical properties and the quality of the deposited surface layer can be achieved by electron beam treatment [16 – 20]. It provides good damping properties under mechanical and thermal loads and prevents the premature initiation of brittle microcracks.

The analysis of related literature published in Russia and abroad shows that there are very few studies devoted to the physical nature and formation mechanisms of transition zone structure of HSSs surfacing-substrate using transmission electron microscopy [1; 20].

The purpose of this work is to analyze the results obtained from studying the transition zone structure of the layer deposited on 30HGSA steel with PP-R2M9 flux-cored wire and subjected to high-temperature tempering and electron beam treatment.

Materials and methods

The deposited material was investigated in three states: firstly, after the formation of the deposited

layer (hereinafter referred to as the initial state), secondly, after three temperings of samples in the initial state, and thirdly, after three temperings and additional irradiation with a pulsed electron beam.

The samples for research were produced by plasma surfacing using R2M9Yu non-current-carrying flux-cored wire on 30HGSA steel in the nitrogen medium. Chemical composition of 30HGSA steel, % (by weight): 0.3 C; 0.9 Cr; 0.8 Mn; 0.9 Si. Chemical composition of R2M9Yu alloy, % (by weight): 0.86 C; 4.80 Cr; 2.50 W, 9.4 Mo; 0.50 V; 0.85 Al; 0.08 N; the rest is iron. Plasma surfacing modes did not differ from those described in [1; 2; 15]. Some samples of 30HGSA steel with a deposited layer of R2M9 alloy were subjected to high-temperature tempering at a heating temperature of 580 °C, holding time – 1 hour, number of temperings – 3. After tempering, part of the samples was subjected to additional irradiation with a pulsed electron beam. Pulsed electron beam treatment was carried out on the SOLO installation (IHCE SB RAS) [19; 20] with the following parameters: energy of accelerated electrons – 18 keV; electron beam energy density – 30 J/cm², exposure pulse duration – 50 μs, pulse repetition frequency – 0.3 s⁻¹, number of pulses – 5; irradiation was carried out at a residual gas pressure (argon) in the working chamber of the installation – 0.02 Pa.

Studies of the transition zone structure of the deposited layer were performed using scanning (KYKY-EM6900 device equipped with an AZtec Live Lite Xplore 30 EDS energy-dispersive microanalysis system) and transmission diffraction (JEM2100 device) electron microscopy [21 – 23]. The phase composition and state of the crystal lattice

of the phases were studied by X-ray diffraction analysis (DRON-8N X-ray diffraction meter).

Results and discussion

Plasma surfacing in the nitrogen medium with R2M9Yu non-current-carrying flux-cored wire on 30HGSA steel led to the formation of a layer with a thickness of 5 mm. The deposited layer has a frame-type carbide structure formed by grains of two dimensional levels. The grains of the first level have sizes varying within the range of 15 – 35 μm. The grain sizes of the second level vary within the range of 3.5 – 11.0 μm.

It was found that the transition zone has a martensitic structure (Fig. 1, *a*). Along the boundaries of the martensite plates there are extended layers of retained austenite (Fig. 1, *c*).

The transition zone structure contains particles of the second phase. Particles of the second phase are characterized by a variety of shapes (plates, globules, spheres), sizes (from 2 to 60 nm), location (dislocations, grain boundaries, martensite crystals and layers of retained austenite).

Dark-field analysis with subsequent indexing of microelectron diffraction patterns showed that nano-sized particles formed on dislocations are vanadium carbide (Fig. 2, *c*, particles are indicated by dotted arrows); the particles located at the boundaries of the martensite plates are molybdenum and tungsten carbides (Fig. 2, *d*, particles are indicated by arrows). It should be noted that there are grains of retained austenite in the structure of the transition zone (Fig. 2, *a*, *c*; grains of retained austenite are indicated by arrows). A twin structure is almost always observed in the bulk of austenite grains, which indicates a low value of the γ -phase stacking fault energy.

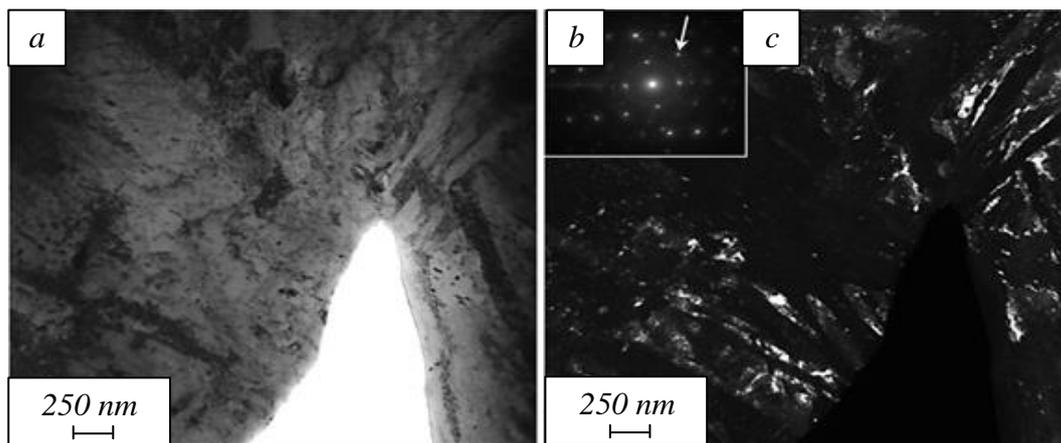


Fig. 1. EM image of the transition zone structure in the state after surfacing (initial state): *a* – bright field; *b* – microelectron diffraction pattern; *c* – dark field obtained in the reflection [022] γ -Fe (the reflection is indicated by the arrow in *b*)

Рис. 1. ЭМ-изображение структуры переходной зоны в состоянии после наплавки (исходное состояние): *a* – светлое поле; *b* – микроэлектронная дифракционная картина; *c* – темное поле, полученное в рефлексе [022] γ -Fe (рефлекс указан стрелкой на поз. *b*)

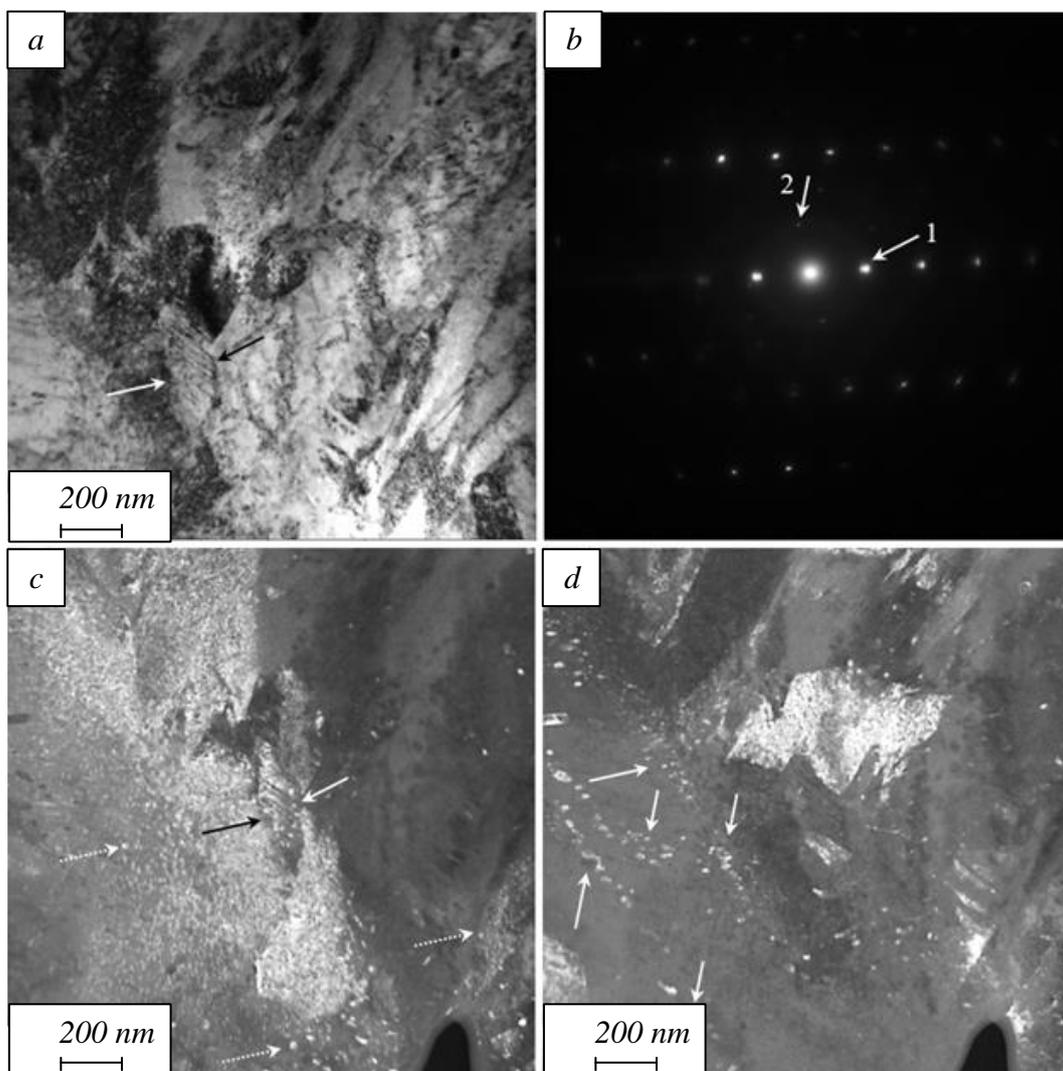


Fig. 2. EM image of the transition zone structure in the state after surfacing (initial state):

a – bright field; *b* – microelectron diffraction pattern; *c* and *d* – dark fields obtained in the reflections $[110] \alpha\text{-Fe} + [002] \gamma\text{-Fe} + [012] \text{V}_2\text{C}$ and $[110] \alpha\text{-Fe} + [103] \text{MoC} + [101] \text{W}_2\text{C}$, in (*b*) the arrows indicate the reflections in which dark fields were obtained for *c* (1), for *g* (2)

Рис. 2. ЭМ-изображение структуры переходной зоны в состоянии после наплавки (исходное состояние):

a – светлое поле; *b* – микроэлектронная дифракционная картина; *c* и *d* – темные поля, полученные в рефлексах $[110] \alpha\text{-Fe} + [002] \gamma\text{-Fe} + [012] \text{V}_2\text{C}$ и $[110] \alpha\text{-Fe} + [103] \text{MoC} + [101] \text{W}_2\text{C}$ (на поз. *b* стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля для поз. *c* (1), для поз. *g* (2))

Three high-temperature temperings of steel samples with a deposited layer did not lead to a significant change in the morphology of particles of the carbide phase in the transition zone. As in the initial state, particles of spherical, globular and lamellar shapes are observed in the structure of the transition zone after tempering. The sizes of globular particles vary within a range of up to 100 nm; spherical particles – within a few nanometers.

Analysis of the microelectron diffraction patterns and corresponding dark-field images shows that the particles are chromium-based carbides of the composition Cr_3C_2 and Cr_7C_3 , molybdenum (MoC and Mo_2C), iron (Fe_3C) and multi-element carbides of the type $M_6\text{C}$ (Fe, W) $_6\text{C}$.

It should be noted that nano-sized or submicron carbide particles are formed in the transition zone as

a result of high-temperature tempering of regions with a relatively high density. This fact obviously indicates a non-uniform distribution of chemical elements in the deposited layer, which is clearly revealed when the material is tempered as a result of supersaturated solid solution decomposition with the formation of second-phase particles.

Irradiation of the transition zone with a pulsed electron beam leads to high-speed hardening of the material with the formation of martensite structure of predominantly lamellar morphology (Fig. 3). In the volume of martensite plates, particles of chromium carbide of composition CrC were detected (Fig. 3, *b*). Along with chromium carbides, globular carbides of complex elemental composition $M_{12}\text{C}$ ($\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$) were identified in the studied layer (Fig. 4)

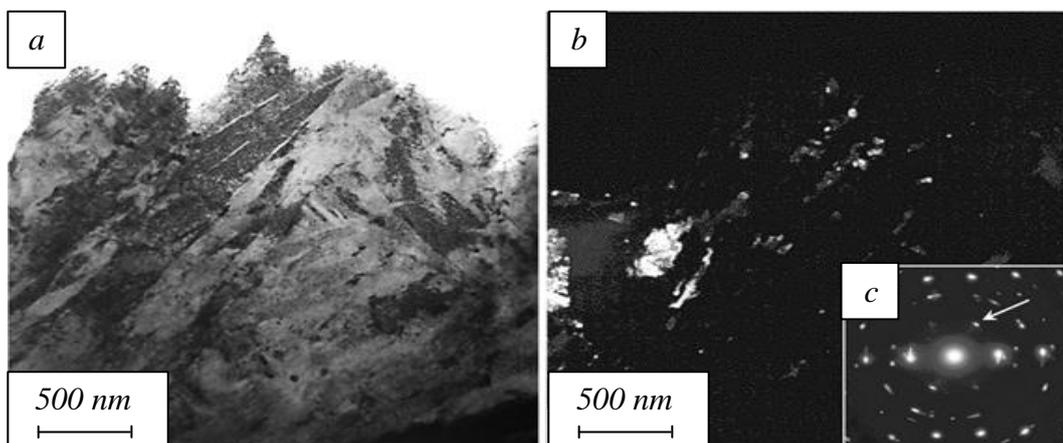


Fig. 3. EM image of the martensitic structure of the transition zone in the state after repeated high-temperature temperings and subsequent irradiation with a pulsed electron beam:

a – bright field; *b* – dark field obtained in reflections $[110] \alpha\text{-Fe} + [002] \text{CrC}$; *c* – microelectron diffraction pattern (the arrow indicates the reflection in which the dark field was obtained)

Рис. 3. ЭМ-изображение мартенситной структуры переходной зоны после многократных высокотемпературных отпусков и последующего облучения импульсным электронным пучком:

a – светлое поле; *b* – темное поле, полученное в рефлексах $[110] \alpha\text{-Fe} + [002] \text{CrC}$; *c* – микроэлектронграмма (стрелкой показано отражение, в котором получено темное поле)

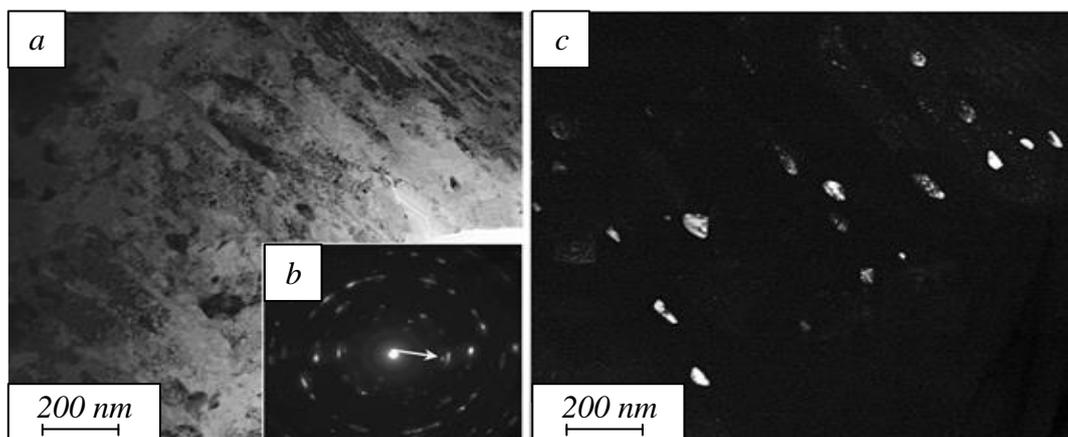


Fig. 4. EM image of the martensitic structure in the transition zone in the state after repeated high-temperature temperings and subsequent pulsed electron beam irradiation:

a – bright field; *b* – microelectron diffraction pattern (the arrow indicates the reflection in which the dark field was obtained); *c* – dark field obtained in the $[422] \text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$ reflection

Рис. 4. ЭМ-изображение мартенситной структуры в переходной зоне после многократных высокотемпературных отпусков и последующего облучения импульсным электронным пучком:

a – светлое поле; *b* – микроэлектронная дифракционная картина (стрелкой указано отражение, в котором получено темное поле); *c* – темное поле, полученное в отражении $[422] \text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$

Conclusion

Plasma surfacing in the nitrogen medium with a non-current-carrying flux-cored wire PP-R2M9Yu on 30HGSA steel formed a layer with a thickness of 4.5 – 5.0 mm having a frame-type carbide structure. It was shown that additional heat treatment (repeated temperings, pulsed electron beam irradiation) does not result in a fracture of this structure.

It is shown that, regardless of the state of the studied material, a lamellar-type martensitic structure is formed in the transition zone. Along with martensite (a solid solution based on the bcc crystal lattice of iron), the transition zone contains residual austenite (a solid solution based on the fcc crystal lattice of iron) located in the form of extended layers along the

boundaries of martensite plates and in the form of separately located grains of submicron and micron sizes. It was established that the transition zone is characterized by the presence of a large number of particles of the carbide phase with various morphologies (plates, globules, spheres) and sizes (from units to tens of nanometers). The particles are located along the boundaries of grains, martensite crystals and austenite layers, in the volume of martensite plates on dislocations. The elemental composition of carbide phase particles is diverse: carbides based on iron (Fe_3C), vanadium (V_2C), tungsten (W_2C), chromium (CrC , Cr_3C_2 , and Cr_7C_3), molybdenum (MoC and Mo_2C), carbides of multi-element composition

type M_6C (Fe_3W_3C) and $M_{12}C$ (Fe_6W_6C) were identified. Obviously, the diverse set of carbide phase is due to the complex elemental composition of the material deposited on the steel.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов В.Е., Чапайкин А.С., Невский С.А. *Структура, свойства и модели быстрорежущей стали после отпуска и электронно-лучевой обработки*. Новокузнецк: Полиграфист, 2024:171.
2. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Потехаев А.И., Гусева Т.П., Чапайкин А.С., Ващук Е.С. Структура и свойства наплавки P18У на быстрорежущую сталь после ее высокого отпуска. *Физический журнал*. 2023 66:731–739. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-02999-w>
3. Нефедьев С.П., Емелюшин А.Н. *Плазменная закалка поверхности*. Старый Оскол: Издательский дом «ТНТ», 2021:156.
4. Мозговой И.В., Шнейдер Е.А. *Наплавка быстрорежущей стали*. Омск: Изд-во «ОмГТУ», 2016:200.
5. Chaus A.S., Pokorný P., Čaplovič L., Sitkevich M.V., Peterka J. Complex fine-scale diffusion coating formed at low temperature on high-speed steel substrate. *Appl Surf Sci*. 2018;437:257–270. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.173>
6. Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. Plasticity of boronized layers. Cham: Springer, 2016:364.
7. Edenhofer B., Joritz D., Rink M., Voges K. Carburing of steels. In: *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Woodhead Publishing, 2015:485–553.
8. Wu W., Chen W., Yang S., Lin Y., Zhang S., Cho T.-Y., Lee G.H., Kwon S.-Ch. *Design of AlCrSiN multilayers and nanocomposite coating for HSS cutting tools*. *Appl Surf Sci*. 2015;351:803–810.
9. Cho I.S., Amanov A., Kim J.D. The effects of AlCrN coating, surface modification and their combination on the tribological properties of high speed steel under dry conditions. *Tribol Int*. 2015;81:61–72. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.08.003>
10. Kottfer D, Ferdinandy M, Kaczmarek L, Maňková I, Beňo J. *Investigation of Ti and Cr based PVD coatings deposited onto HSS Co 5 twist drills*. *Appl Surf Sci*. 2013;282:770–776.
11. Gerth J, Wiklund U. The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel. *Wear*. 2008;264:885–892.
12. Chaus A.S., Rudnitskii F.I. Structure and Properties of Cast Rapidly Cooled High-Speed Steel R6M5. *Metals Science and Thermal Treatment*. 2003;45:157–162.
13. Геллер Ю.А. *Инструментальные стали*. Москва: Металлургия, 1983:527.
14. Нефедьев С.П., Емелюшин А.Н. Влияние азота на формирование структуры и свойств плазменных покрытий типа 10P6M5. *Вестник Югорского государственного университета*. 2021;3(62):33–45.
15. Почетуха В.В., Башенко Л.П., Гостевская А.Н., Будовских Е.А., Громов В.Е., Чапайкин А.С. Структура и свойства плазменных покрытий из быстрорежущей стали после высокотемпературного отпуска. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;3(45):30–38. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-30-38](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-30-38)
16. Громов В.Е., Кобзарева Т.Ю., Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А., Башенко Л.П. Модификация поверхности сплава Ti методом электро-взрывного легирования и электронно-лучевой обработки. В кн.: *Труды конференции АИР*. 2016;1698:030006. <https://doi.org/10.1063/1.4937828>
17. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Глезер А.М., Кормышев В.Е., Коновалов С.В. Электронно-лучевая модификация поверхностного слоя, нанесенного на малоуглеродистую сталь методом дугового напыления. *Известия Российской академии наук: Физика*. 2017;81(1):1353–1359
18. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. *Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменной обработке*. Томск: НТЛ, 2016:298.
19. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхностей металлокерамических и керамических материалов электронными пучками. *Физический журнал*. 2008;51(5):60–70.
20. Иванов Ю.Ф., Чапайкин А.С., Гусева Т.П., Романов Д.А., Громов В.Е. Трансформация структуры и свойств наплавки P18Ю после высокотемпературного отпуска и электронно-лучевой обработки. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2023;3:62–79.
21. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016:196.
22. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer, 2014:717.
23. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016:518.

REFERENCES

1. Gromov V.E., Chapaikin A.S., Nevskii S.A. *Structure, properties and models of high-speed steel after tempering and electron beam treatment*. Novokuznetsk: Polygraphist, 2024:171. (In Russ.).
2. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Potekaev A.I., Guseva T.P., Chapaikin A.S., Vashchuk E.S. Structure and properties of R18U surfacing of high-speed steel after its high tempering. *Russian Physics Journal* 2023;66:731–739. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s11182-023-02999-w>
3. Nefedyev S.P., Emelyushin A.N. *Plasma surface hardening*. Stary Oskol: Publishing house “TNT”, 2021:156. (In Russ.).
4. Mozgovoy I.V., Shneider E.A. *Surfacing of high-speed steel*. Omsk: Publishing house “OmSTU”, 2016:200. (In Russ.).
5. Chaus A.S., Pokorný P., Čaplovič L., Sitkevich M.V., Peterka J. Complex fine-scale diffusion coating formed at low temperature on high-speed steel substrate. *Appl Surf Sci.* 2018;437:257–270. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.173>
6. Krukovich M.G., Prusakov B.A., Sizov I.G. *Plasticity of boronized layers*. Cham: Springer, 2016:364.
7. Edenhofer B., Joritz D., Rink M., Voges K. Carburizing of steels. In: *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Woodhead Publishing, 2015:485–553.
8. Wu W., Chen W., Yang S., Lin Y., Zhang S., Cho T.-Y., Lee G.H., Kwon S.-Ch. Design of AlCrSiN multilayers and nanocomposite coating for HSS cutting tools. *Appl Surf Sci.* 2015;351:803–810.
9. Cho I.S., Amanov A., Kim J.D. The effects of AlCrN coating, surface modification and their combination on the tribological properties of high speed steel under dry conditions. *Tribol Int.* 2015;81:61–72.
10. Kottfer D., Ferdinandy M., Kaczmarek L., Maňková I., Beňo J. Investigation of Ti and Cr based PVD coatings deposited onto HSS Co 5 twist drills. *Appl Surf Sci.* 2013;282:770–776.
11. Gerth J., Wiklund U. The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel. *Wear* 2008;264:885–892.
12. Chaus A.S., Rudnitskii F.I. Structure and Properties of Cast Rapidly Cooled High-Speed Steel R6M5. *Metals Science and Heat Treatment* 2003;45:157–162.
13. Geller Yu.A. *Tool steels*. Moscow: Metallurgy, 1983:527. (In Russ.).
14. Nefedyev S.P., Emelyushin A.N. The influence of nitrogen on the formation of the structure and properties of plasma coatings of the 10P6M5 type. *Bulletin of the Yugra State University* 2021;3(62):33–45. (In Russ.).
15. Pochetukha V.V., Baschenko L.P., Gostevskaya A.N., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Chapaikin A.S. Structure and properties of plasma coatings from high-speed steel after high-temperature tempering. *Bulletin of the Siberian State Industrial University.* 2023;3(45):30–38. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-30-38](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-30-38)
16. Gromov V.E., Kobzareva T.Yu., Ivanov Yu.F., Budovskikh E.A., Bashchenko L.P. Surface Modification of Ti Alloy by Electro-explosive Alloying and Electron-Beam Treatment. *AIP Conference Proceedings* 2016;1698:030006. (In Russ.). <https://doi.org/10.1063/1.4937828>
17. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Kormyshev V.E., Kononov SV. Electron-Beam Modification of a Surface Layer Deposited on Low-Carbon Steel by Means of Arc Spraying. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 2017; 81(1): 1353-1359. (In Russ.).
18. Koval’ N.N., Ivanov Yu.F. *Evolution of the structure of the surface layer of steel subjected to electron-ion-plasma treatment*. Tomsk: NTL, 2016:298. (In Russ.).
19. Koval’ N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of surfaces of metalloceramic and ceramic materials by electron-beams. *Russian Physics Journal.* 2008;51(5):60–70. (In Russ.).
20. Ivanov Yu.F., Chapaikin A.S., Guseva T.P., Romanov D.A., Gromov V.E. Transformation of the structure and properties of R18Yu surfacing after high-temperature tempering and electron beam treatment. *Problems of ferrous metallurgy and materials science.* 2023;3:62–79. (In Russ.).
21. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016:196.
22. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer, 2014:717.
23. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016:518.

Information about the authors

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Head of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343
SPIN-код: 2834-4090

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Leading Researcher, Institute of High-Current Electronics SB RAS
E-mail: yufi55@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8022-7958
SPIN-код: 7576-4810

Alexey B. Yuriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Siberian State Industrial University

E-mail: rector@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-9932-4755

Sergey S. Minenko, applicant for the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State University

E-mail: mss121278@mail.ru

Sergey V. Konovalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., vice-rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

SPIN-код: 4391-7210

Сведения об авторах

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественных наук имени профессора В.М. Финкеля, Сибирского государственного индустриального университета

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

SPIN-код: 2834-4090

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7958

SPIN-код: 7576-4810

Алексей Борисович Юрьев, д.т.н., профессор, ректор, Сибирского государственного индустриального университета

E-mail: rector@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-9932-4755

Сергей Сергеевич Миненко, соискатель кафедры естественных наук имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный университет

E-mail: mss121278@mail.ru

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирского государственного индустриального университета

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

SPIN-код: 4391-7210

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 21.11.2024

После доработки 20.12.2024

Принята к публикации 20.12.2024

Received 21.11.2024

Revised 20.12.2024

Accepted 20.12.2024

Оригинальная статья

УДК 669.24; 620.196.5; 621.791.669

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-51-62

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СВАРНОГО ШВА СПЛАВА ЭП-718, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

© 2025 С. Л. Исаев^{1,2}, Д. А. Баранов¹, В. С. Муратов²

¹ПАО «ОДК-Кузнецов» (Россия, 443022, Самара, Заводское шоссе, 29)

²Самарский государственный технический университет (Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244)

Аннотация. Сварные соединения жаропрочных никелевых сплавов получают различными способами. Наиболее перспективными из них являются методы, использующие концентрированные потоки энергии, в том числе лазерную и электронно-лучевую сварку. Рассмотрена электронно-лучевая сварка хромоникелевого дисперсионно твердеющего жаропрочного сплава ЭП718 (ХН45МВТЮБР-ИД). Получены сварные швы, используя режимы с постоянной скоростью перемещения луча по поверхности и различными токами с обеспечением полного провара образцов. Перед проведением исследования образцы прошли термическую обработку (закалка + старение). Исследована их микроструктура, механические свойства (временное сопротивление, предел текучести, относительные удлинение и сужение, ударная вязкость). Проведено исследование влияния утолщенных границ зерен в зоне термического влияния (ЗТВ) сварных швов на долговечность неразъемного соединения. При режимах сварки с погонной энергией 2,25 и 2,33 кДж/мм в микроструктуре всех образцов выявлено наличие утолщенных границ зерен, при погонной энергией 2,44 кДж/мм – получены образцы как с утолщенными границами зерен, так и без них. Утолщенные границы зерен ЗТВ имеют ширину 3 – 7 мкм. При испытании образцов на выносливость их разрушение в обоих случаях произошло как по сварному шву, так и по ЗТВ. Выдвинуто предположение о механизме появления утолщений границ зерен в зоне термического влияния. На основании результатов испытаний выявили, что утолщения границ зерен шириной до 4 мкм не оказывают влияния на усталостную прочность сварных соединений. Наличие утолщения границ зерен шириной более 5 мкм снижает прочность сварного шва жаропрочного дисперсионно-твердеющего сплава ЭП718, они являются концентраторами напряжений и могут привести к дальнейшему появлению трещин в условиях реального нагружения.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, металлографическое исследование, микроструктура, испытание на выносливость

Для цитирования: Исаев С.Л., Баранов Д.А., Муратов В.С. Механические свойства и структура сварного шва сплава ЭП-718, полученного электронно-лучевой сваркой. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):51–62. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-51-62](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-51-62)

Original article

MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF THE WELDED SEAM OF THE IP-718 (INCONEL 718) ALLOY OBTAINED BY ELECTRON BEAM WELDING

© 2025 S. L. Isaev^{1,2}, D. A. Baranov¹, V. S. Muratov²

¹JSC UEC-Kuznetsov (29 Zavodskoe shosse, Samara, 443022, Russian Federation)

²Samara State Technical University (244 Molodogvardeiskaya str., Samara, 443100, Russian Federation)

Abstract. Welded joints of heat-resistant nickel alloys are produced by various methods, the most promising are those using concentrated energy flows, including laser and electron beam welding. In this paper, electron beam welding of chromium-nickel precipitation hardening heat-resistant alloy EP718 (CrNi45WMoTiAlBP-ID) is considered.

In the work, welds were obtained in welding modes with a constant beam travel speed over the sample surface and different beam currents while ensuring complete sample penetration. Before the study, the samples were heat treated (quenching + aging). Their microstructure, mechanical properties (tensile strength, yield strength, relative elongation and contraction, impact toughness) were studied; the effect of thickened grain boundaries in the heat-affected zone of welds on the durability of a permanent joint was studied. In welding modes with linear energy of 2.25 and 2.33 kJ/mm, the presence of thickened grain boundaries was revealed in the microstructure of all samples; with linear energy of 2.44 kJ/mm, samples were obtained both with thickened grain boundaries and without them. The thickened grain boundaries in the HAZ have a width of 3 – 7 μm . During endurance testing of the samples, their destruction in both cases occurred both along the weld and along the HAZ. An assumption has been made about the mechanism of occurrence of grain boundary thickenings in the HAZ. Based on the test results, it has been revealed that grain boundary thickenings up to 4 μm wide do not affect the fatigue strength of welded joints. The presence of grain boundary thickenings more than 5 μm wide reduces the strength of the weld of the heat-resistant precipitation-hardening alloy EP718; they are stress concentrators and can lead to further cracking under real loading conditions.

Keywords: electron beam welding, metallographic examination, microstructure, endurance test

For citation: Isaev S.L., Baranov D.A., Muratov V.S. Mechanical properties and structure of the welded seam of the IP-718 (Inconel 718) alloy obtained by electron beam welding. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):51–62. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-51-62](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-51-62)

Введение

Дисперсионно-твердеющие сплавы на основе никеля широко применяются в авиастроении для изготовления высоконагруженных узлов, эксплуатирующихся при температурах до 800 °С [1]. К таким материалам относится сплав ЭП718 (ХН45ВМТЮБР-ИД). Для получения неразъемного соединения рассматриваемого сплава применяют технологии аргонодуговой, лазерной и электронно-лучевой сварки (ЭЛС) [2; 3].

Анализ научных исследований зарубежных и отечественных ученых в работах [4 – 13] показал, что для рассматриваемого сплава отсутствуют исследования по влиянию на долговечность сварного соединения возникающих при сварке и последующей обработке утолщенных границ зерен.

Целью настоящей работы является исследование влияния на долговечность неразъемного соединения утолщенных границ зерен в зоне термического влияния (ЗТВ) сварных швов статора высокого давления авиационного двигателя из жаропрочного сплава ЭП718.

Методика проведения эксперимента

Статор высокого давления изготавливается сваркой двух заготовок: задний фланец из цельнокатаного кольца (по ОСТ 1.90396 – 91) и среднего кольца из листового материала ЭП718 (по ТУ 14-1-5095 – 92). Деталь после сварки проходит термическую обработку для снятия напряжений и придания необходимых механических свойств.

Реализацию режимов сварки, исследование микроstructures и механических свойств сварных швов проводили на образцах-имитаторах

(рис. 1, а). Образцы (200 × 50 × 13 мм) были изготовлены из цельнокатаного кольца 1 и листового материала 2 жаропрочного сплава ЭП718.

Химический состав сплава образцов (сплав ЭП718) был определен методом спектрального анализа на спектрометре (табл. 1).

Неразъемные соединения получили на установке электронно-лучевой сварки. На различных режимах ЭЛС изменяли силу тока луча, скорость перемещения образца относительно луча оставалась неизменной.

Закалку проводили в элеваторной, а старение в шахтной электропечи.

Размер зерна определяли методом измерения длин хорд по ГОСТ 5639 – 82 в программном комплексе. Исследование микроstructures проводили на оптическом микроскопе с анализатором микроstructures поверхностных твердых тел при различных увеличениях. Замер микротвердости проводился при нагрузке 50 г.

Образцы испытывали на выносливость при консольном изгибе при частоте колебаний основного тона примерно 500 Гц. База испытаний составляла 10^7 циклов, температура испытаний – 20 °С, начальный уровень переменных напряжений – 400 МПа, изменение уровня переменных напряжений σ_a проводили с шагом 20 МПа.

Результаты исследований и их обсуждение

В условиях серийного производства после ЭЛС на лицевой поверхности по границе сварного шва имеются продольные строчечно-точечные свечения, выявленные капиллярным контролем (рис. 2), что указывает предположительно на наличие дефектов в виде трещин. Деталь после сварки прошла термическую обработку (закалку + старение) для снятия напряжений.

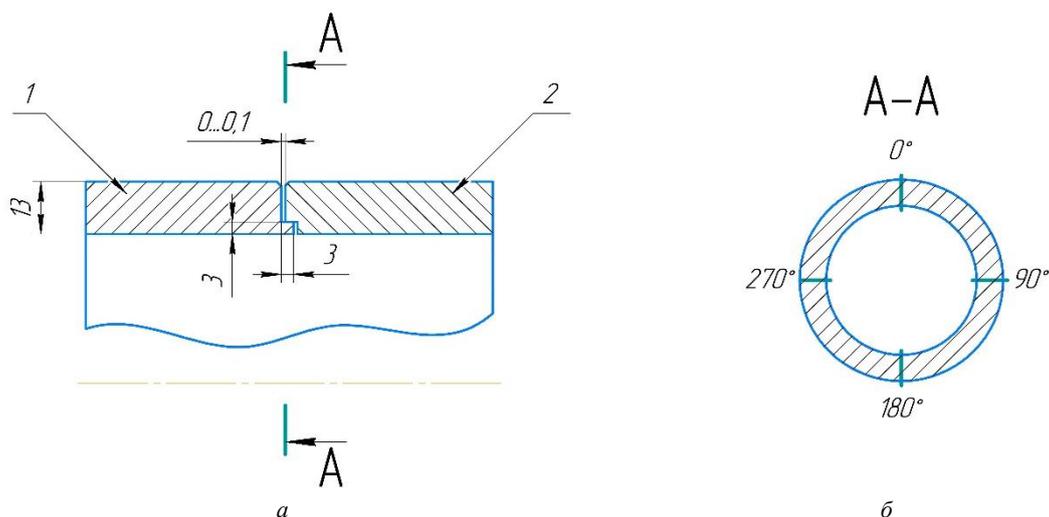


Рис. 1. Эскиз образца-имитатора (а) и схема вырезки образцов (б):
1 – кольцо цельнокатаное; 2 – листовый материал

Fig. 1. Sketch of a sample-imitator (a) and sample cutting scheme (b):
1 – solid rolled ring; 2 – sheet material

Для определения особенностей характерных признаков выявленных дефектов применяли металлографическое исследование сварного шва. Макро- и микроисследования проводили в четырех диаметрально противоположных поперечных сечениях сварного соединения. Макроструктура в разных направлениях идентична (рис. 3). Ширина шва с лицевой стороны составляет $6,0 \div 6,5$ мм, с внутренней – $1,9 \div 2,0$ мм.

На образцах как со стороны цельнокатаного кольца, так и со стороны листового материала наблюдается разнотернистая микроструктура во всех сечениях детали. В основном микроструктура состоит из зерен 2 – 3 балла. На цельнокатаном кольце балл зерна составляет от 2 до 5 (рис. 4, а), на листовом материале – от 3 до 5 (рис. 4, б). В отдельных зонах наблюдаются зерна второго и третьего балла, окруженные цепочками зерен пятого и шестого балла шкалы ГОСТ 5639 – 82. Микроструктура материала свариваемых деталей аустенит + карбиды, дефектов металлургического характера не обнаружено.

В исследуемых сечениях в зоне термического влияния (ЗТВ) рассматриваемого соединения обнаружены трещины, расположенные в основном материале свариваемых деталей с выходом на поверхность границы сварного шва протяженностью до 0,6 мм (рис. 5). В ЗТВ на расстоянии 0,1 – 0,3 мм от сварного шва обнаружены трещины без выхода на поверхность протяженностью 0,1 – 0,4 мм (рис. 6).

В зоне термического влияния под «грибком» наблюдается значительное количество утолщений границ зерен. Именно по ним существует наибольшая вероятность образования дефектов (микротрещин) из-за действия максимальных растягивающих температурных деформаций, возникших при ЭЛС и последующей термической обработке.

Микроструктура основного материала свариваемых деталей аустенит + карбиды (4 – 5 балл зерна с отдельными зернами 3 балла).

Результаты замеров микротвердости образцов с четырех диаметрально противоположных вырезанных мест представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 1

Химический состав материала
Table 1. Chemical composition of the material

Место вырезки образца (рис. 1)	Содержание, %, элемента											
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	W	Mo	Ti	Al	Nb
1	0,055	0,007	0,07	0,0016	0,004	15,6	45,24	3,44	4,45	2,08	0,99	1,13
2	0,058	0,08	0,24	0,0016	0,01	15,9	44,73	3,23	4,11	2,17	0,98	1,01
ТУ	≤0,1	≤0,3	≤0,6	≤0,01	≤0,015	14–16	43–47	2,5–3,5	4,0–5,2	1,9–2,4	0,9–1,4	0,8–1,5



Рис. 2. Свечения в зоне сварного соединения
Fig. 2. Glow in the weld zone

Для исследования влияния утолщения границ зерен на выносливость сварного шва изготовлена партия образцов-имитаторов, полученных при различных режимах сварки (табл. 3).

Режимы сварки (погонную энергию) выбрали для обеспечения полного провара образцов толщиной 13 мм, исходя из рекомендаций нормативной документации [14] и режима, рассмотренного в работе [15].

Для повышения стойкости сварного соединения против термического растрескивания в условиях его эксплуатации (в интервале температур старения), а также уровня и стабильности прочностных характеристик и работоспособности выполнен полный цикл термической обработки (закалка + старение):

1. Термическая обработка до сварки – закалка (нагрев на воздухе 1100 °С, время τ нагрева 2 ч, охлаждение на воздухе).
2. Термическая обработка после сварки – закалка (снятие напряжений; нагрев на воздухе до 1100 °С, $\tau = 1$ ч, охлаждение в контейнере на воздухе с подачей аргона до температуры 500 – 600 °С, далее охлаждение без подачи аргона); старение 1 (нагрев на воздухе до 780 °С, $\tau = 5$ ч, охлаждение на воздухе); старение 2 (нагрев на воздухе до 650 °С, $\tau = 16$ ч, охлаждение на воздухе).

Для проверки механических свойств сварных соединений из образцов-имитаторов изготовлены образцы для определения временного сопротивления, предела текучести, относительного

удлинения и сужения (рис. 7, а, тип образца XIII) и ударной вязкости (рис. 7, б, тип образца IX) в соответствии с ГОСТ 6996 – 66, сварной шов расположен в центре образца. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Разрушение разрывных образцов с определением временного сопротивления произошло в образцах 1 и 2 по основному материалу на расстоянии 0,5 – 2,0 мм от сварного шва, 3 – по сварному шву. При макроисследовании поверхности излома всех образцов трещин не обнаружено. В исследованных сварных швах имеется провар 100 %.

При исследовании макроструктуры сварных швов подтверждены характерные для ЭЛС зоны: зона «грибка» (параметры h , b), кинжальная зона (параметры e , d), корень шва сформирован в замковой части соединения. Габаритные размеры сварного шва (рис. 8) каждого режима представлены в табл. 5. При режиме сварки 2 наблюдается максимальная ширина ванны b в зоне «грибка», при режиме 1 высота h «грибковой» зоны максимальная, что приводит к дополнительному нагреву, росту вероятности утолщения границ зерен и ожидаемого образования микротрещин. При режимах 2 и 3 получили высоту «грибковой» зоны одинаковую, ширина этой зоны минимальная при режиме 3 с требуемой глубиной провара.

Установлено, что в основном материале всех образцов в ЗТВ наблюдается однородная микроструктура, размер зерна соответствует 2 – 3 баллу, основной материал 3 – 4 баллу шкалы ГОСТ 5639 – 82.

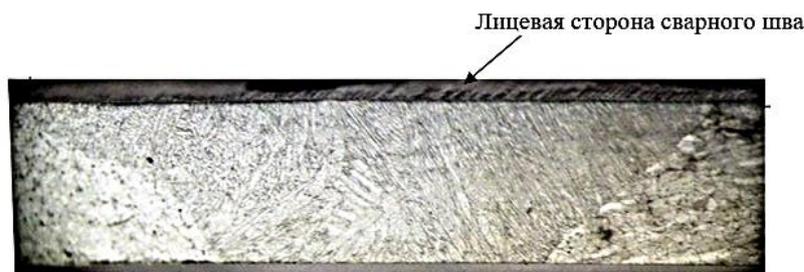


Рис. 3. Макроструктура сварного соединения в поперечном сечении шлифа
Fig. 3. Macrostructure of a welded joint in a cross-section of a section

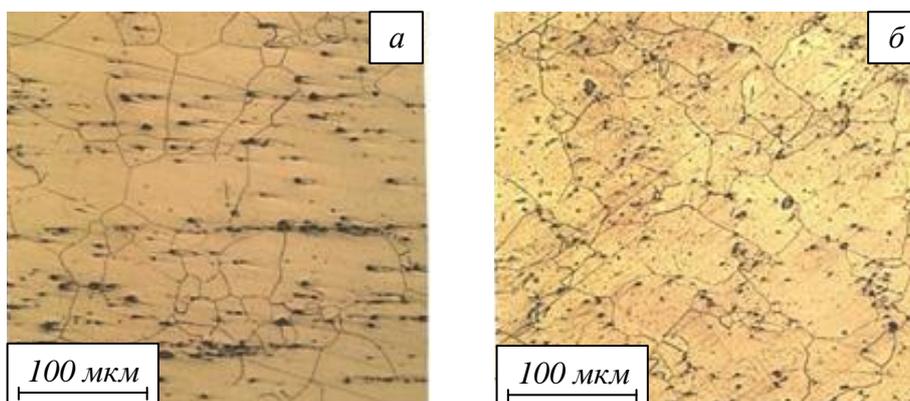


Рис. 4. Микроструктура основного материала цельнокатаного кольца (а) и листового материала (б)
Fig. 4. Microstructure of the base material of a solid rolled ring (a) and the genuine material (b)

В ЗТВ под «подгрибковой» зоной на локальных участках наблюдается утолщение границ зерен шириной 3 – 7 мкм (табл. 6). Это предположительно обусловлено выделением карбидных фаз при нагреве во время сварки с последующим охлаждением и ускоренной диффузией по границам зерен, что может привести к образованию трещин [26; 27]. После термической обработки количество утолщенных границ зерен увеличилось. Для определения влияния утолщения границ зерен на выносливость проведены сравнительные испытания образцов с утолщенными границами зерен и без них.

Для испытаний рассматривали образцы (режимы 1 – 3), вырезанные из деталей, которые прошли полный технологический цикл (сварка, термическая и механическая обработки). По результатам исследования микроструктуры на всех образцах, полученных по режимам 1 и 2, имеются утолщения границ зерен, при реализации режима 3 утолщенные границы выявлены не на всех образцах.

Сварной шов

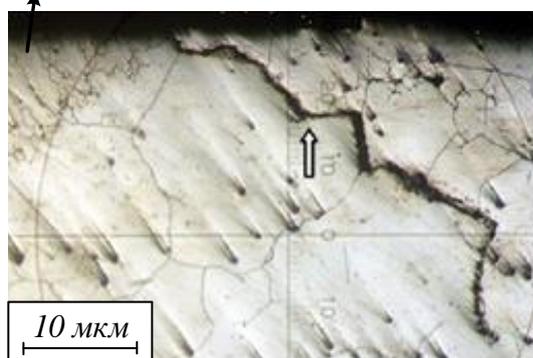


Рис. 5. Трещина в ЗТВ, выходящая к границе сварного шва
Fig. 5. A crack in the heat-affected zone extending to the weld boundary

Для испытания брали образцы в количестве 40 шт. (режим сварки 1 – 3) с утолщением границ зерен в ЗТВ и 30 шт. (режим сварки 3) без утолщенных границ зерен в ЗТВ.

Перед проведением испытаний все образцы препарировали тензорезисторами с базой 5 мм (рис. 9). Режим испытаний задавали по контрольному тензорезистору 1, наклеенному на сварном шве. Для контроля режима испытаний использовался тензорезистор 2.

Образцы испытывали на выносливость при консольном изгибе на вибростенде при частоте основного тона (первая форма собственных колебаний детали). При задании уровня переменных напряжений динамический модуль упругости E для сплава ЭП718 при комнатной температуре был принят 204 000 МПа. За критерий разрушения принимали снижение резонансной частоты колебаний образца на 2 % относительно исходного значения. Для визуального обнаружения трещин испытания продолжали до снижения резонансной частоты примерно на 10 %, наработанные

Сварной шов

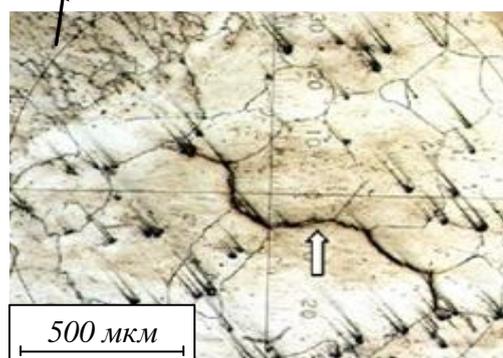


Рис. 6. Трещина в ЗТВ
Fig. 6. Crack in the heat-affected zone

Результаты измерения микротвердости
Table 2. Microhardness measurement results

Образец	Микротвердость, МПа		
	детали из листового материала	сварного шва	цельнокатаной детали
1 (рис. 1, б, 0°)	4175 – 4234	4292 – 4351	4116 – 4234
2 (рис. 1, б, 90°)	4292 – 4351	4351 – 4420	4292 – 4420
3 (рис. 1, б, 180°)	4214 – 4302	4263 – 4381	4067 – 4155
4 (рис. 1, б, 270°)	4126 – 4194	4400 – 4479	4204 – 4283

Режимы сварки образцов
Table 3. Welding modes of samples

Режим	Погонная энергия, кДж/мм
1	2,25
2	2,33
3	2,44

при этом циклы не учитывали. Результаты испытаний образцов приведены в табл. 7.

Предел выносливости σ_a образцов, полученных по режиму 3, как с утолщенными границами зерен в ЗТВ, так и без них, не разрушившихся на базе 1×10^6 циклов, составил 280 МПа. Предел выносливости образцов, полученных по режимам 1 и 2, с утолщенными границами зерен на базе 12×10^6 циклов, составил 240 МПа, разрушение произошло по ЗТВ.

Наличие утолщений границ зерен в ЗТВ более 5 мкм снижают выносливость образцов, до 4 мкм – не влияет на выносливость образцов. Результаты испытаний образцов, полученных по режиму 3, на сопротивление усталости представлены на рис. 10. Кривые усталости приведены с вероятностью разрушения 50 %.

При внешнем осмотре установлено, что разрушение всех образцов произошло на расстоянии

30,1 – 32,0 мм от основания широкой части в зоне расположения тензодатчика 1 (рис. 11, 12).

При анализе изломов установлено, что разрушение всех образцов имеет усталостный характер. В изломах образцов наблюдаются локальные участки, окисленные до коричневого цвета. Дефектов (пор) сварки, непроваров в изломах образцов не обнаружено. Для описания места расположения очагов разрушения приняли следующие условные обозначения: А – поверхность со стороны маркировки; Б – поверхность со стороны тензодатчика; правый и левый торцы узкой части образца со стороны поверхности А (рис. 12). Высота плоскости разрушения указана от основания широкой части образцов. Расположение очагов разрушения приведено в табл. 8.

Макроанализ проводили на шлифах, изготовленных по боковой поверхности образцов в зоне разрушения. Разрушение образцов произошло как по сварному шву (режим сварки 3, режимы

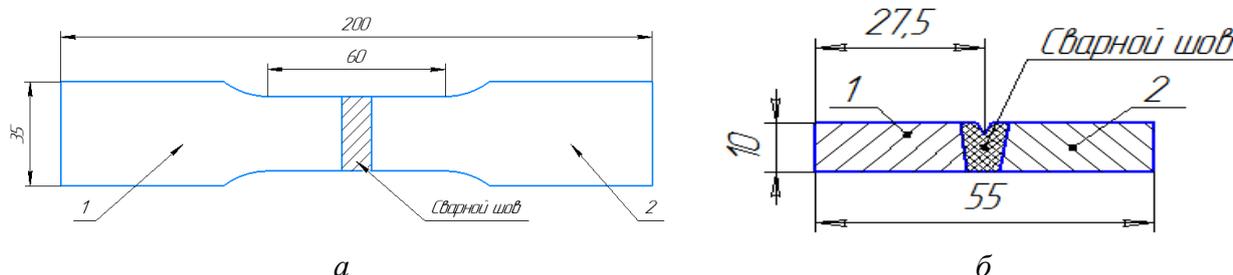


Рис. 7. Эскизы образцов:

а – образец для определения временного сопротивления, предела текучести, относительного удлинения и сужения; б – образец для определения ударной вязкости; 1 – кольцо цельнокатаное; 2 – листовый материал

Fig. 7. Sketches of samples:

а – sample for determining tensile strength, yield strength, relative elongation and narrowing; б – sample for determining impact toughness; 1 – solid-rolled ring; 2 – sheet material

Механические свойства сварных соединений
Table 4. Mechanical properties of welded joints

Режим	Механические свойства сварных соединений				Ударная вязкость при изгибе КСУ, МДж/м ²	Микротвердость, МПа
	Временное сопротивление σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное			
			удлинение δ , %	сужение ψ , %		
1	1070 – 1090	630 – 650	13,0 – 13,8	16,9 – 17,8	0,60 – 0,62	3479
2	1060 – 1080	610 – 630	14,6 – 15,0	19,6 – 20,1	0,60 – 0,62	3538
3	1110 – 1130	620 – 640	17,3 – 18,2	25,7 – 26,4	0,55 – 0,57	3518
ТУ (лист)	более 1080	более 790	более 13	–	более 0,35	2871 – 3557

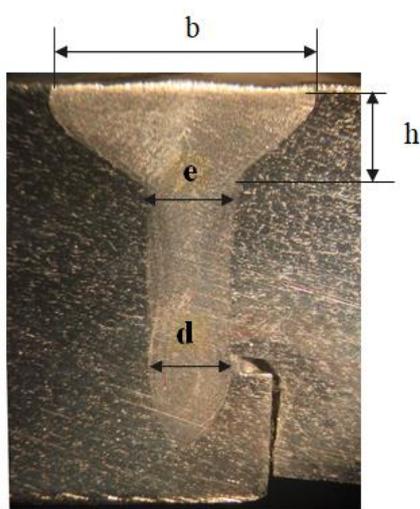


Рис. 8. Макроструктура сварных швов
 Fig. 8. Macrostructure of welded seams

испытаний 1, 2, 4), так и по ЗТВ (режимы сварки 1 и 2, режимы испытаний 12¹ и 12²; режим сварки 3, режимы испытаний 3, 5, 7 – 11). Образцы с утолщением границ зерен шириной более 4 мкм разрушились по ЗТВ (табл. 8). Утолщения границ зерен явились концентраторами образования трещин, что привело к последующему разрушению.

Микроструктура сварного шва имеет столбчатую структуру литого сплава, ближе к центру

наблюдаются нитевидные кристаллы, ЗТВ практически отсутствует, отчетливо просматривается граница сварного шва и основного материала.

Микроструктура ЗТВ, характерная для сплава ЭП718, представляет собой γ -твердый раствор + упрочняющие фазы. Зерно соответствует 2 – 4 баллу шкалы ГОСТ 5639 – 82. Ширина сварного шва, замеренная на образцах, разрушенных по ЗТВ, составляет примерно 5,5 – 6,2 мм. Разрушение образцов в ЗТВ произошло по телу зерен, что подтверждается анализом траектории развития трещины и типично для усталостного разрушения (рис. 13).

Выводы

Микроисследованием шлифов выявлены утолщения границ зерен шириной 3 – 7 мкм в ЗТВ на всех режимах сварки. На режимах сварки с погонной энергией 2,25 и 2,33 кДж/мм ширина утолщения границ зерен составила 4 – 5 и 5 – 7 мкм, 2,44 кДж/мм – 3 – 4 мкм. При испытании на выносливость разрушение образцов (режим сварки 3) без утолщения границ зерен произошло как по сварному шву, так и по ЗТВ на расстоянии примерно 0,6 – 1,2 мм от края сварного шва. При испытании на выносливость разрушение образцов (режим сварки 3) с утолщением границ зерен произошло по ЗТВ на расстоянии примерно 0,5 – 1,9 мм от сварного шва. Разрушение всех образцов имеет усталостный характер.

Размеры сварного шва
Table 5. Dimensions of the weld

Режим (погонная энергия)	h , мм	b , мм	e , мм	d , мм	Глубина провара, мм
1 (2,25 кДж/мм)	3,0 – 3,5	6,3 – 6,4	2,0	1,1 – 1,5	13,0
2 (2,33 кДж/мм)	2,7 – 3,0	6,6 – 6,8	2,1 – 2,2	1,6 – 1,8	13,0
3 (2,44 кДж/мм)	2,5 – 3,0	5,5 – 6,2	2,5 – 2,6	2,1 – 2,2	13,0
По нормативному документу	факультативно		1,5 – 3,5	1,5 – 2,5	не менее 10,5

Ширина утолщения границ зерен
Table 6. Width of grain boundary thickening

Режим	Ширина утолщения границ зерен, мкм
1	4 – 5
2	5 – 7
3	3 – 4

Анализ особенностей формирования сварного соединения ЭЛС жаропрочного сплава ЭП718 позволяет сделать предположение о механизме появления утолщений границ зерен в ЗТВ. По результатам исследования и литературным данным степень их проявления зависит от балльности зерна исходных заготовок и усугубляется при наличии в структуре материала зерен крупнее 2 – 3 балла.

Основное количество утолщений границ зерен находятся в ЗТВ под «грибком», в которой существует наибольшая вероятность образования дефектов в виде трещин вследствие действия максимальных растягивающих температурных деформаций, возникших при ЭЛС и последующей термической обработки.

Предел выносливости образцов при режиме сварки с погонной энергией 2,44 кДж/мм как с утолщением границ зерен, так и без, одинаковый (280 МПа). Утолщения границ зерен шириной до 4 мкм не оказывают влияния на усталостную прочность ЗТВ сварных швов.

Наличие утолщения границ зерен шириной более 5 мкм снижает прочность. Предел выносливости образцов на базе $1 \cdot 10^6$ циклов составил 240 МПа. Имеющиеся утолщения границ зерен в ЗТВ шириной более 5 мкм являются концентратором напряжений и могут привести к дальнейшему появлению трещин в условиях реального нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокожаропрочные дефор-

мируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2011:1–10.

2. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Свиридов А.В., Грибков М.С. Особенности электронно-лучевой сварки жаропрочных сплавов ЭИ698-ВД и ЭП718-ИД со сталью 45. *Труды ВИАМ*. 2020;9(91):3–14.
<https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-9-3-14>
3. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. *Теория свариваемости сталей и сплавов*. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014:487.
4. Vivek Patela, Akash Salia, James Hyderb, Mike Corlissb, David Hyderb, Wayne Hunga. Electron Beam Welding of Inconel 718 Procedia Manufacturing. In: *48th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 48, Ohio, USA 48, 2020*;1:428–435.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.065>
5. Raza T., Andersson J., Svensson L.E. Vareststraint weldability testing of additive manufactured alloy 718. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2018;23(7):606–611.
<https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1437338>
6. Agilan M., Venkateswaran T., Sivakumar D., Pant B. Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of inconel-718 EB Welds. *Procedia Materials Science*. 2014;5:656–662.
<https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.312>

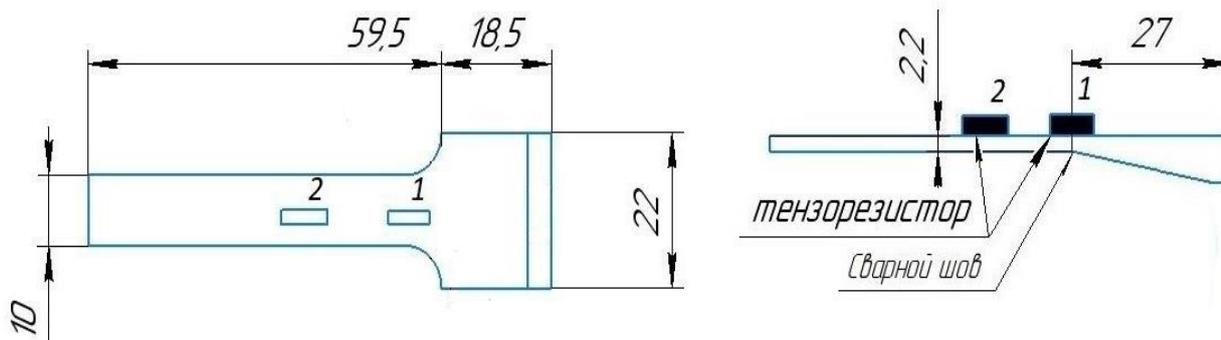


Рис. 9. Эскиз образца для испытания на выносливость
 Fig. 9. Sketch of a specimen for endurance testing

Параметры испытания на выносливость
Table 7. Endurance test parameters

Режима испытания	σ_a , МПа	Частота основного тона F , Гц	База испытаний $N \cdot 10^{-6}$, цикл	Место разрушения
<i>Образцы без утолщенных границ зерен</i>				
1	400	522	2,21	по сварном шву
2	360	524	2,72	по сварном шву
3	340	521	5,39	по ЗТВ
4	320	517	6,65	по сварном шву
5	300	499	4,97	по ЗТВ
6	280	501	1,43	не разрушился
<i>Образцы с утолщенными границами зерен</i>				
7	400	512	1,99	по ЗТВ
8	360	521	4,34	по ЗТВ
9	340	516	10,0	по ЗТВ
10	320	522	8,21	по ЗТВ
11	300	507	9,31	по ЗТВ
12 ³	280	532	1,15	не разрушился
12 ¹	240	518	12,79	по ЗТВ
12 ²	240	520	12,04	по ЗТВ

Примечание: индексы 1 – 3 – образцы, полученные по режимам сварки 1 – 3.

- Mei Y., Liu Y., Liu C., Li C., Yu L., Guo Q., Li H. Effect of base metal and welding speed on fusion zone microstructure and HAZ hot-cracking of electron-beam welded Inconel 718. *Materials and Design*. 2016;89:964–977. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.082>
- Manikandan S., Sivakumar D., Rao K.P., Kamaraj M. Effect of enhanced cooling on microstructure evolution of alloy 718 using the gas tungsten arc welding process. *Weld World*. 2016;60:899–914. <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0349-1>
- Sonar T., Balasubramanian V., Malarvizhi S., Venkateswaran T., Sivakumar D. Effect of Delta current and Delta current frequency on microstructure and tensile properties of gas tungsten constricted arc (GTCA) welded inconel 718 alloy joints. *Metall Mater Trans A*. 2019;28(1):186–200. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2019-0020>
- Sumit K. Sharma, Prashant Agarwal, J. Dutta Majumdar. Studies on Electron beam welded Inconel 718 similar joints. In.: *International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM 2017, 23-25 January 2017, Kruger National Park*. Procedia Manufacturing. 2017;7:654 – 659. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.097>
- Jia Z, Wan X, Guo D. Study on microstructure and mechanical properties of Inconel718 components fabricated by UHFP-GTAW technology. *Mater Lett*. 2019;261:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127006>

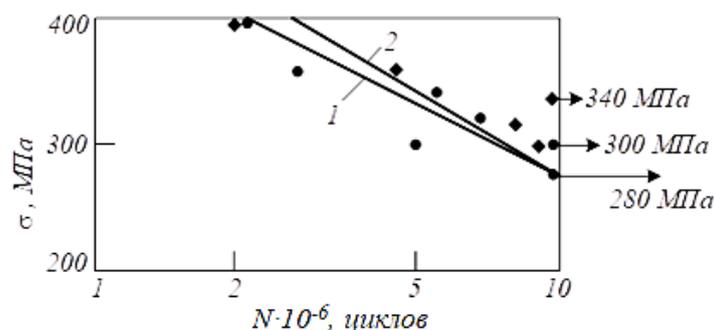


Рис. 10. Кривые сопротивления усталости образцов, полученных по режиму сварки 3, с утолщенными границами зерен по ЗТВ (1, ●) и без утолщенных границ зерен (2, ◆)

Fig. 10. Fatigue resistance curves of samples obtained by welding mode 3 with thickened grain boundaries according to TV (1, ●) and without thickened grain boundaries (2, ◆)

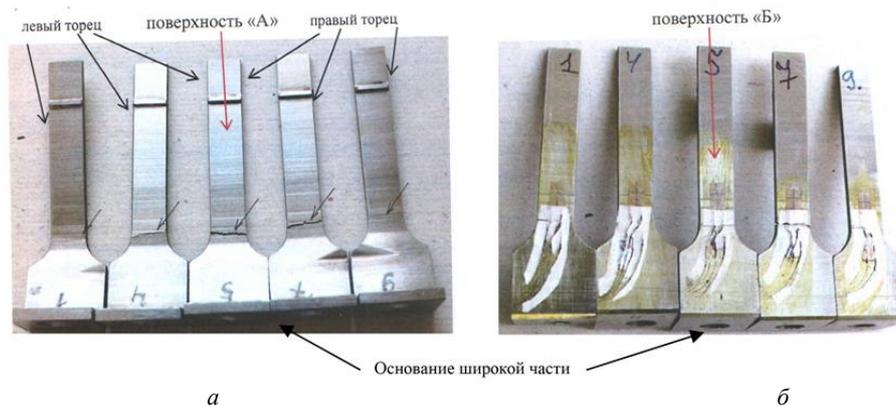


Рис. 11. Внешний вид и место разрушения образцов без утолщенных границ зерен
 Fig. 11. Appearance and location of fracture of samples without thickened grain boundaries

12. Никифоров Р.В., Галимов В.Р., Хисамутдинов Э.Р., Камалетдинова Р.Р., Башаров Р.Р. Структура и свойства сварных соединений сплава ЭП718, полученных роботизированной сваркой плавящимся электродом. *Вестник УГАТУ*. 2021;4(94):10–18. https://doi.org/10.54708/19926502_2021_254910
13. Баранов Д.А., Паркин А.А., Жаткин С.С. Особенности формирования сварного шва жаропрочного сплава ХН45ВМТЮБР в зависимости от режимов лазерной сварки. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2018;4(2):170–176.
14. *Производственная инструкция ПИИ.4.75-2000. Дуговая сварка в среде защитных газов конструкционных, нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов*. Москва: ОАО НИАТ, 2001:115.
15. Исаев С.Л., Баранов Д.А., Щедрин Е.Ю., Муратов В.С., Никитин К.В., Жаткин С.С.

Структура и свойства сварных швов при электронно-лучевой сварке железохромоникелевого сплава ХН45МВТЮБР-ИД. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;6(29):44–53. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-44-53>

REFERENCES

1. Lomberg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M., Mazalov I.S. Highly heat-resistant deformable nickel alloys for advanced gas turbine engines and gas turbine installations. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie*. 2011:1–10. (In Russ.).
2. Kablov E.N., Antipov V.V., Sviridov A.V., Gribkov M.S. Features of electron beam welding of heat-resistant alloys EI698-VD and EP718-ID with steel 45. *Trudy VIAM*. 2020;9(91):3–14. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-9-3-14>



Рис. 12. Внешний вид и место разрушения образцов (указано стрелкой) с утолщенными границами зерен
 Fig. 12. Appearance and location of destruction of samples (indicated by arrow) with thickened grain boundaries

Очаги разрушения
Table 8. Centers of destruction

Режимы испытания	Начало разрушения	Место разрушения
<i>Образцы без утолщенных границ зерен</i>		
1	На поверхности <i>A</i> на расстоянии примерно 1,3 мм от правого торца	Разрушение по сварному шву
2	На поверхности <i>A</i> на расстоянии примерно 0,6 мм от правого торца	Разрушение по сварному шву
3	На поверхности <i>B</i> от правого торца	Разрушение по основному материалу на расстоянии 0,6 – 1,2 мм от сварного шва (ЗТВ)
4	На поверхности <i>A</i> на расстоянии примерно 5,3 мм от правого торца	Разрушение по сварному шву
5	На поверхности <i>B</i> от правого торца	Разрушение по ЗТВ
<i>Образцы с утолщенными границами зерен</i>		
7	На поверхности <i>B</i> от правого торца	Разрушение по ЗТВ
8	На поверхности <i>B</i> от правого торца	Разрушение по основному материалу на расстоянии 1,6 – 1,9 мм от сварного шва (ЗТВ)
9	На поверхности <i>B</i> от левого торца	Разрушение по ЗТВ
10	На поверхности <i>B</i> от левого торца	Разрушение по ЗТВ
11	На поверхности <i>B</i> от правого торца	Разрушение по основному материалу на расстоянии 0,5 – 0,6 мм от сварного шва
12 ¹	На поверхности <i>B</i> от правого торца	Разрушение по ЗТВ на расстоянии 0,9 – 1,0 мм от сварного шва
12 ²	На поверхности <i>B</i> от правого торца	Разрушение по ЗТВ на расстоянии 0,7 – 0,8 мм от сварного шва
Примечание: индексы 1 и 2 – партия образцов получена на режимах сварки 1 и 2.		

- Makarov E.L., Yakushin B.F. *Theory of weldability of steels and alloys: monograph*. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2014:487. (In Russ.).
- Vivek Patela, Akash Salia, James Hyderb, Mike Corlissb, David Hyderb, Wayne Hunga. Electron Beam Welding of Inconel 718 *Procedia Manufacturing*. In: 48th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 48, Ohio, USA 48, 2020;1:428–435. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.065>
- Raza T., Andersson J., Svensson L.E. Vareststraint weldability testing of additive manufactured alloy 718. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2018;23(7):606–611. <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1437338>
- Agilan M., Venkateswaran T., Sivakumar D., Pant B. Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of inconel-718 EB Welds. *Procedia Materials Science*. 2014;5:656–662. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.312>
- Mei Y., Liu Y., Liu C., Li C., Yu L., Guo Q., Li H. Effect of base metal and welding speed on fusion zone microstructure and HAZ hot-cracking of electron-beam welded Inconel 718. *Materials and Design*. 2016;89:964–977. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.082>



Рис. 13. Микроструктура основного материала около зоны излома образца по основному материалу
Fig. 13. Microstructure of the base material near the fracture zone of the sample along the base material

8. Manikandan S., Sivakumar D., Rao K.P., Kamaraj M. Effect of enhanced cooling on microstructure evolution of alloy 718 using the gas tungsten arc welding process. *Weld World*. 2016;60:899–914.
<https://doi.org/10.1007/s40194-016-0349-1>
9. Sonar T., Balasubramanian V., Malarvizhi S., Venkateswaran T., Sivakumar D. Effect of Delta current and Delta current frequency on microstructure and tensile properties of gas tungsten constricted arc (GTCA) welded inconel 718 alloy joints. *Metall Mater Trans A*. 2019;28(1):186–200.
<https://doi.org/10.1515/jmbm-2019-0020>
10. Sumit K. Sharma, Prashant Agarwal, J. Dutta Majumdar. Studies on Electron beam welded Inconel 718 similar joints. In.: *International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing, SMPM 2017*, 23–25 January 2017, Kruger National Park. *Procedia Manufacturing*. 2017;7:654–659.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.097>
11. Jia Z, Wan X, Guo D. Study on microstructure and mechanical properties of Inconel718 components fabricated by UHFP-GTAW technology. *Mater Lett*. 2019;261:1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127006>
12. Nikiforov R.V., Galimov V.R., Khisamutdinov E.R., Kamaletdinova R.R., Basharov R.R. Structure and properties of welded joints of EP718 alloy obtained by robotic welding with a melting electrode. *Vestnik UGATU*. 2021;4(94):10–18. (In Russ.).
https://doi.org/10.54708/19926502_2021_254910
13. Baranov D.A., Parkin A.A., Zhatkin S.S. Features of the formation of the weld of the heat-resistant alloy KHN45MVTYUBR, depending on the modes of laser welding. *Izvestiya Samarского nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2018;4(2):170–176. (In Russ.).
14. Production instruction PI1.4.75-2000 Arc welding in the environment of protective gases of structural, stainless and heat-resistant steels and alloys. Moscow: JSC NIAT, 2001:115. (In Russ.).
15. Isaev S.L., Baranov D.A., Shchedrin E.Yu., Muratov V.S., Nikitin K.V., Zhatkin S.S. Structure and properties of welds in electron beam welding of iron-chromium-nickel alloy KHN45MVTYUBR-ID. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2023;6 (29):44–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-6-44-53>

Сведения об авторах:

Сергей Леонидович Исаев, аспирант кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалы, Самарский государственный технический университет, главный сварщик, ПАО «ОДК-Кузнецов»

E-mail: isl231083@yandex.ru

ORCID: 0009-0006-6329-4685

Дмитрий Александрович Баранов, к.т.н., заместитель главного сварщика по новым и ремонтным технологиям, ПАО «ОДК-Кузнецов»

E-mail: D.baranov91@mail.ru

ORCID: 0009-0009-8955-8556

Владимир Сергеевич Муратов, д.т.н., профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», Самарский государственный технический университет

E-mail: muratov1956@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8637-1096

Information about the authors:

Sergey L. Isaev, postgraduate student of Department “Metal Science, Powder Metallurgy, Nanomaterials”, Samara State Technical University, chief welder for production, PJSC “ODK-Kuznetsov”

E-mail: isl231083@yandex.ru

ORCID: 0009-0006-6329-4685

Dmitry A. Baranov, Cand. Sci. (Eng.), deputy chief welder for new and repair technologies, PJSC UEC-Kuznetsov

E-mail: D.baranov91@mail.ru

ORCID: 0009-0009-8955-8556

Vladimir S. Muratov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the department of metallurgy, powder metallurgy, nanomaterials Samara State Technical University

E-mail: muratov1956@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8637-1096

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 09.10.2024

После доработки 28.10.2024

Принята к публикации 12.11.2024

Received 09.10.2024

Revised 28.10.2024

Accepted 12.11.2024

Оригинальная статья

УДК: 662.749.33

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-63-71

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭЛЕКТРОДНЫХ КАМЕННОУГОЛЬНЫХ ПЕКОВ И СМЕСЕЙ НА ИХ ОСНОВЕ

© 2025 г. Р. Ю. Ковалев, А. П. Никитин

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 650000, Кемерово, пр. Советский, 18)

Аннотация. Каменноугольный пек – остаток разгонки каменноугольной смолы, который имеет широкое применение в качестве связующего при производстве электродов и анодной массы. Особый интерес представляет получение пековых карбонизатов с максимальным значением выхода для разработки высокоэффективной технологии. Показано влияние термической обработки электродного пека категории Б на выход карбонизата. На примере пека категории В показано, что термическое окисление повышает выход карбонизатов высокоплавкого и высокотемпературного пеков, добавление которых в массу пека категории Б повышает выход его карбонизата. Например, введение добавки высокотемпературного пека (температура размягчения $T_p = 148$ °С, массовая доля добавки $\omega = 31,8$ %) в электродный пек категории Б снижает выход летучих веществ и увеличивает выход карбонизата с 50,8 до 54,0 %. Введение такого же количества добавки высокоплавкого пека ($T_p = 202$ °С) увеличивает выход карбонизата на 10 %. В обоих случаях выход летучих веществ уменьшается. Показаны результаты по влиянию термической обработки электродного пека категории Б на выход карбонизата. Установлены зависимости выхода карбонизата от температуры термической обработки. Впервые показано, что термическая обработка электродного пека категории Б при температуре 350 °С увеличивает выход карбонизата на 7 %. Получена зависимость выхода карбонизата от выхода летучих веществ для пеков после термической обработки. Показано, что при нагреве до 300 °С выход карбонизата не зависит от уменьшения выхода летучих веществ исходного пека.

Ключевые слова: электродный пек, высокоплавкий пек, термическая обработка, выход летучих веществ, выход карбонизата

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН №124041100047-4.

Для цитирования: Ковалев Р.Ю., Никитин А.П. Термическая обработка электродных каменноугольных пеков и смесей на их основе. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):63–71. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-63-71](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-63-71)

Original article

HEAT TREATMENT OF ELECTRODE COAL PITCHES AND MIXTURES BASED ON THEM

© 2025 R. Yu. Kovalev, A. P. Nikitin

Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» (18 Sovetsky Av., Kemerovo, 650000, Russian Federation)

Abstract. Coal tar is a residue of coal tar distillation, which is widely used as a binder in the production of electrodes and anode paste. Of particular interest is the production of pitch carbonates with a maximum yield value for the development of a highly efficient technology. The paper shows the effect of heat treatment of a category B electrode pitch on the yield of carbonizate. Using the example of category C pitch, it is shown that thermal oxidation increases the yield of carbonates of high-melting and high-temperature pitches. The addition of inclusions of high-melting and high-temperature pitches of category C to the mass of pitch of category B increases

the yield of its carbonizate. For example, the introduction of a high-temperature pitch additive (softening temperature $T_{sp} = 148$ °C, mass fraction of the additive $\omega = 31.8$ %) into a category B electrode pitch reduces the yield of volatile substances and increases the yield of carbonate from 50.8 to 54.0 %. For example, the introduction of a category B electrode pitch, 31.8 % in the form of a high-temperature pitch ($T_{sp} = 148$ °C), reduces the yield of volatile substances and increases the yield of carbonizate from 50,8 % to 54,0 %. The introduction of the same amount of high-melting pitch additive ($T_{sp} = 202$ °C) increases the yield of carbonizate by 10 %. In both cases, the yield of volatile substances decreases. The results on the effect of heat treatment of the electrode pitch of category B on the yield of carbonizate are shown. The dependences of the yield of carbonizate on the temperature of heat treatment are established. It was shown for the first time that heat treatment of a category B electrode pitch at 350 °C increases the yield of carbonizate by 7 %. The dependence of the yield of carbonizate on the yield of volatile substances for pitches after heat treatment was obtained. It is shown that when heated to 300 °C, the yield of carbonizate does not depend on a decrease in the yield of volatile substances of the initial pitch.

Keywords: electrode pitch, high-melting pitch, heat treatment, volatile matter yield, carbonizate yield

Funding. Financial support was provided to the Institute of Coal Chemistry and Material Science, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, with the framework of state project no. 124041100047-4.

For citation: Kovalev R.Yu., Nikitin A.P. Heat treatment of electrode coal pitches and mixtures based on them. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):63–71. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-63-71](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-63-71)

Введение

Каменноугольный пек – высокотемпературный остаток разделения каменноугольной смолы на следующие фракции (T – температура дистилляции каменноугольной смолы):

- легкая ($T < 170$ °C);
- фенольная (170 °C $\leq T \leq 210$ °C);
- нафталиновая (210 °C $\leq T \leq 230$ °C);
- поглощительная (230 °C $\leq T \leq 270$ °C);
- антраценовая (270 °C $\leq T \leq 360$ °C);
- каменноугольный пек ($T > 360$ °C).

Каменноугольный пек (далее просто пек) является многокомпонентным материалом, состоящим из следующих фракций [1]:

- γ -фракция (растворимая в гексане, изооктане);
- β -фракция (нерастворимая в гексане, но растворимая в толуоле);
- α -фракция (нерастворимая в толуоле, которая в свою очередь состоит из α_2 -фракции (растворимая в хинолине) и α_1 -фракции (нерастворимая в хинолине)).

Согласно данным, представленным в работах [2; 3], γ -фракция состоит из хризена, пирена, антрацена, нафталина, карбазола, фенантрена, метилнафталина. Состав β -фракции представлен рядом полиароматических соединений: бензо[а]антрацен; бензо[а]пирен; циклопента[ghi]перилен; дибензо[b,d]тиофен и другие [3; 4]. Состав α -фракции включает в себя дифелиноксид, аценафтен, бензфлуорантен [4], а также в ее состав входят высокомолекулярные соединения переменного состава ($C_{62}H_{34}$; $C_{60}H_{28}$; $C_{64}H_{24}$; $C_{62}H_{20}$) [3].

Пек применяют как сырье при производстве электродов и анодной массы [5], а также для получения уникальных углеродных материалов путем его карбонизации. Например, при добавлении нефтяного пека в каменноугольный получают углеродные волокна, которые в дальнейшем подвергают стабилизации и карбонизации [6]. Одним из способов производства графитированного углерода является высокотемпературная ($T \approx 3000$ °C) карбонизация пека с добавками эпоксидной смолы [7]. Низкотемпературная ($T \approx 800$ °C) карбонизация пека с добавлением йода позволяет получить анодный материал для аккумуляторов [8]. Мезопористый углерод, легированный азотом, получен путем карбонизации пека при температуре $T \approx 700$ °C с добавками смеси неорганических солей NaCl – KCl – NaF [9]. В работе [10] анод для натрий-ионной батареи, состоящей из углеродных нанолитов, легированных фосфором, получали карбонизацией пека (при температуре $T \approx 900$ °C в атмосфере аргона) с добавлением гипофосфита натрия. Синтетические мезофазные пеки как сырье для углеродных волокон получали путем смешивания нафталинового пека и термообработанной каменноугольной смолы при температуре $T \approx 430$ °C в течение нескольких часов [11].

Особый интерес представляют исследования влияния термической обработки пека на его состав и выход целевого продукта (карбонизата). Рассмотрим примеры экспериментов по термической обработке пеков и изменения их свойств.

В работе [12] пек подвергали термической обработке при различных температурах в течение

нескольких часов. Установлено, что рост температуры T_p размягчения пека связан с ростом содержания α -фракции с 30 до 60 % при увеличении максимальной температуры термической обработки с 360 до 390 °С (длительность 3 ч).

В работе [13] среднетемпературные электродные пеки термически обрабатывали при температуре 350 °С в течение нескольких часов. В результате происходил рост величины T_p и уменьшение выхода летучих веществ X . Для электродного пека категории Б рост параметра T_p происходил быстрее (доходил до 180 °С) по сравнению с пеком категории Б1 [13].

При термической обработки пек ($T_p = 110$ °С) при температуре 260 °С в течение 4 – 5 суток происходил рост параметра T_p до 157 °С и увеличение α -фракции с 26,4 до 68,6 %, α_1 -фракции с 4,7 до 5,6 % [14]. В работе [15] установлено, что повышение температуры термической обработки пека с 220 до 420 °С приводила к увеличению выхода кокса с 47,21 до 69,64 %. В работе [16] показано, что увеличение температуры термической обработки пека до 400 °С приводило к увеличению выхода полукокса и карбонизата, а также к повышению содержания α_1 -фракции в конечном продукте [16].

Наибольший фундаментальный и прикладной интерес для исследований представляет применение термической обработки пеков в потоке воздуха – термическое окисление (ТО), которое разделяется на низкотемпературное ($T < 300$ °С) и высокотемпературное ($T > 300$ °С) [17; 18]. При низкотемпературном ТО происходят следующие реакции в газовой фазе: $\gamma \rightarrow \alpha_2$ [17; 18]. Это экспериментально подтверждено в работе [19]. При высокотемпературном ТО кроме газофазных реакций происходят реакции в жидкой фазе по следующим схемам: $\gamma \rightarrow \beta \rightarrow \alpha_2 \rightarrow \alpha_1$ [17; 18] и $\beta \rightarrow \alpha_1$ [20]. В работе [21] показано, что при термическом окислении пека происходит полимеризация кислородных радикалов, превращение ароматических соединений в более стабильные конгенеры посредством радикальных реакций. В работе [22] при ТО ($T = 260 - 360$ °С; $\tau = 3$ ч; $v_{\text{воздуха}} = 80$ л/ч) электродного пека категории В с величиной $T_p = 91$ °С получен высокотемпературный пек ($T_p = 148$ °С). Образование мезофазных сфер в микроструктуре наблюдали в изотропном нафталиновом пеке после термического окисления при температуре $T = 410$ °С [23].

Большую перспективу имеет сочетание ТО и термической обработки пека. В работе [24] пек ($T_p = 114$ °С) получен путем термического окисления при температуре 260 – 320 °С электродного пека категории В (использовали исходный пек [22]), далее нагревали в среде собственных газов до температуры 410 °С в течение 28 мин.

При использовании пека категории В получили высокоплавкий пек ($T_p = 202$ °С) путем ТО ($T = 260 - 320$ °С; $\tau = 32$ мин; $v_{\text{воздуха}} = 100$ л/ч), далее нагревали от 320 до 400 °С в течение 43 мин, проводили выдержку при $T = 400$ °С в течение 40 мин, далее ТО ($T = 400 - 430$ °С; $\tau = 50$ мин; $v_{\text{воздуха}} = 40$ л/ч) [24].

Согласно результатам работ [12; 13] можно сделать вывод, что при термическом окислении рост параметра T_p , увеличение α -фракции пека происходит быстрее чем при термической обработке. Рассматриваемый факт может повлиять на количественный выход карбонизата.

Из работ [25; 26] известно, что при нагревании пеков выше 300 °С происходит рост α_1 -фракции. При температурах 400 – 500 °С происходят мезофазные превращения согласно полученным результатам после термической обработки и карбонизации пека [27; 28]. В рассматриваемом температурном интервале происходит усиленный рост α_1 -фракции [23]. При температурах выше 500 °С происходят процессы полукоксования [29] и коксования пеков [16]. Из выше сказанного можно предположить, что α_1 -фракция может оказывать влияние на процесс карбонизации и количественно увеличивать выход конечного продукта. Карбонизат пека является продуктом реакций полимеризации, происходящих во время карбонизации [30].

Научный и практический интерес представляет исследование влияния добавок в виде пеков с температурой $T_p > 100$ °С в электродный пек категории Б, а также установление влияния термической обработки электродного пека категории Б на выход карбонизата. Полученные экспериментальные данные дадут большой вклад в развитие технологии получения пековых карбонизатов и пековых коксов, что и определяет актуальность настоящей работы. Установление влияния термической обработки электродного пека категории Б и наличие добавок высокотемпературного и высокоплавкого пека на выход карбонизата проводится впервые.

Целью настоящей работы является установление влияния добавок продуктов термического окисления электродного пека категории В, на выход карбонизата электродного пека категории Б, а также определение влияния термической обработки электродного пека категории Б на выход карбонизата.

Методы и принципы исследования

В качестве объектов исследования использовали пек категории Б с температурой размягчения 71,5 °С (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк) и продукты термического окисления электродного пека категории В (АО «Алтай Кокс», г. Заринск) с разными температурами размягчения:

1 – пек с $T_p = 114$ °С (П) [24];

2 – высокотемпературный пек (ВТП) с $T_p = 148$ °С [22];

3 – высокоплавкий пек (ВПП) с $T_p = 202$ °С [24].

Термическую обработку пека Б проводили в сушильном шкафу по методике, описанной в работе [13]. Образцы пеков нагревали до температур 250, 300, 350 °С с последующей выдержкой при конечных температурах в течение 30 мин. Для полученных материалов измеряли выход летучих веществ X по ГОСТ 9951 – 2023.

Получили смеси на основе пека категории Б с добавками продуктов ТО пека категории В (П, ВТП, ВПП). Пеки измельчали механическим способом, далее просеивали через сито размером менее 200 мкм для получения аналитической пробы. В измельченные навески электродного пека категории Б вносили по отдельности добавки аналитических проб П, ВТП, ВПП (массовая доля добавки $\omega = 31,7$ %). Дополнительно приготовили смесь с меньшим содержанием добавки пека ВПП ($\omega = 12,0$ %). Смеси тщательно размешивали металлическим шпателем и помещали в керамический тигель с притертой крышкой. Далее смеси нагревали до температуры 240 °С и выдерживали в течение 30 мин. Нагрев обеспечивал получение однородного продукта без отделения легких компонентов пека, о чем свидетельствует отсутствие жидких дистиллятов и сажи на керамической крышке тигля.

Полученные после термической обработки пеки и смесевые составы карбонизировали в тиглях с притертой крышкой в муфельной печи путем нагрева до температуры 850 °С и выдержки в течение 60 мин. Далее определяли выход карбонизата (K) как процентное отношение массы полученного карбонизата к массе навески пека или смесевого состава.

Основные результаты

В табл. 1 представлены данные о выходе летучих веществ для электродного пека категории В и его продуктов, полученных методом ТО.

Для образцов П термическое окисление ($T = 260 - 320$ °С) и нагрев до температуры 410 °С приводили к незначительному росту величины K . В результате ТО в сочетании с термической обработкой электродного пека В (образцы ВПП) происходит снижение выхода летучих веществ с 53 до 33 % [24]. Значение K после термической обработки увеличивается до 77,90 %. Полученный эффект можно объяснить следующим образом: термическое окисление при температуре 260 – 320 °С электродного пека категории В приводит к росту α - и α_1 -фракций [24], термическая обработка и ТО в области низкотемпературной карбонизации (при $T \leq 400$ °С) – к существенному росту α_1 -фракции [23]. Сочетание термообработки и ТО может привести к заметному увеличению значения K .

Для образцов ВТП, полученных путем ТО электродного пека категории В в интервале температур 260 – 360 °С, приводит к росту α - и α_1 -фракции, что также могло увеличить значение K [17; 18].

Состав образцов ВПП и П в соотношении 1:1 имел выход карбонизата 61 %. Это определяет перспективу применения высокоплавких пеков в качестве добавок в электродный пек для увеличения выхода карбонизата.

В табл. 2 представлены характеристики электродного пека категории Б и смесевых составов на его основе.

Введение в электродный пек категории Б добавки П (31,8 %) приводило к увеличению количества K до 53,6 %. Добавки в электродный пек категории Б пеков ВТП (31,8 %) и ВПП (12 %) приводили к увеличению количества K до 54 %. Можно сделать вывод, что добавление высокоплавкого пека ВПП более эффективно влияет на выход конечного продукта. Увеличение процентного содержания ВПП до 31,6 % увеличивало количество K до 60 %. Внесение добавок в электродный пек категории Б приводит к уменьшению выхода летучих веществ X .

Т а б л и ц а 1

Характеристики электродного пека категории В и полученных продуктов ТО

Table 1. Characteristics of the electrode pitch of category C and the resulting products TO

Материал	X , %	K , %
В	53,0	48,00
П	47,7	49,00
ВПП	33,0	77,90
ВТП	42,6	63,17
ВПП:П (1:1)	33,0	61,00

Характеристики электродного пека Б и смесевых составов на его основе**Table 2. Characteristics of electrode pitch B and mixtures based on it**

Название	X, %	K, %
Б	54,30	50,84
Б + П (31,8 %)	50,30	53,60
Б + ВТП (31,8 %)	48,69	54,20
Б + ВПП (31,6 %)	36,70	60,10
Б + ВПП (12 %)	50,36	54,30

В табл. 3 представлена зависимость выхода летучих веществ от температуры термической обработки электродного пека категории Б. При температуре 250 °С значение X уменьшилось с 54,3 до 50,0 % (нагрев) и до 49,2 % (нагрев и термостатирование), разница между значениями X мало отличается от вида термической обработки, термостатирование длительностью 30 мин практически не влияет на уменьшение выхода летучих веществ. При термической обработке ($T = 350$ °С) величина $X = 47,8$ %, при нагреве и термостатировании – 48,4 %.

Получена зависимость величины K от температуры термической обработки (рис. 1). Нагрев до температуры 250 °С не приводит к увеличению параметра K по сравнению с исходным пекком (табл. 1). Термостатирование при температуре 250 °С в течение 30 мин приводит к увеличению значения K на 3 %. Повышение температуры термической обработки до 350 °С приводит к увеличению величины K с 50,8 до 58,0 % для обеих типов обработки. Для более высокотемпературных экспериментов выдержка играет незначительную роль, так как все основные изменения успевают происходить во время эксперимента в выбранном температурном интервале.

Из результатов видно (табл. 2), что введение в электродный пек категории Б добавок продуктов ТО со сниженным выходом летучих веществ X приводит к уменьшению этого параметра в конечном продукте. Частичное снижение значения

X может быть следствием предварительной термической обработки во время приготовления смесового состава. Введение добавок в электродный пек категории Б в виде продуктов ТО приводит к увеличению содержания α - и α_1 -фракций в конечном продукте, что увеличивает параметр K.

На рис. 2 представлена зависимость выхода карбонизата от выхода летучих веществ. Во время термической обработки при температуре 250 °С происходит отделение легких компонентов, что приводит к уменьшению значения X (рис. 2, кривая 1). При нагреве до 250 °С уменьшение выхода летучих веществ X с 54,3 до 50,2 % не повлияло на изменение параметра K (рис. 2, кривая 1), термостатирование в течение 30 мин при рассматриваемой температуре приводило к уменьшению значения X до 49,2 % и увеличению величины K на 3 % (рис. 2, кривая 2). Можно предположить, что реакции полимеризации, проходящие при термостатировании, могли увеличить выход карбонизата.

Выводы

Показано, что термическое окисление электродного пека категории В увеличивает выход карбонизата. Увеличение добавки в электродный пек категории Б с 12,0 до 31,6 % в виде высокоплавкого пека ВПП повышает выход карбонизата с 54,3 до 60,0 %. Повышение температуры термической обработки электродного пека Б с 250 до 350 °С увеличивает выход карбонизата до 58 %.

Выход летучих веществ электродного пека категории Б в зависимости от температуры и способа термической обработки**Table 3. The yield of volatile substances of the electrode pitch of category B depends on the temperature and the method of heat treatment**

T, °С	X, %	
	Без выдержки	Выдержка 30 мин
250	50,2	49,2
300	48,9	48,0
350	48,4	47,8

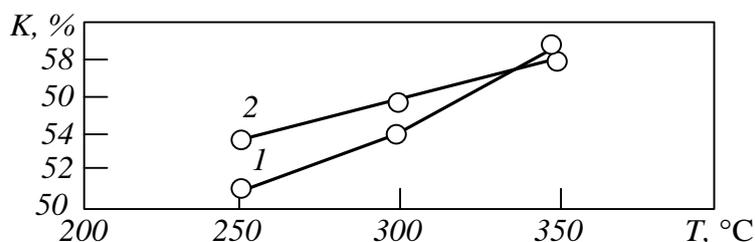


Рис. 1. Зависимость выхода карбонизата от температуры термической обработки пека категории Б:
1 – нагрев пека; 2 – нагрев пека с термостатированием 30 мин

Fig. 1. Dependence of the yield of carbonizate on the temperature of the heat treatment of the pitch of category B:
1 – heating of the pitch; 2 – heating of the pitch with thermostating duration of 30 minutes

Список литературы

1. Привалов В.Е., Степаненко М.А. *Каменно-угольный пек*. Москва: Металлургия. 1981:208.
2. Мальцева Л.Д., Гайсаров М.Г., Мочалов В.В. Исследование свойств пеков и их групповых составляющих. *Кокс и химия*. 1980;8:33–36.
3. Юркевич Я., Росиньский С. *Углекимия*. Москва: Металлургия. 1973:360.
4. Кекин Н.А., Степан А.А. О данных хроматографического анализа и составе каменно-угольных пеков. *Кокс и химия*. 1986;1:30–34.
5. Уткин Ю.А., Янко Э.А., Соловейчик Э.Я., Страхов В.М. Об оценке качества каменно-угольного пека как связующего в производстве анодов. *Кокс и химия*. 2012;9:17–21.
6. Rani S., Kumari K., Kumar P., Sanjay R. Dhakate S.R., Kumari S. Enhancing spinnability and properties of carbon fibers through modification of isotropic coal tar pitch precursor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2024;181:106566. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106566>.
7. Yang P.J., Li T.H., Li H., Dang A.L., Yuan L. Effect of coal tar pitch modification on the structure and char yield of pyrolysis epoxy resin carbons. *Diamond and Related Materials*. 2023;137:110099. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110099>.
8. Fu S., Yang T., Song Y., Tian X., Wang C., Ma Z., Wu J., Li Z. Effect of iodine treatment on structural and electrochemical performance of coal tar pitch based carbon materials for sodium ion batteries. *Applied Surface Science*. 2024;657:159731. <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2024.159731>.
9. Liu S, Wang L., Li X., Xue C. Coal tar pitch derived N-doped mesoporous carbon through «carbonization in air» strategy for high performance supercapacitor electrode. *Journal of Alloys and Compounds Available online*. 2024:175364. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175364>.
10. Sun W., Sun Q., Lu R. et al. Sodium hypophosphite-assist pyrolysis of coal pitch to synthesis P doped carbon nanosheet anode for ultrafast and long-term cycling sodium-ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;889:161678. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161678>.

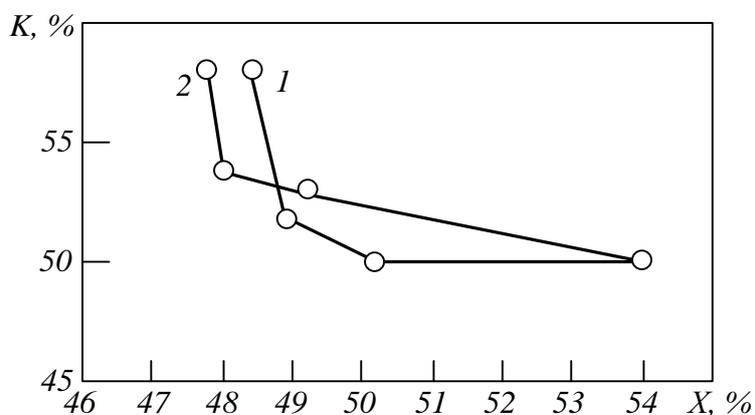


Рис. 2. Зависимость выхода карбонизата от выхода летучих веществ для пека категории Б после термической обработки:
1 – нагрев пеков; 2 – нагрев пека с термостатированием 30 мин

Fig. 2. Dependence of the yield of carbonizate on the yield of volatile substances for category B pitch after heat treatment:
1 – heating of the pitches; 2 – heating of the pitch with thermostating for 30 minutes

11. Zhao J., Zuo X., Long X., Cui Z., Yuan G., Dong Z., Zhang J., Cong Y., Li X. Accelerating the oxidative stabilization of pitch fibers and improving the physical performance of carbon fibers by modifying naphthalene-based mesophase pitch with C9 resin. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021;154:105009.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.105009>.
12. Чистяков А.Н. Кинетика термического и термоокислительного превращения каменноугольного пека. *Кокс и химия*. 1978;11:38–40.
13. Ковалев Р.Ю., Наймушина Т.М., Никитин А.П. Термообработка среднетемпературных электродных каменноугольных пеков. В кн.: *Материалы во внешних полях. Труды XII Международного онлайн-симпозиума*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. 2024:88–90.
14. Галигузов А.А., Малахо А.П., Авдеев В.В., Rogozin A.D. Сравнительные характеристики каменноугольных пеков: качественный анализ, стабильность свойств при хранении и термическая стабильность. *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2015;5(12):55–57.
15. Xiaojun L., Jian X., Yanqing L., Jie L., Zhao F., Yan S., Yexiang L. Effects of pitches modification on properties of TiB₂-C composite cathodes. *Magnesium Technology*. 2009:1–5.
16. Lü X.-J., Xu J., Li J., Lai Y.-Q., Liu Y.-X. Thermal-Treated Pitches as Binders for TiB₂/C Composite Cathodes. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2012;43:219–227.
<https://doi.org/10.1007/s11661-011-0821-x>.
17. Сидоров О.Ф. Современные представления о процессе термоокисления каменноугольных пеков. Часть 1. Механизм взаимодействия кислорода с углеводородами пека. *Кокс и химия*. 2002;9:35–43.
18. Сидоров О.Ф. Современные представления о процессе термоокисления каменноугольных пеков. Часть 3. Влияние условий окисления на характер термохимических превращений и структуру пека. *Кокс и химия*. 2004;6:24–30.
19. Kovalev R.Yu., Gavriljuk O.M., Nikitin A.P., Ismagilov Z.R. Thermal Oxidation of Electrode Coal Pitch. *Coke and Chemistry*. 2023;66(7):351–354.
<https://doi.org/10.3103/S1068364X23700941>.
20. Мочалов В.В. Особенности структуры каменноугольных электродных пеков. В кн.: *Сырьевые материалы электродного производства*. Москва: НИИГрафит. 1986:5–19.
21. Choia K.H., Lee S.-Y., Hong I., Son S., An J.-C., Kim S. Molecular-level investigation of coal-tar pitch treated by air blowing: Revealing the restructure of aromatic compounds via radical reaction. *Carbon*. 2023;203:377–385.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.11.022>.
22. Гаврилюк О. М., Ковалев Р.Ю., Исмагилов З.Р. Отработка технологии получения высоко-температурного пека. В кн.: *ХимРеактор-25. Сб. тезисов XXV международной конференции по химическим реакторам*. Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. 2023:306–307.
23. Yuan G., Xue Z., Cui Z., Westwood A., Dong Z., Cong Y., Zhang J., Zhu H., Li X. Constructing the Bridge from Isotropic to Anisotropic Pitches for Preparing Pitch-Based Carbon Fibers with Tunable Structures and Properties. *ACS Omega*. 2020;5(3):21948–21960.
<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03226>
24. Ковалев Р.Ю., Наймушина Т.М. Термообработка электродного пека. В кн.: *Материалы во внешних полях. Труды XII Международного онлайн-симпозиума*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. 2024:92–94.
25. Гайсаров М.Г., Мальцев Л.Д., Мочалов В.В. О природе α₁-фракции пека и ее влиянии на качество углеродистых изделий. *Кокс и химия*. 1981;10:37–39.
26. Twigg A.N. Relationship between chemical structure and secondary quinoline insoluble formation in electrode binder pitches. *Fuel*. 1987;66(11):1540–1543.
[https://doi.org/10.1016/0016-2361\(87\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(87)90015-9)
27. Kumari K., Rani S., Kumar P., Prakash S., Dhakate S.R., Kumari S. Study of mesophase pitch based carbon fibers: Structural changes as a function of anisotropic content. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2023;171:105961.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105961>.
28. Lia L., Lina X., Zharga Y., Daib J., Dua D., Wanga Y. Characteristics of the mesophase and needle coke derived from the blended coal tar and biomass tar pitch. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2020;150:104889.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104889>.
29. Montes-Moránab M.A., Crespoa J.L., Youngb R.J., Garciaa R., Moineo S.R. Mesophase from a coal tar pitch: a Raman spectroscopy study. *Fuel Processing Technology*. 2002;77-78:207–212.
[https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00079-6)
30. Lewis I. Chemistry of carbonization. *Carbon*. 1982.20:519–529.
[https://doi.org/10.1016/0008-6223\(82\)90089-6](https://doi.org/10.1016/0008-6223(82)90089-6)

REFERENCES

1. Privalov V.E., Stepanenko M.A. *Coal pitch*. Moscow: Metallurgya, 1981:208. (In Russ.).
2. Maltseva L.D., Gaisarov M.G., Mochalov V.V. Investigation of the properties of pitches and their group components. *Koks i khimiya*. 1980;8:33–36. (In Russ.).

3. Yurkevich Ya., Rosinsky S. *Coal chemistry*. Moscow: Metallurgiya, 1973:360. (In Russ.).
4. Kekin N.A., Stepan A.A. On chromatographic analysis data and composition of coal pitches. *Koks i khimiya*. 1986;1:30–34. (In Russ.).
5. Utkin Yu. A., Yanko E.A., Soloveitchik E.Ya., Strakhov V.M. On the assessment of the quality of coal pitch as a binder in the production of anodes. *Koks i khimiya*. 2012;9:17–21. (In Russ.).
6. Rani S., Kumari K., Kumar P., Sanjay R. Dhakate S.R., Kumari S. Enhancing spinnability and properties of carbon fibers through modification of isotropic coal tar pitch precursor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2024;181:106566. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106566>.
7. Yang P.J., Li T.H., Li H., Dang A.L., Yuan L. Effect of coal tar pitch modification on the structure and char yield of pyrolysis epoxy resin carbons. *Diamond and Related Materials*. 2023;137:110099. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110099>
8. Fu S., Yang T., Song Y., Tian X., Wang C., Ma Z., Wu J., Li Z. Effect of iodine treatment on structural and electrochemical performance of coal tar pitch based carbon materials for sodium ion batteries. *Applied Surface Science*. 2024;657:159731. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159731>.
9. Liu S, Wang L., Li X., Xue C. Coal tar pitch derived N-doped mesoporous carbon through «carbonization in air» strategy for high performance supercapacitor electrode. *Journal of Alloys and Compounds Available online*. 2024:175364. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175364>.
10. Sun W., Sun Q., Lu R. et all. Sodium hypophosphate-assist pyrolysis of coal pitch to synthesis P doped carbon nanosheet anode for ultrafast and long-term cycling sodium-ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;889:161678. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161678>.
11. Zhao J., Zuo X., Long X., Cui Z., Yuan G., Dong Z., Zhang J., Cong Y., Li X. Accelerating the oxidative stabilization of pitch fibers and improving the physical performance of carbon fibers by modifying naphthalene-based mesophase pitch with C9 resin. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021;154:105009. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.105009>.
12. Chistyakov A.N. Kinetics of thermal and thermo-oxidative pre-rotation of coal tar. *Koks i khimiya*. 1978;11:38–40. (In Russ.).
13. Kovalev R.Yu., Naimushina T.M., Nikitin A.P. Heat treatment of medium-temperature electrode coal pitches. In: *Materials in external fields. Proceedings of the XII International Online Symposium*. Novokuznetsk: Its SibGIU. 2024:88–90. (In Russ.).
14. Galiguzov A.A., Malakho A.P., Avdeev V.V., Rogozin A.D. Comparative characteristics of coal pitches: qualitative analysis, stability of properties during storage and thermal stability. News of higher educational institutions. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2015;5(12):55–57. (In Russ.).
15. Xiaojun L., Jian X., Yanqing L., Jie L., Zhao F., Yan S., Yexiang L. Effects of pitches modification on properties of TiB₂-C composite cathodes. *Magnesium Technology*. 2009:1–5.
16. Lü X.-J., Xu J., Li J., Lai Y.-Q., Liu Y.-X. Thermal-Treated Pitches as Binders for TiB₂/C Composite Cathodes. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2012;43:219–227. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0821-x>.
17. Sidorov, O.F. Modern ideas about the process of thermal oxidation of coal pitches. Part 1. The mechanism of interaction of oxygen with pitch hydrocarbons. *Koks i khimiya*. 2002;9:35–43. (In Russ.).
18. Sidorov O.F. Modern ideas about the process of thermal oxidation of coal pitches. Part 3. The influence of oxidation conditions on the nature of thermochemical transformations and the structure of pitch. *Koks i khimiya*. 2004;6:24–30. (In Russ.).
19. Kovalev R.Yu., Gavriljuk O.M., Nikitin A.P., Ismagilov Z.R. Thermal Oxidation of Electrode Coal Pitch. *Coke and Chemistry*. 2023;66(7):351–354. <https://doi.org/10.3103/S1068364X23700941>.
20. Mochalov V.V. Features of the structure of carboniferous electrode pitches. In: *Collection of works. Raw materials of electrode production*. Moscow: Niigraphit. 1986:5–19. (In Russ.).
21. Choia K.H, Lee S-Y., Hong I., Son S., An J-C., Kim S. Molecular-level investigation of coal-tar pitch treated by air blowing: Revealing the restructure of aromatic compounds via radical reaction. *Carbon*. 2023;203:377–385. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.11.022>.
22. Gavriljuk O. M., Kovalev R.Yu., Ismagilov Z.R. Development of the technology of high-temperature pitch production. In: *Chemreaktor-25: Collection of abstracts of the XXV International Conference on Chemical reactors*. G.K. Borekov Institute of Catalysis SB RAS. 2023:306–307. (In Russ.).
23. Yuan G., Xue Z., Cui Z., Westwood A., Dong Z., Cong Y., Zhang J., Zhu H., Li X. Constructing the Bridge from Isotropic to Anisotropic Pitches for Preparing-Pitch-Based Carbon Fibers with Tunable Structures and Properties. *ACS Omega*. 2020;5(34):21948–21960. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03226>

24. Kovalev R.Yu., Naimushina T.M. Heat treatment of electrode pitch. In: *Materials in External fields: Proceedings of the XII International Online Symposium*. ITs SibGIU, 2024:92–94. (In Russ.).
25. Gaisarov M.G., Maltsev L.D., Mochalov V.V. On the nature of the α 1-fraction of pitch and its effect on the quality of carbonaceous products. *Koks i khimiya*. 1981;10:37–39. (In Russ.).
26. Twigg A.N. Relationship between chemical structure and secondary quinoline insoluble formation in electrode binder pitches. *Fuel*. 1987;66(11):1540–1543. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(87\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(87)90015-9).
27. Kumari K., Rani S., Kumar P., Prakash S., Dhakate S.R., Kumari S. Study of mesophase pitch based carbon fibers: Structural changes as a function of anisotropic content. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2023;171:105961. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105961>.
28. Lia L., Lina X., Zharga Y., Daib J., Dua D., Wanga Y. Characteristics of the mesophase and needle coke derived from the blended coal tar and biomass tar pitch. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2020;150:104889. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104889>.
29. Montes-Moránab M.A., Crespoa J.L., Youngb R.J., Garciaa R., Moineo S.R. Mesophase from a coal tar pitch: a Raman spectroscopy study. *Fuel Processing Technology*. 2002;77–78: 207–212. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00079-6)
30. Lewis I. Chemistry of carbonization. *Carbon*. 1982.20:519–529. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(82\)90089-6](https://doi.org/10.1016/0008-6223(82)90089-6)

Сведения об авторах

Родион Юрьевич Ковалев, к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории термических превращений угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

E-mail: Kovaleviuhm@yandex.ru
ORCID: 0009-0001-7776-7440
SPIN-код: 8244-8479

Андрей Павлович Никитин, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории термических превращений угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

E-mail: nikitinandrey@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-2187-2281
SPIN-код: 2980-7637

Information about the authors

Rodion Yu. Kovalev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher at the Laboratory of Thermal Coal Conversions. Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS

E-mail: Kovaleviuhm@yandex.ru
ORCID: 0009-0001-7776-7440
SPIN-код: 8244-8479

Andrey P. Nikitin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior researcher at the Laboratory of Thermal Coal Conversions. Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS

E-mail: nikitinandrey@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-2187-2281
SPIN-код: 2980-7637

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 28.10.2024
 После доработки 11.11.2024
 Принята к публикации 20.11.2024

Received 28.10.2024
 Revised 11.11.2024
 Accepted 20.11.2024

Оригинальная статья

УДК 621.794.61

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-72-84

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ МИКРОДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИАТОМИТА С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

© 2025 г. А. Д. Кашин, М. Б. Седельникова, М. А. Химич, П. В. Уваркин, Н. А. Лугинин, К. В. Иванов

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

Аннотация. Рассмотрено влияние обработки низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками (НСЭП) на структуру и свойства керамикоподобных покрытий на основе диатомита с добавлением частиц оксидов циркония или титана. В качестве материала подложки использовали биорезорбируемый магниевый сплав МА2-1пч. Для нанесения покрытий применяли метод микродугового оксидирования (МДО). В качестве основного вещества для синтезирования покрытий использовали диатомит – органогенный материал на основе оксида кремния (SiO_2), состоящий из панцирей одноклеточных диатомовых водорослей. Поверхность сформированных покрытий подвергали импульсному воздействию электронного пучка с различной плотностью энергии – 2,5; 5,0 и 7,5 Дж/см². Полученные покрытия были исследованы с помощью методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС), рентгеновской дифрактометрии, скретч-тестирования и потенциодинамической поляризации. Исследованы внутренняя структура и морфология поверхности, фазовый и элементный составы, а также адгезионная прочность и коррозионная стойкость обработанных покрытий. В результате облучения поверхность покрытий претерпела значительные изменения (сформировалась уникальная морфология, характеризующаяся гладкими возвышениями и пористыми углублениями). Установлено, что обработка поверхности покрытий с частицами ZrO_2 способствовала повышению их адгезионной прочности и коррозионной стойкости, так как критическая нагрузка увеличилась с 9,5 (для исходного покрытия) до 18 Н (для покрытия, подвергнутого НСЭП-обработке с плотностью энергии 7,5 Дж/см²), а плотность тока коррозии уменьшилась с $7,53 \cdot 10^{-7}$ до $1,12 \cdot 10^{-8}$ А/см². Для покрытий с частицами оксида TiO_2 наблюдалась обратная зависимость: после обработки НСЭП прочностные и коррозионные свойства ухудшались, что связано с различными теплофизическими свойствами оксидов циркония и титана.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, биорезорбируемые магниевые имплантаты, диатомит, низкоэнергетические сильноточные электронные пучки, механические свойства, коррозионная стойкость

Благодарности: Коллектив авторов выражает искреннюю благодарность А.И. Толмачеву за помощь в подготовке образцов для проведения экспериментальных исследований. Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Нанотех» ИФПМ СО РАН.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 23-29-00141, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00141/>

Для цитирования: Кашин А.Д., Седельникова М.Б., Химич М.А., Уваркин П.В., Лугинин Н.А., Иванов К.В. Модификация поверхности микродуговых покрытий на основе диатомита с помощью импульсного электронного облучения. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):72–84. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-20251\(51\)-72-84](http://doi.org/10.57070/2304-4497-20251(51)-72-84)

Original article

SURFACE MODIFICATION OF DIATOMITE-BASED MICRO-ARC COATINGS USING PULSED ELECTRON BEAM IRRADIATION

© 2025 A. D. Kashin, M. B. Sedelnikova, M. A. Khimich, P. V. Uvarkin, N. A. Luginin, K. V. Ivanov

Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (2/4 Akademicheskii Ave., Tomsk, Tomsk Region, 634055, Russian Federation)

Abstract. The influence of low-energy high-current electron beam (LEHCEB) treatment on the structure and properties of ceramic-like coatings based on diatomite with the addition of zirconium or titanium oxide particles was investigated. The bioresorbable Mg alloy MA2-1hp was used as the substrate material. For coating application, the micro-arc oxidation (MAO) method was used. Diatomite, an organogenic material based on silicon oxide (SiO_2) consisting of the shells of unicellular diatom algae, was used as the main substance for synthesizing the coatings. The surface of the synthesized coatings was subjected to pulsed electron beam irradiation with different energy densities: 2.5, 5 and 7.5 J/cm². The obtained coatings were investigated by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffractometry, scratch testing and potentiodynamic polarization. The internal structure and surface morphology, phase and elemental compositions, as well as adhesion strength and corrosion resistance of the treated coatings were studied. As a result of irradiation, the surface of the coatings underwent significant changes, forming a unique morphology characterized by smooth elevations and porous depressions. It was found that surface treatment of coatings with ZrO_2 particles contributed to the increase of their adhesion strength and corrosion resistance, since the critical load increased from 9.5 (for the original coating) to 18 N (for the coating subjected to LEHCEB-treatment with an energy density of 7.5 J/cm²), and the corrosion current density decreased from $7.53 \cdot 10^{-7}$ to $1.12 \cdot 10^{-8}$ A/cm². For coatings with TiO_2 particles, the opposite dependence was observed after LEHCEB treatment, the strength and corrosion properties deteriorated, which is related to the different thermophysical properties of zirconium and titanium oxides.

Keywords: micro-arc oxidation, bioresorbable magnesium implants, diatomite, low-energy high-current electron beams, mechanical properties, corrosion resistance

Acknowledgements: The authors express their sincere gratitude to A.I. Tolmachev for help in preparing samples for experimental studies. The investigations have been carried out using the equipment of the Share Use Centre “Nanotech” of the ISPMS SB RAS.

Funding: The research was funded by the Russian Science Foundation, grant no. 23-29-00141, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00141/>

For citation: Kashin A.D., Sedelnikova M.B., Khimich M.A., Uvarkin P.V., Luginin N.A., Ivanov K.V. Modification of the surface of microarc coatings based on diatomite by pulsed electron irradiation. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):72–84. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-72-84](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-72-84)

Введение

Биодеградируемые магниевые сплавы становятся все более популярными для создания медицинских имплантатов, применяемых в травматологии, ортопедии, челюстно-лицевой хирургии. Сплавы на основе магния вызывают большой интерес ввиду их способности растворяться в человеческом организме, не выделяя при этом токсичных элементов [1 – 5]. Ортопедические имплантаты такого типа, используемые в качестве временных фиксаторов, не только осуществляют механическую поддержку, но и инициируют и стимулируют регенерацию клеток костной ткани [6; 7]. Магний является одним из важнейших макроэлементов, участвующим в углеводном обмене, биосинтезе белков, а также благотворно влияющим на рост костной ткани [8; 9]. Однако, для магния характерна высокая электрохимическая активность, что делает его подверженным коррозионному воздействию агрессивных сред

(внутренняя среда организма). Слишком быстрое растворение магния в организме человека сопровождается выделением большого количества водорода, что может являться причиной алкалоза ($\text{pH} \uparrow$) в месте имплантации, а также инициировать воспалительные процессы в окружающих тканях [10; 11].

Во избежание подобного рода осложнений в настоящей работе предлагается модификация поверхности имплантата методом микродугового оксидирования (МДО) – плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО). Рассматриваемый метод основывается на способности вентильных металлов (Al, Nb, Ta, Ti, Zr, Hf, W, Bi, Sb, Be, Mg, U) образовывать на поверхности оксидную пленку, характеризующуюся асимметричной проводимостью [12; 13]. При достижении критического значения разности потенциалов между подложкой и электролитом происходит пробой рассматриваемой пленки, сопровождающийся

образованием микродуговых разрядов. Воздействие микроразрядов приводит к интенсивному плавлению и взаимодействию вещества электролита с материалом обрабатываемого металла, в результате чего на его поверхности синтезируется пористое керамикоподобное покрытие [14; 15].

Наиболее популярными материалами для синтеза микродуговых покрытий являются трикальцийфосфат (ТКФ) и гидроксипатит (ГА), приближенные по своему минеральному составу к кортикальной кости человека. Однако, несмотря на их широкое применение, рассматриваемые материалы имеют определенные недостатки: обладают сравнительно низкой скоростью биодеградации, относительно низкой регенеративной активностью в отношении костных тканей при *in vivo* имплантации [16]. Ввиду вышесказанного, все большее распространение в области медицинского материаловедения приобретают покрытия на основе силикатных соединений: волластонита (CaSiO_3), окерманита ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$), силикатов магния (MgSiO_3 , Mg_2SiO_4), цинка (Zn_2SiO_4) и другие [17 – 21].

В настоящей работе в качестве основного материала для синтезируемых покрытий использовали диатомит – органогенный материал на основе оксида кремния SiO_2 , состоящий из скелетов (панцирей) одноклеточных диатомовых водорослей [22]. Такой выбор был обоснован биологическим происхождением и широкой доступностью диатомита, что делает его привлекательным материалом для создания биосовместимых покрытий [23].

Пористая структура покрытий, формирующаяся в результате микродуговых разрядов в ходе процесса МДО, а также усадочные трещины, образующиеся вследствие сравнительно быстрого охлаждения покрытия после окончания процесса, оказывают негативное влияние на механические свойства покрытий и их коррозионную стойкость. В связи с этим, в настоящей работе рассмотрен метод модификации поверхности синтезированных покрытий низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками (НСЭП) с различной плотностью энергии [24; 25]. Проведенные ранее исследования показывают, что облучение поверхностного слоя материала способствует гомогенизации его структуры, улучшает прочностные и коррозионные свойства [26]. Варьирование плотности энергии электронного пучка позволяет контролировать и регулировать свойства обрабатываемых покрытий.

Основной целью настоящей работы является изучение влияния НСЭП-обработки поверхности микродуговых покрытий на основе диатомита и частиц оксидов ZrO_2 или TiO_2 при варьировании плотности энергии электронных пучков на механические свойства и коррозионную стойкость покрытий.

Методы и принципы исследования

В качестве материала подложки использовали магниевый сплав МА2-1пч (ОАО «ВИЛС», Москва, Россия). Образцы сплава $10 \times 10 \times 1$ мм были получены методом электроэрозионной резки. Для синтеза микродуговых покрытий были подготовлены электролиты-суспензии, включающие в себя следующие компоненты: NaOH , NaF , Na_2SiO_3 , диатомит ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), а также ZrO_2 или TiO_2 . Покрытия синтезировали с использованием установки Micro-Arc 3.0 (ИФПМ СО РАН, Томск, Россия) в потенциостатическом режиме при следующих технологических параметрах: импульсное напряжение 400 В, длительность импульса 350 мкс, частота следования импульсов 60 Гц, длительность процесса 5 мин. Последующую обработку поверхности полученных покрытий низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками (НСЭП) осуществляли с помощью установки РИТМ-ИЗ (ИСЭ СО РАН, Томск, Россия). Энергия электронов пучка составляла 30 кэВ, длительность импульса – 2 мкс, частота импульсов – 0,2 Гц, количество импульсов – 5. Требуемую плотность энергии электронного пучка, учитывая теплофизические параметры основных кристаллических фаз покрытий [25], рассчитывали по следующему уравнению:

$$W_h = \rho c_p l_m (T_m - T_0), \quad (1)$$

где W_h – плотность энергии электронного пучка, необходимая для нагрева поверхностного слоя толщиной l_m до температуры плавления T_m ; ρ – плотность материала; c_p – удельная теплоемкость материала; $T_0 = 20$ °С – исходная температура обрабатываемого образца.

По результатам предварительных расчетов было подобрано три уровня плотности энергии (2,5; 5,0 и 7,5 Дж/см²) электронных пучков.

Изменение морфологии поверхности покрытий после НСЭП-обработки было проанализировано методом сканирующей электронной микроскопии (LEO EVO 50, Carl Zeiss AG, Оберкохен, Германия). Химический состав покрытий был исследован с помощью энергодисперсионного безазотного спектрометра INCA x-Act (Oxford Instruments, Абингдон, Великобритания). Идентификацию кристаллических фаз и степени кристалличности покрытий осуществляли рентгенодифрактометрическим методом (ДРОН-7, ИЦ Буревестник, Санкт-Петербург, Россия) при следующих параметрах съемки: диапазон углов 2θ от 5 до 90°; шаг сканирования 0,02°; кобальтовое $\text{CoK}\alpha$ излучение $\lambda = 0,17902$ нм. Адгезионную прочность покрытий к магниевой подложке определяли ме-

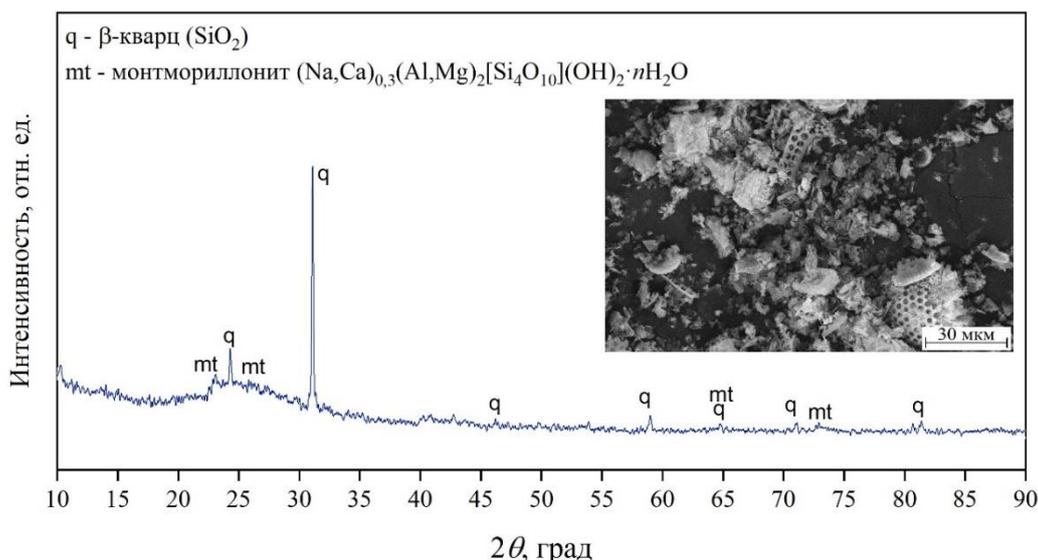


Рис. 1. Фазовый состав и морфология исходного порошка диатомита
Fig. 1. Phase composition and morphology of initial diatomite powder

тодом скретч-тестирования (Revetest RST, CSM Instruments Inc, Нидэм, США) с помощью индентора по Роквеллу диаметром 200 мкм при прогрессирующем типе нагрузки ($F_{\max} = 30$ Н). Длина трека составляла 5 мм, для каждого образца проводили не менее трех испытаний. Устойчивость образцов к коррозии определяли методом потенциодинамической поляризации с помощью импульсного потенциостата-гальваностата Р-40Х (Electrochemical Instruments, Черноголовка, Россия). В качестве рабочей среды для проведения электрохимических испытаний использовали изотонический 0,9 %-ый раствор хлорида натрия (NaCl). С целью моделирования условий внутренней среды человеческого организма в процессе исследования поддерживали постоянную температуру 37 °С.

Результаты и их обсуждение

Основным компонентом электролитов, используемых в работе для синтеза покрытий методом МДО, является диатомит (диатомовая земля, кизельгур) – осадочная горная порода, образованная кремнистыми панцирями (фрустулами) одноклеточных микроводорослей (диатомей). Фрустулы состоят преимущественно из гидратов кремнезема различной степени водосодержания ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). На рис. 1 представлены дифрактограмма и СЭМ-изображение исходного порошка диатомита. В состав электролитов в качестве дисперсной фазы вводили частицы оксидов циркония или титана для улучшения эксплуатационных характеристик получаемых покрытий [23; 27].

На рис. 2 представлены СЭМ-изображения поверхности исходных и обработанных НСЭП покрытий обоих типов. Можно наблюдать, что исходные, необработанные покрытия с частицами оксида ZrO_2 отличаются более развитым рельефом и большим количеством нерасплавленных частиц по сравнению с TiO_2 -содержащими покрытиями. Такое расхождение связано с различиями в теплофизических свойствах этих оксидов. Температура плавления $T_{\text{пл}}$ оксида ZrO_2 составляет 2715 °С, для оксида TiO_2 $T_{\text{пл}} = 1843$ °С. Кроме того, теплопроводность оксида циркония, составляющая 1,4 Вт/(м·°С), значительно ниже, чем теплопроводность оксида титана (8 Вт/(м·°С)). В связи с этим оксид титана лучше передает тепло окружающему веществу в ходе процесса МДО, что приводит к более активному его плавлению и, как следствие, формированию сплошного матрикса покрытия, содержащего небольшое количество нерасплавленных частиц. В результате обработки НСЭП покрытий их морфология поверхности значительно меняется. Пучок электронов расплавляет поверхностные структурные элементы покрытий (обломки фрустул диатомей и частицы оксидов циркония и титана), что приводит к формированию более гладкого и гомогенизированного рельефа. Для покрытий с частицами обоих видов при увеличении плотности энергии электронного пучка до 5 Дж/см² наблюдается уменьшение количества усадочных трещин на поверхности. Дальнейшее повышение плотности энергии приводит к локальному проплавлению слоя покрытия до подложки (рис. 2, желтая стрелка).

Отдельно необходимо отметить влияние

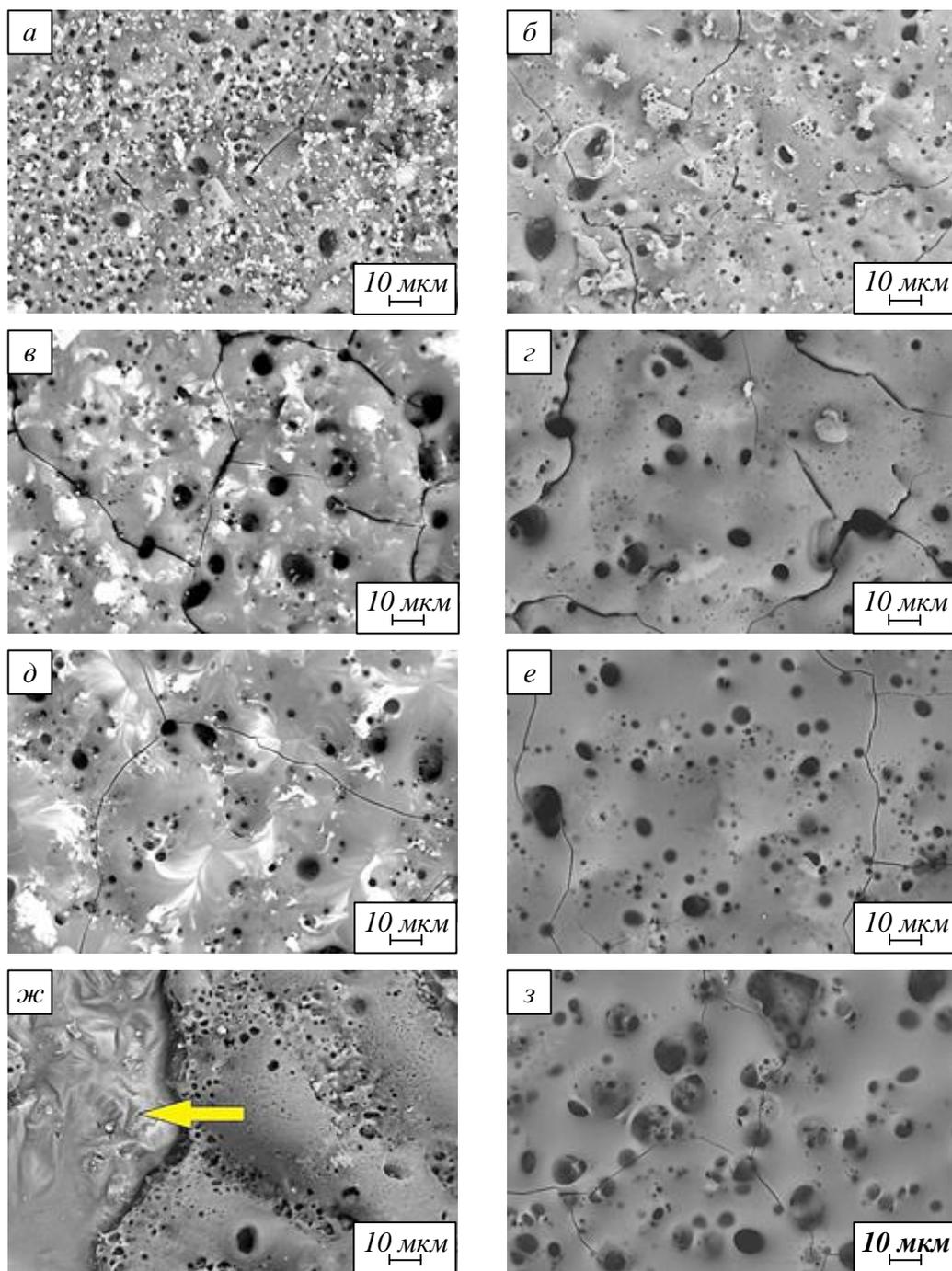


Рис. 2. СЭМ-изображения покрытий с частицами оксидов ZrO_2 (а, в, д, ж) и TiO_2 (б, з, е, з) до (а, б) и после НСЭП-обработки при плотности энергии электронного пучка 2,5 (б, в), 5,0 (д, е) и 7,5 (ж, з) Дж/см²
 Fig. 2. SEM images of coatings with ZrO_2 (a, в, д, ж) and TiO_2 (б, з, е, з) oxide particles before (a, б) and after LENCEB treatment at electron beam energy densities of 2,5 (б, в), 5,0 (д, е) and 7,5 (б, з, е, з) J/cm²

НСЭП-обработки на поровую структуру исследуемых покрытий. В случае покрытий с частицами оксида ZrO_2 наблюдается уменьшение количества поверхностных пор с увеличением плотности энергии электронного пучка. Для покрытий, содержащих оксид TiO_2 , наблюдается другая закономерность: повышение плотности энергии с 2,5 до 7,5 Дж/см² приводит к коалесценции мелких пор в более крупные, а также к увеличению общего количества поверхностных

пор, что вызвано выделением газообразных продуктов в ходе интенсивного воздействия электронного пучка. Вышеперечисленные факторы оказывают негативное влияние на устойчивость покрытия к коррозионным процессам.

Элементный состав покрытий обоих типов до и после обработки НСЭП был исследован с помощью энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС). Было установлено, что основными элементами в покрытиях являются кислород, кремний

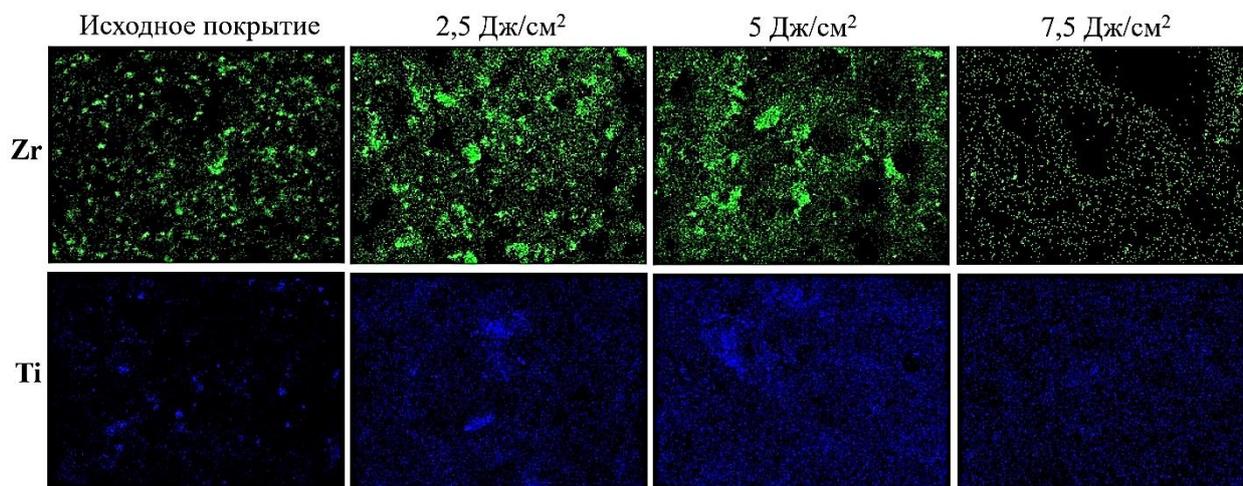


Рис. 3. Распределение циркония и титана в зависимости от плотности энергии НСЭП
Fig. 3. Distribution of zirconium and titanium depending on the energy density of the LENCEB

и магний. Кроме того, на картах распределения элементов цирконий и титан (в зависимости от вида покрытия) присутствуют их локальные скопления, указывающие на наличие нерасплавленных частиц соответствующих им оксидов (рис. 3). Количественное содержание элементов в покрытиях в зависимости от плотности энергии электронного пучка приведено в табл. 1. При обработке покрытий, содержащих оксид ZrO_2 , электронным пучком с плотностью энергии $7,5 \text{ Дж/см}^2$ количественное содержание магния резко возрастает, а кислорода и кремния – уменьшается. Это связано с уменьшением толщины слоя покрытия вплоть до полного проплавления его локальных участков, что коррелируется с микрофотографиями на рис. 2, ж. Уменьшение концентрации циркония при повышении плотности энергии НСЭП связано с расплавлением оксидных частиц, находящихся на поверхности покрытий. В результате воздействия электронного пучка на покрытия с частицами оксида TiO_2 количественное содержание магния и кремния увеличивается, а титана – незначительно уменьшается.

Анализ фазового состава покрытий показал, что основными кристаллическими фазами в покрытиях являются форстерит (Mg_2SiO_4) и периклаз (MgO). На дифрактограммах покрытий с частицами оксида ZrO_2 присутствуют пики, относящиеся к оксиду циркония в моноклинной модификации, а на дифрактограммах покрытий с частицами оксида TiO_2 наблюдаются рефлексы, относящиеся к рутилу и анатазу. При обработке покрытий, содержащих оксид ZrO_2 , электронным пучком с плотностью энергии $7,5 \text{ Дж/см}^2$ на дифрактограмме наблюдаются слабые рефлексы фторида магния (MgF_2), формирующегося в первые секунды процесса МДО в переходном оксидном слое покрытия. В покрытиях с частицами оксида TiO_2 наблюдается кристаллическая фаза метасиликата магния ($MgSiO_3$) в форме клиноэнстатита, образовавшаяся в результате плазмохимического взаимодействия компонентов электролита и вещества подложки (рис. 4):



Т а б л и ц а 1

Элементный состав покрытий в зависимости от плотности энергии НСЭП
Table 1. Elemental composition of coatings in relation to LENCEB energy density

Элемент	Содержание, %, основных элементов при плотности энергии, Дж/см ² , для оксида							
	ZrO ₂				TiO ₂			
	0	2,5	5,0	7,5	0	2,5	5,0	7,5
O	64,4 ± 0,9	64,5 ± 0,8	64,5 ± 1,1	33,3 ± 0,9	64,3 ± 0,8	59,7 ± 1,2	63,4 ± 0,8	65,2 ± 1,4
Mg	17,9 ± 0,8	16,7 ± 0,5	16,3 ± 0,9	58,6 ± 1,3	15,0 ± 0,4	12,7 ± 0,8	13,2 ± 0,5	14,2 ± 0,7
Si	13,9 ± 0,5	15,1 ± 0,6	15,9 ± 0,8	7,9 ± 0,3	18,1 ± 0,9	24,8 ± 0,7	21,0 ± 0,5	18,6 ± 0,4
Zr	3,8 ± 0,2	3,7 ± 0,2	3,3 ± 0,8	0,2 ± 0,05	–	–	–	–
Ti	–	–	–	–	2,6 ± 0,2	2,8 ± 0,3	2,4 ± 0,3	2,0 ± 0,3

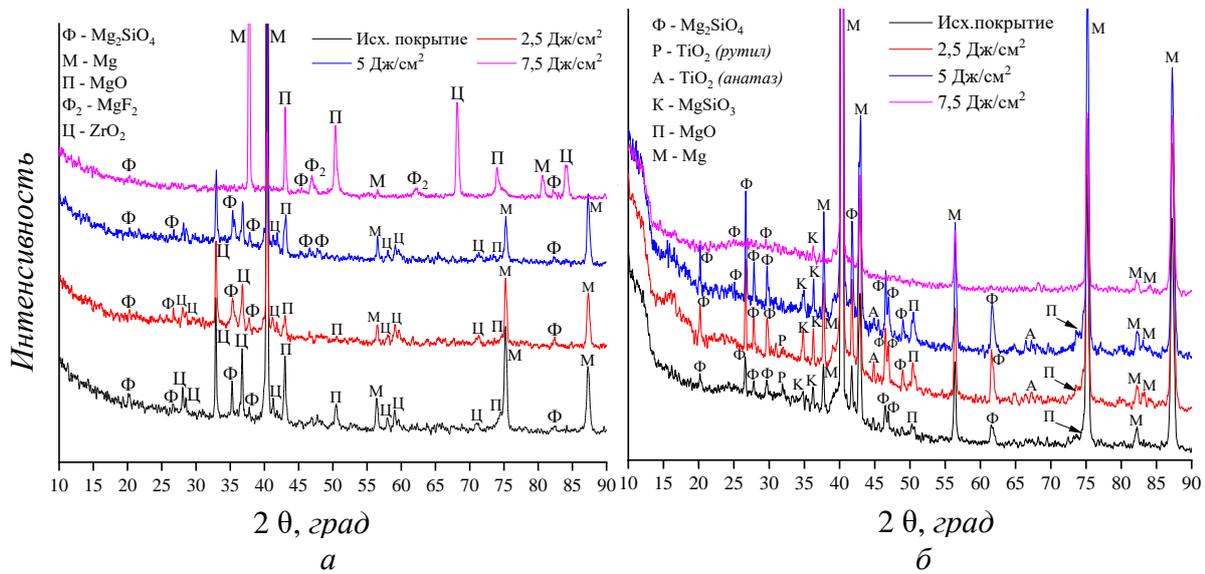


Рис. 4. Диффрактограммы покрытий с частицами оксидов ZrO₂ (а) и TiO₂ (б) до и после НСЭП-обработки с различной плотностью энергии электронного пучка
 Fig. 4. Diffractograms of coatings with ZrO₂ (a) and TiO₂ (b) particles before and after LEHCEB treatment with different electron beam energy densities

Следует отметить наличие на рентгенограммах покрытий рефлексов от магниевой подложки.

Основной целью модификации поверхности исследуемых покрытий является улучшение их механической прочности и коррозионной стойкости. Для защитных покрытий наиболее показательной механической характеристикой является прочность адгезии покрытия к магниевой подложке. В настоящей работе рассматриваемый параметр оценивали методом скретч-тестирования. Проведенные исследования показали, что облучение покрытий с частицами оксида ZrO₂ способствует повышению их адгезионной прочности. Критическая нагрузка увеличивается от 9,5 (для

исходного покрытия) до 18 Н (для покрытия, подвергнутого НСЭП-обработке с плотностью энергии 7,5 Дж/см²) (рис. 5, а).

Для покрытий с оксидом TiO₂ наблюдается более сложная закономерность. Вследствие более плотной внутренней структуры покрытий с частицами оксида TiO₂ их адгезионная прочность изначально была значительно выше, чем для покрытий с частицами оксида ZrO₂. Критическая нагрузка для исходного, необработанного покрытия с оксидом TiO₂ составляло 25,5 Н. Обработка поверхности рассматриваемых покрытий электронным пучком при плотности энергии 2,5 и 5,0 Дж/см² практически не сказывается на адгезионной прочности. Дальнейшее повышение плот-

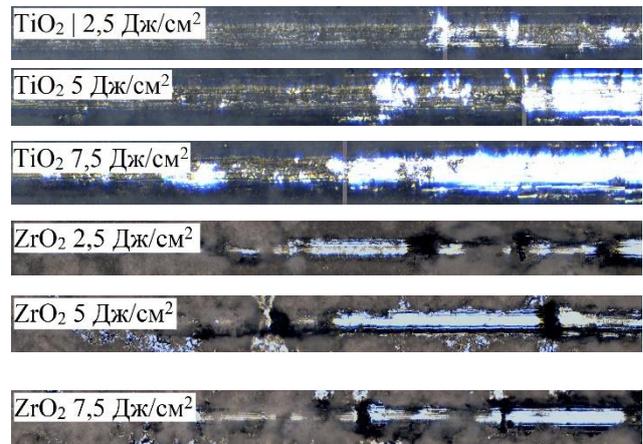
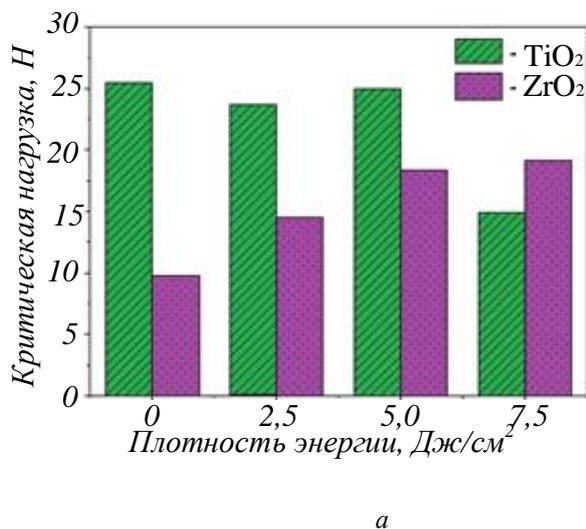


Рис. 5. Гистограммы зависимости критической нагрузки в зависимости от плотности энергии НСЭП (а), оптические микрофотографии треков после скретч-тестирования покрытий (б)

Fig. 5. Histograms of critical load versus LEHCEB energy density (a), optical micrographs of tracks after scratch testing of coatings (b)

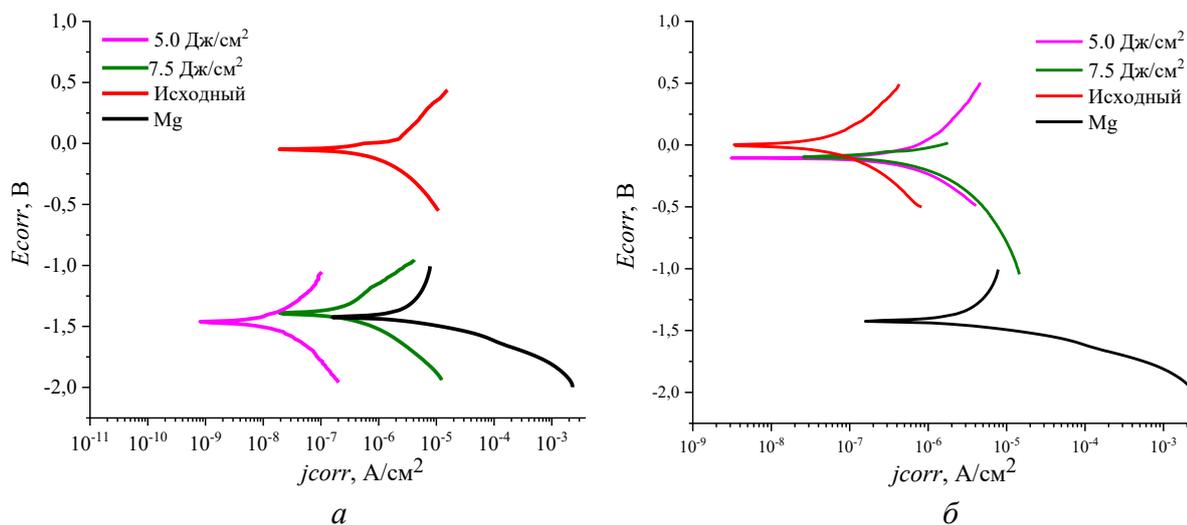


Рис. 6. Потенциодинамические кривые (кривые Тафеля) для образцов исходных и обработанных НСЭП покрытий
Fig. 6. Potentiodynamic curves (Tafel curves) for the samples of initial and LENCEB-treated coatings

ности энергии до $7,5 \text{ Дж/см}^2$ приводит к значительному снижению адгезионной прочности. Критическая нагрузка снижается до 15 Н.

Оптические микрофотографии треков, полученных во время испытаний, приведены на рис. 5, б. Видно, что треки всех видов покрытий характеризуются наличием двух четко отличимых зон: предварительного разрушения и полного отслоения покрытия. Для покрытий с частицами оксида ZrO_2 эти зоны имеют прерывистый характер для всех значений плотности энергии электронного пучка. Это связано с более развитой морфологией рассматриваемого покрытия, а также с присутствием большего количества нерасплавленных частиц оксида циркония на их поверхности.

Для покрытий, содержащих оксид TiO_2 , характер разрушения более однородный и последовательный. Покрытие с частицами оксида TiO_2 , обработанное электронным пучком с плотностью энергии $7,5 \text{ Дж/см}^2$, отличается наименьшей адгезионной прочностью среди всех исследуемых в настоящей работе покрытий. Это связано с процессом коалесценции мелких пор в более крупные, а также с появлением большего количества сквозных пор, проникающих до подложки, в ходе НСЭП-обработки с высокой плотностью энергии электронного пучка.

Методом потенциодинамической поляризации были определены электрохимические параметры покрытий до и после обработки, а также исходного магниевых сплава. Анализ кривых Тафеля, полученных в ходе эксперимента, позволил установить, что для покрытий с оксидом ZrO_2 обработка поверхности электронным пучком при всех значениях плотности энергии повышает их коррозионную стойкость (рис. 6, а). Плотность тока коррозии уменьшилась с $7,53 \cdot 10^{-7}$ до

$1,12 \cdot 10^{-8} \text{ А/см}^2$, в то время как значение поляризационного сопротивления повысилось с $0,91 \cdot 10^4$ до $5,84 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$. Обработка поверхности покрытий с частицами оксида TiO_2 электронным пучком привела к снижению коррозионной стойкости, однако электрохимические параметры исходных покрытий рассматриваемого типа значительно превышали для покрытий с оксидом ZrO_2 . Электрохимические характеристики исследуемых покрытий до и после обработки, а также исходного магниевых сплава приведены в табл. 2.

Выводы

Рассмотрено влияние обработки поверхности биопокрытий для магниевых имплантатов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками. Исследовано влияние электронного облучения с различной плотностью энергии ($2,5$, $5,0$ и $7,5 \text{ Дж/см}^2$) на морфологию, химический и фазовый составы, механические и коррозионные характеристики покрытий, синтезированных методом микродугового оксидирования в электролитах на основе диатомита ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) и частиц оксидов ZrO_2 или TiO_2 .

По результатам проведенных исследований было установлено, что после НСЭП обработки морфология покрытий обоих видов претерпевает значительные изменения. С повышением плотности энергии электронного пучка рельеф покрытий становится менее выраженным, уменьшается количество усадочных микротрещин и нерасплавленных частиц оксидов циркония или титана. Следует отметить, что для покрытий с частицами оксида ZrO_2 изменения являются гораздо более очевидными, так как рассматриваемые покрытия исходном, необлученном состоянии характеризуются более развитым рельефом и содержат

**Электрохимические характеристики образцов с покрытиями до и после
НСЭП-обработки**

**Table 2. Electrochemical characteristics of samples with coatings before and after
LENCEB-treatment**

Образец	E_{corr} , В	J_{corr} , А/см ²	R_p , Ω·см ²
<i>Покрывтия с частицами ZrO₂</i>			
Сплав магния	-1,42	$1,05 \cdot 10^{-5}$	$1,70 \cdot 10^3$
Исходное покрытие	-0,03	$7,48 \cdot 10^{-7}$	$0,91 \cdot 10^4$
После обработки при 5,0 Дж/см ²	-1,17	$1,05 \cdot 10^{-8}$	$5,77 \cdot 10^6$
После обработки при 7,5 Дж/см ²	-1,39	$1,86 \cdot 10^{-7}$	$1,04 \cdot 10^5$
<i>Покрывтия с частицами TiO₂</i>			
Сплав магния	-1,42	$1,05 \cdot 10^{-5}$	$1,71 \cdot 10^3$
Исходное покрытие	-0,02	$4,01 \cdot 10^{-8}$	$1,65 \cdot 10^6$
После обработки при 5,0 Дж/см ²	-0,11	$3,91 \cdot 10^{-7}$	$1,91 \cdot 10^5$
После обработки при 7,5 Дж/см ²	-0,09	$2,31 \cdot 10^{-7}$	$1,54 \cdot 10^5$

большее количество нерасплавленных частиц и диатомовых фрустул по сравнению с покрытиями, содержащими оксид TiO₂.

Схожие закономерности установлены и в результате исследования как механических, так и коррозионных свойств покрытий обоих видов. Облучение покрытий, содержащих ZrO₂, способствовало повышению их адгезионной прочности и коррозионной стойкости, в то время как рассматриваемые параметры для покрытий с оксидом TiO₂ снизились в результате НСЭП обработки. Однако, необходимо отметить, что исходные покрытия с частицами оксида TiO₂ имели наибольшую степень адгезии к подложке и устойчивость к коррозионным процессам, что связано с более плотной и монолитной структурой рассматриваемого покрытий.

Различное воздействие обработки низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками на структуру и свойства покрытий с частицами оксидов ZrO₂ и TiO₂ объясняется различиями в теплофизических свойствах. Оксид TiO₂ характеризуется значительно более низкой температурой плавления и более высокой теплопроводностью. В результате воздействия НСЭП происходит плавление, сопровождающееся выделением газообразных продуктов, покрытие становится более пористым, что негативно сказывается на его прочностных и коррозионных свойствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bairagi D., Mandal S. A comprehensive review on biocompatible Mg-based alloys as temporary orthopaedic implants: Current status, challenges, and future prospects. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022;10(3):627–669. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.09.005>
- Niranjan C.A., Raghavendra T., Rao M.P., Sidharaju C., Gupta M., Jain V. K.S., Aishwarya R. Magnesium alloys as extremely promising alternatives for temporary orthopedic implants-A review. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023;11(8):2688–2718. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.08.002>
- Venkateswarlu B., Sunil B. R., Kumar R. S. Magnesium based alloys and composites: Revolutionized biodegradable temporary implants and strategies to enhance their performance. *Materialia*. 2023;27:101680. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101680>
- Uppal G., Thakur A., Chauhan A., Bala S. Magnesium based implants for functional bone tissue regeneration—A review. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022;10(2):356–386.
- Shan Z., Xie X., Wu X., Zhuang S., Zhang C. Development of degradable magnesium-based metal implants and their function in promoting bone metabolism (A review). *Journal of Orthopaedic Translation*. 2022;36:184–193. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2022.09.013>
- Dong J., Lin T., Shao H., Wang H., Wang X., Song K., Li Q. Advances in degradation behavior of biomedical magnesium alloys: A review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;908:164600. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164600>
- Gonzalez J., Lamaka S. V., Mei D., Scharnagl N., Feyerabend F., Zheludkevich M. L., Willumeit-Römer R. Mg biodegradation mechanism deduced from the local surface environment under

- simulated physiological conditions. *Advanced Healthcare Materials*. 2021;10(13):2100053. <https://doi.org/10.1002/adhm.202100053>
8. Al Alawi A. M., Al Badi A., Al Huraizi A., Falhammar H. Magnesium: The recent research and developments. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2021;96:193–218. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2021.01.001>
 9. Fiorentini D., Cappadone C., Farruggia G., Prata C. Magnesium: biochemistry, nutrition, detection, and social impact of diseases linked to its deficiency. *Nutrients*. 2021;13(4):1136. <https://doi.org/10.3390/nu13041136>
 10. Mathew A., Hassan H. W., Korostynska O., Westad F., Mota-Silva E., Menichetti L., Mirtaheri P. In Vivo Analysis of a Biodegradable Magnesium Alloy Implant in an Animal Model Using Near-Infrared Spectroscopy. *Sensors*. 2023;23(6):3063. <https://doi.org/10.3390/s23063063>
 11. Kawamura N., Nakao Y., Ishikawa R., Tsuchida D., Iijima M. Degradation and biocompatibility of AZ31 magnesium alloy implants in vitro and in vivo: a micro-computed tomography study in rats. *Materials*. 2020;13(2):473. <https://doi.org/10.3390/ma13020473>
 12. Rogov A.B., Huang Y., Shore D., Matthews A., Yerokhin A. Toward rational design of ceramic coatings generated on valve metals by plasma electrolytic oxidation: The role of cathodic polarization. *Ceramics International*. 2021;47(24):34137–34158. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.324>
 13. Simchen F., Sieber M., Mehner T., Lampke T. Characterisation Method of the Passivation Mechanisms during the pre-discharge Stage of Plasma Electrolytic Oxidation indicating the Mode of Action of Fluorides in PEO of Magnesium. *Coatings*. 2020;10(10):965. <https://doi.org/10.3390/coatings10100965>
 14. Dudareva N.Y., Gallyamova R.F., Deev V.B., Kolomeichenko A.V. Features of Coating Formation by Micro-Arc Oxidation on High-Silicon Aluminum Alloy. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2022;16(6):1301–1307. <https://doi.org/10.1134/S1027451022060350>
 15. Tang H., Wang M., Zhu B., He L. Growth process and dielectric breakdown of micro arc oxidation coating on AZ31 Mg alloy pretreated by alkali treatment. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2020;56:156–163. <https://doi.org/10.1134/S2070205120010244>
 16. Bavva Devi K., Nandi S. K., Roy M. Magnesium silicate bioceramics for bone regeneration: a review. *Journal of the Indian Institute of Science*. 2019;99:261–288. <https://doi.org/10.1007/s41745-019-00119-7>
 17. Sedelnikova M., Bakina O., Ugodchikova A., Tolkacheva T., Khimich M., Uvarkin P., Kashin A., Miller A., Egorkin V., Schmidt J., Sharkeev Y. The Role of Microparticles of β -TCP and Wollastonite in the Creation of Biocoatings on Mg0.8Ca Alloy. *Metals*. 2022;12(10):1647. <https://doi.org/10.3390/met12101647>
 18. Zadehnajar P., Mirmusavi M. H., Soleymani Eil Bakhtiari S., Bakhsheshi-Rad H. R., Karbasi S., RamaKrishna S., Berto F. Recent advances on akermanite calcium-silicate ceramic for biomedical applications. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2021;18(6):1901–1920. <https://doi.org/10.1111/ijac.13814>
 19. Baghdadabad D.M., Baghdadabad A.R.M., Khoei S.M.M. Characterization of bioactive ceramic coatings synthesized by plasma electrolyte oxidation on AZ31 magnesium alloy having different $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ concentration. *Materials Today Communications*. 2020;25:101642. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101642>
 20. Kashin A.D., Sedelnikova M.B., Chebodaeva V.V., Uvarkin P.V., Luginin N.A., Dvilis E.S., Kazmina O.V., Sharkeev Yu.P., Khlusov I.A., Miller A.A., Bakina O.V. Diatomite-based ceramic biocoating for magnesium implants. *Ceramics International*. 2022;48(19):28059–28071. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.111>
 21. Fattah-alhosseini A., Babaei K., Molaei M. Plasma electrolytic oxidation (PEO) treatment of zinc and its alloys: A review. *Surfaces and Interfaces*. 2020;18:100441. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100441>
 22. Zahajská P., Opfergelt S., Fritz S. C., Stadmark J., Conley, D. What is diatomite? *Quaternary Research*. 2020;96:48–52. <https://doi.org/10.1017/qua.2020.14>
 23. Kashin A.D., Sedelnikova M.B., Uvarkin P.V., Ugodchikova A.V., Luginin N.A., Sharkeev Y.P., Khimich M.A., Bakina O.V. Functionalizing Diatomite-Based Micro-Arc Coatings for Orthopedic Implants: Influence of TiO_2 Addition. *Biomimetics*. 2023;8(3):280. <https://doi.org/10.3390/biomimetics8030280>
 24. Озур Г.Е., Проскуровский Д. *Источники низкоэнергетических сильноточных электронных пучков с плазменным анодом*. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2018:173. <https://doi.org/10.15372/Sources2018OGE>
 25. Ротштейн В.П., Проскуровский Д., Озур Г.Е., Иванов Ю.Ф. *Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными*

пучками. Новосибирск: Новосибирское отделение издательства «Наука», 2019:348. <https://doi.org/10.7868/978-5-02-038809-3>

26. Sedelnikova M.B., Kashin A.D., Bakina O.V., Uvarkin P.V., Luginin N.A., Sharkeev Y.P., Khimich M.A., Kazmina O.V., Dvilis E.S., Ivanov K.V. Surface Modification of Diatomite-Based Micro-Arc Coatings for Magnesium Implants Using a Low-Energy High-Current Electron Beam Processing Technique. *Metals*. 2024;14(2):248. <https://doi.org/10.3390/met14020248>
27. Sedelnikova M.B., Kashin A.D., Uvarkin P.V., Tolmachev A.I., Sharkeev Y.P., Ugodchikova A.V., Luginin N.A., Bakina O.V. Porous bio-coatings based on diatomite with incorporated ZrO₂ particles for biodegradable magnesium implants. *Journal of Functional Biomaterials*. 2023;14(5):241. <https://doi.org/10.3390/jfb14050241>

REFERENCES

- Bairagi D., Mandal S. A comprehensive review on biocompatible Mg-based alloys as temporary orthopaedic implants: Current status, challenges, and future prospects. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022;10(3):627–669. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.09.005>
- Niranjan C.A., Raghavendra T., Rao M.P., Sidharaju C., Gupta M., Jain V. K.S., Aishwarya R. Magnesium alloys as extremely promising alternatives for temporary orthopedic implants—A review. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023;11(8):2688–2718. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2023.08.002>
- Venkateswarlu B., Sunil B. R., Kumar R. S. Magnesium based alloys and composites: Revolutionized biodegradable temporary implants and strategies to enhance their performance. *Materialia*. 2023;27:101680. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101680>
- Uppal G., Thakur A., Chauhan A., Bala S. Magnesium based implants for functional bone tissue regeneration—A review. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022;10(2):356–386.
- Shan Z., Xie X., Wu X., Zhuang S., Zhang C. Development of degradable magnesium-based metal implants and their function in promoting bone metabolism (A review). *Journal of Orthopaedic Translation*. 2022;36:184–193. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2022.09.013>
- Dong J., Lin T., Shao H., Wang H., Wang X., Song K., Li Q. Advances in degradation behavior of biomedical magnesium alloys: A review. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;908:164600. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164600>
- Gonzalez J., Lamaka S. V., Mei D., Scharnagl N., Feyerabend F., Zheludkevich M. L., Willumeit-Römer R. Mg biodegradation mechanism deduced from the local surface environment under simulated physiological conditions. *Advanced Healthcare Materials*. 2021;10(13):2100053. <https://doi.org/10.1002/adhm.202100053>
- Al Alawi A. M., Al Badi A., Al Huraizi A., Falhammar H. Magnesium: The recent research and developments. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2021;96:193–218. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2021.01.001>
- Fiorentini D., Cappadone C., Farruggia G., Prata C. Magnesium: biochemistry, nutrition, detection, and social impact of diseases linked to its deficiency. *Nutrients*. 2021;13(4):1136. <https://doi.org/10.3390/nu13041136>
- Mathew A., Hassan H. W., Korostynska O., Westad F., Mota-Silva E., Menichetti L., Mirtaheri P. In Vivo Analysis of a Biodegradable Magnesium Alloy Implant in an Animal Model Using Near-Infrared Spectroscopy. *Sensors*. 2023;23(6):3063. <https://doi.org/10.3390/s23063063>
- Kawamura N., Nakao Y., Ishikawa R., Tsuchida D., Iijima M. Degradation and biocompatibility of AZ31 magnesium alloy implants in vitro and in vivo: a micro-computed tomography study in rats. *Materials*. 2020;13(2):473. <https://doi.org/10.3390/ma13020473>
- Rogov A.B., Huang Y., Shore D., Matthews A., Yerokhin A. Toward rational design of ceramic coatings generated on valve metals by plasma electrolytic oxidation: The role of cathodic polarization. *Ceramics International*. 2021;47(24):34137–34158. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.324>
- Simchen F., Sieber M., Mehner T., Lampke T. Characterisation Method of the Passivation Mechanisms during the pre-discharge Stage of Plasma Electrolytic Oxidation indicating the Mode of Action of Fluorides in PEO of Magnesium. *Coatings*. 2020;10(10):965. <https://doi.org/10.3390/coatings10100965>
- Dudareva N.Y., Gallyamova R.F., Deev V.B., Kolomeichenko A.V. Features of Coating Formation by Micro-Arc Oxidation on High-Silicon Aluminum Alloy. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2022;16(6):1301–1307. <https://doi.org/10.1134/S1027451022060350>
- Tang H., Wang M., Zhu B., He L. Growth process and dielectric breakdown of micro arc oxidation coating on AZ31 Mg alloy pretreated by alkali treatment. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2020;56:156–163. <https://doi.org/10.1134/S2070205120010244>

16. Bavya Devi K., Nandi S. K., Roy M. Magnesium silicate bioceramics for bone regeneration: a review. *Journal of the Indian Institute of Science*. 2019;99:261–288.
<https://doi.org/10.1007/s41745-019-00119-7>
17. Sedelnikova M., Bakina O., Ugodchikova A., Tolkacheva T., Khimich M., Uvarkin P., Kashin A., Miller A., Egorkin V., Schmidt J., Sharkeev Y. The Role of Microparticles of β -TCP and Wollastonite in the Creation of Biocoatings on Mg0.8Ca Alloy. *Metals*. 2022;12(10):1647.
<https://doi.org/10.3390/met12101647>
18. Zadehnajar P., Mirmusavi M. H., Soleymani Eil Bakhtiari S., Bakhsheshi-Rad H. R., Karbasi S., RamaKrishna S., Berto F. Recent advances on akermanite calcium-silicate ceramic for biomedical applications. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2021;18(6):1901–1920.
<https://doi.org/10.1111/ijac.13814>
19. Baghdadabad D.M., Baghdadabad A.R.M., Khoei S.M.M. Characterization of bioactive ceramic coatings synthesized by plasma electrolyte oxidation on AZ31 magnesium alloy having different $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ concentration. *Materials Today Communications*. 2020;25:101642.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101642>
20. Kashin A.D., Sedelnikova M.B., Chebodaeva V.V., Uvarkin P.V., Luginin N.A., Dvilis E.S., Kazmina O.V., Sharkeev Yu.P., Khlusov I.A., Miller A.A., Bakina O.V. Diatomite-based ceramic biocoating for magnesium implants. *Ceramics International*. 2022;48(19):28059–28071.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.111>
21. Fattah-alhosseini A., Babaei K., Molaei M. Plasma electrolytic oxidation (PEO) treatment of zinc and its alloys: A review. *Surfaces and Interfaces*. 2020;18:100441.
<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100441>
22. Zahajská P., Opfergelt S., Fritz S. C., Stadmark J., Conley, D. What is diatomite? *Quaternary Research*. 2020;96:48–52.
<https://doi.org/10.1017/qua.2020.14>
23. Kashin A.D., Sedelnikova M.B., Uvarkin P.V., Ugodchikova A.V., Luginin N.A., Sharkeev Y.P., Khimich M.A., Bakina O.V. Functionalizing Diatomite-Based Micro-Arc Coatings for Orthopedic Implants: Influence of TiO_2 Addition. *Biomimetics*. 2023;8(3):280.
<https://doi.org/10.3390/biomimetics8030280>
24. Ozur G.E., Proskurovskii D. *Sources of low-energy high-current electron beams with a plasma anode*. Novosibirsk: Izdatel'stvo Sibirskogo otdeleniya RAN, 2018:173. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15372/Sources2018OGE>
25. Rotshtein V.P., Proskurovskii D., Ozur G.E., Ivanov Yu.F. *Modification of surface layers of metallic materials by low-energy high-current electron beams*. Novosibirsk: Novosibirskoe otdelenie izdatel'stva «Nauka», 2019:348. (In Russ.).
<https://doi.org/10.7868/978-5-02-038809-3>
26. Sedelnikova M.B., Kashin A.D., Bakina O.V., Uvarkin P.V., Luginin N.A., Sharkeev Y.P., Khimich M.A., Kazmina O.V., Dvilis E.S., Ivanov K.V. Surface Modification of Diatomite-Based Micro-Arc Coatings for Magnesium Implants Using a Low-Energy High-Current Electron Beam Processing Technique. *Metals*. 2024;14(2):248.
<https://doi.org/10.3390/met14020248>
27. Sedelnikova M.B., Kashin A.D., Uvarkin P.V., Tolmachev A.I., Sharkeev Y.P., Ugodchikova A.V., Luginin N.A., Bakina O.V. Porous biocoatings based on diatomite with incorporated ZrO_2 particles for biodegradable magnesium implants. *Journal of Functional Biomaterials*. 2023;14(5):241.
<https://doi.org/10.3390/jfb14050241>

Сведения об авторах

Александр Данилович Кашин, инженер лаборатории физики наноструктурных биокomпозитов, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: kash@ispms.ru
ORCID: 0000-0003-1860-3654
SPIN-код: 8374-9172

Мария Борисовна Седельникова, д.т.н., доцент, старший научный сотрудник лаборатории физики наноструктурных биокomпозитов, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: mariyased@ispms.ru
ORCID: 0000-0002-5741-6053
SPIN-код: 1982-5589

Маргарита Андреевна Химич, научный сотрудник лаборатории нанобиоинженерии, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: khimich@ispms.ru
ORCID: 0000-0001-5859-7418
SPIN-код: 2785-2322

Павел Викторович Уваркин, ведущий технолог лаборатории физики наноструктурных биокomпозитов, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: uvarkin@ispms.ru
ORCID: 0000-0003-1169-3765
SPIN-код: 4944-4711

Никита Андреевич Лугинин, инженер лаборатории физики наноструктурных биокomпозитов, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: nikishek90@ispms.ru
ORCID: 0000-0001-6504-8193
SPIN-код: 3820-6600

Константин Вениаминович Иванов, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики консолидации порошковых материалов, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: ikv@ispms.ru

ORCID: 0000-0002-8003-271X

SPIN-код: 4432-8819

Information about the authors:

Alexander D. Kashin, Engineer, Laboratory of Physics of Nanostructured Biocomposites, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: kash@ispms.ru

ORCID: 0000-0003-1860-3654

SPIN-код: 8374-9172

Maria B. Sedelnikova, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher Laboratory of Physics of Nanostructured Biocomposites, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: mariyased@ispms.ru

ORCID: 0000-0002-5741-6053

SPIN-код: 1982-5589

Margarita A. Khimich, Research Associate Laboratory of Nanobioengineering, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: khimich@ispms.ru

ORCID: 0000-0001-5859-7418

SPIN-код: 2785-2322

Pavel V. Uvarkin, Lead Tech, Laboratory of Physics of Nanostructured Biocomposites, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: uvarkin@ispms.ru

ORCID: 0000-0003-1169-3765

SPIN-код: 4944-4711

Nikita A. Luginin, engineer, Laboratory of Physics of Nanostructured Biocomposites, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: nikishek90@ispms.ru

ORCID: 0000-0001-6504-8193

SPIN-код: 3820-6600

Konstantin V. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Leading Researcher, Laboratory of Physics of Consolidation of Powder Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

E-mail: ikv@ispms.ru

ORCID: 0000-0002-8003-271X

SPIN-код: 4432-8819

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 14.11.2024

После доработки 22.11.2024

Принята к публикации 29.11.2024

Received 14.11.2024

Revised 22.11.2024

Accepted 29.11.2024

Оригинальная статья

УДК 621.793.6

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-85-92

**ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СЛОЕВ НА СТАЛИ МАРКИ 5ХНМ, ПОЛУЧЕННЫХ
ПОРОШКОВЫМ БОРОМЕДНЕНИЕМ**

© 2025 г. С. А. Лысых¹, В. Н. Корнопольцев², С. В. Калашников¹, У. Л. Мишигдоржийн¹

¹Институт физического материаловедения СО РАН (Россия, 670047, Республика Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6)

²Байкальский институт природопользования СО РАН (Россия, 670047, Республика Бурятия, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6)

Аннотация. Износостойкость конструкционных сталей имеет большое влияние на технологию и экономику в машиностроении. Одни из наиболее дорогих производственных оснасток являются штампы, которые работают в сложных условиях и подвержены износу. Развитие способов упрочнения их поверхности, снижающие износ и увеличивающие тем самым ресурс штампов, очень важное направление как с точки зрения технологии их изготовления, так и с точки зрения экономии средств благодаря увеличению жизненного цикла производственной оснастки. Для изготовления штамповой оснастки при крупносерийном производстве в настоящее время используют преимущественно сталь марки 5ХНМ. Рассмотрена технология процесса химико-термической обработки рассматриваемой стали путем боромеднения с целью повышения износостойкости ее поверхности. Процесс боромеднения проводили в муфельной печи с использованием герметичных контейнеров в смеси, содержащей 62 % В₄С, 17 % CuO, 19 % Al, 2 % NaF, при температуре 950 °С и временем выдержки 4 ч. Структура полученного упрочняющего покрытия игольчатая. Поверхностная твердость благодаря упрочняющему слою достигла 1850 HV и снижается до 1000 HV на глубине 180 мкм. Для измерения износа применяли машину трения с интегральным методом оценки. В процессе износа покрытия происходит обильное отделение мелких частиц металла и диффузионного слоя. Отделившиеся частицы, попадая в зону механического контакта деталей, вызывают микрорезание их поверхности. Однако, несмотря на это, сопротивление износу стали с покрытием возросло более чем в 22 раза по результатам тридцатиминутного испытания на машине трения. В качестве сравнительной технологии упрочнения применяли термическую обработку стали, в результате которой ее износостойкость возросла лишь в 2,6 раза при тех же условиях испытаний.

Ключевые слова: упрочнение, упрочняющие покрытия, износостойкость, сталь марки 5ХНМ, химико-термическая обработка, боромеднение, диффузионный слой

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, научная тема № 0270-2024-0010.

Благодарности. Исследование проведено с применением приборной базы ЦКП «Научные приборы» Бурятского государственного университета им. Доржи Банзарова.

Для цитирования: Лысых С.А., Корнопольцев В.Н., Калашников С.В., Мишигдоржийн У.Л. Износостойкость слоев на стали марки 5ХНМ, полученных порошковым боромеднением. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):85–92. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-85-92](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-85-92)

Original article

WEAR RESISTANCE OF LAYERS ON 5KHNM GRADE STEEL OBTAINED BY POWDER BOROMEDNING

© 2025 S. A. Lysykh¹, V. N. Kornopoltsev², S. V. Kalashnikov¹, U. L. Mishigdorzhii¹

¹*Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences* (st. Sakhyanova, 6, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047, Russian Federation)

²*Baikal Institute of Nature Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences* (st. Sakhyanova, 6, Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047, Russian Federation)

Abstract. The wear resistance of structural steels has a great impact on technology and economics in mechanical engineering. One of the most expensive production bases are stamps, which operate in difficult conditions and are subject to wear. The development of methods for strengthening their surfaces, which reduce wear and thereby increase the life of stamps, is a very important direction both from the point of view of their manufacturing technology and from the point of view of cost savings due to an increase in the life cycle of production equipment. Currently, 5KHNM grade steel is used primarily for the manufacture of die tooling in large-scale production. The technology of the process of chemical and thermal treatment of the steel in question by boromining in order to increase the wear resistance of its surface is considered. The boromining process was carried out in a steel furnace using sealed containers in a mixture containing 62 % B₄C, 17 % CuO, 19 % Al, 2 % NaF, at a temperature of 950 °C and a holding time of 4 h. The structure of the resulting reinforcing coating is needle-like. The surface hardness due to the reinforcing layer has reached 1850 HV and decreases to 1000 HV at a depth of 180 microns. A friction machine with an integral evaluation method was used to measure wear. During the process of coating wear, there is an abundant separation of small metal particles and the diffusion layer. The separated particles, falling into the zone of mechanical contact of the parts, cause micro-cutting of their surface. However, despite this, the wear resistance of coated steel increased by more than 22 times according to the results of a thirty-minute test on a friction machine. Heat treatment of steel was used as a comparative hardening technology, as a result of which its wear resistance increased only 2.6 times under the same test conditions.

Keywords: hardening, reinforcing coatings, wear resistance, 5XHM steel, chemical-thermal treatment, boron-copper plating, diffusion layer

Financing. The work was carried out with financial support from the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, scientific topic no. 0270-2024-0010.

Acknowledgments. The study was carried out using the instrumentation base of the Scientific Instruments Shared Use Center of the Buryat State University named after Dorzhi Banzarov.

For citation: Lysykh S.A., Kornopoltsev V.N., Kalashnikov S.V., Mishigdorzhii U.L. Wear resistance of layers on 5KHNM grade steel obtained by powder boromedning. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):85–92. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-85-92](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-85-92)

Введение

Проблема повышения износостойкости конструкционных материалов является одной из наиболее актуальных для современного материаловедения [1; 2]. Надежность работы и долговечность технических деталей, узлов, инструмента во многом обусловлены явлением трения и возникающего в результате него изнашивания [3; 4]. На восстановление машин или агрегатов, вышедших из строя в результате износа, затрачиваются огромные средства, возрастает время простоя оборудования [5]. Например, на ремонт тракторов задействовано в 4 раза больше производственных

мощностей, чем на их изготовление [6]. Проанализировано и подсчитано, что за срок службы трактора Т-130 на запасные части для его ремонта и техническое обслуживание нужно израсходовать в среднем столько же металла, сколько масса самого трактор (12·10³ кг).

Явления трения и изнашивания взаимно обусловлены: трение приводит к изнашиванию, а изнашивание поверхностей деталей или инструмента в ходе работы приводит к изменению трения.

В настоящее время при изготовлении штампов для крупносерийного производства используется преимущественно сталь марки 5XHM.

Химический состав стали марки 5ХНМ (ГОСТ 5950 – 2000)**Table 1. Chemical composition of 5ХНМ steel (GOST 5950 – 2000)**

Марка стали	Содержание элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	Cu	Fe
5ХНМ	0,5 – 0,6	0,1 – 0,4	0,5 – 0,8	0,5 – 0,8	0,15 – 0,8	1,4 – 1,8	до 0,03	до 0,03	до 0,3	не менее 94,44

Достоинствами этой стали принято считать достаточно высокую пластичность и ударную вязкость при удовлетворительной прочности. В работах [7; 8] выделены важные проблемы, связанные со стойкостью штампового инструмента из стали марки 5ХНМ, в том числе и с ее износостойкостью. Для решения этой проблемы предлагается проведение процесса химико-термической обработки (ХТО) – боромеднения, позволяющего получить поверхностный слой (достаточно широко применяемый и как антикоррозионное покрытие [9], и как упрочняющий слой [10; 11]). Процесс включает в себя применение комплексного насыщения поверхности стали марки 5ХНМ бором и медью, в результате которого формируется диффузионный боридный слой высокой твердости. Использование бор-медных покрытий изучено недостаточно полно [12], особенно для рассматриваемой стали.

Целью настоящей работы является повышение износостойкости стали марки 5ХНМ комплексным боромеднением ее поверхности, а также сравнительный анализ с образцом, упрочненным термической обработкой (закалкой).

Методика исследований

Образцами служили заготовки из стали марки 5ХНМ прямоугольной формы (15 × 10 × 25 мм). Химический состав стали марки 5ХНМ представлен в табл. 1.

Термическую обработку [13] и процесс боромеднения [14] проводили в муфельной печи ЭКПС-50. Процесс боромеднения осуществляли в герметичных контейнерах в смеси, содержащей 62 % В₄С, 17 % CuO, 19 % Al, 2 % NaF, при температуре 950 °С и временем выдержки 4 ч. Металлографию поперечных шлифов проводили на оптическом микроскопе Альтами МЕТ 2С. Измерение микротвердости осуществляли с помощью микротвердомера ПМТ-3М с нагрузкой на алмазную пирамидку 50 гс. Элементный микроанализ проводили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM-6000 с элементным дисперсионным анализом. Ускоряющее напряжение 15 кВ. Износостойкость определяли на машине

трения, аналогичной СМЦ-2, по схеме диск – плоскость (рис. 1).

Для измерения износа применяли интегральный метод оценки (используется для определения износа небольших деталей со взвешиванием до и после испытаний), то есть оценка суммарного износа по изменению массы образца [15]. Перед взвешиванием детали тщательно промывали и просушивали [5]. Измерение массы образцов фиксировали каждые 10 мин на аналитических весах AND HR-100А с точностью измерения 10⁻⁴ г. Материалом контртела выступал ролик из закаленной стали марки 45 диаметром 50 мм. Притирку контртела проводили в течение 15 мин, радиальное биение не превышало 0,01 мм. Скорость вращения контртела была постоянной (60 об/мин). Нагрузка на образцы составляла 627 Н, необходимо отметить, что при меньших нагрузках на образец потеря массы на аналитических весах так же фиксировали.

Результаты исследований

В результате диффузионного боромеднения стали марки 5ХНМ на поверхности были получены слои толщиной 90 – 120 мкм (рис. 2). Диффузионный слой имеет «классическое» игольчатое строение, присущее строению слоя после борирования. Иглы укрупнены и срastaются на поверхности, образуя сплошной слой. Наибольшее значение микротвердости (1850 НВ) фиксировали на поверхности. Далее происходило плавное снижение твердости до 1650 – 1000 НВ. Твердость структуры и переходной зоны составляла 850 – 600 НВ (рис. 3); образцов, прошедших термическую обработку – 40–45 HRC.

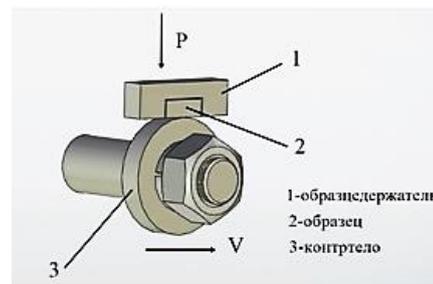


Рис. 1. Схема проведения исследований на износостойкость

Fig. 1. Wear resistance research scheme

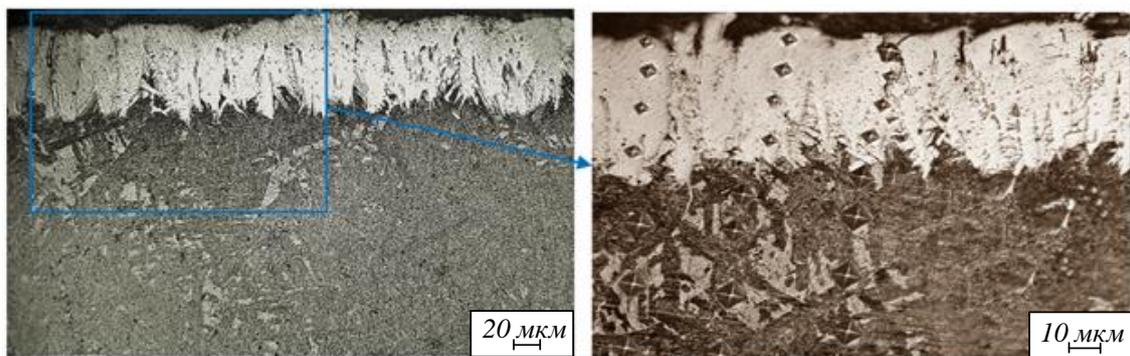


Рис. 2. Микроструктура образцов из стали марки 5XNM после насыщения поверхности бором и медью
 Fig. 2. Microstructure of 5XNM steel samples after surface saturation with boron and copper

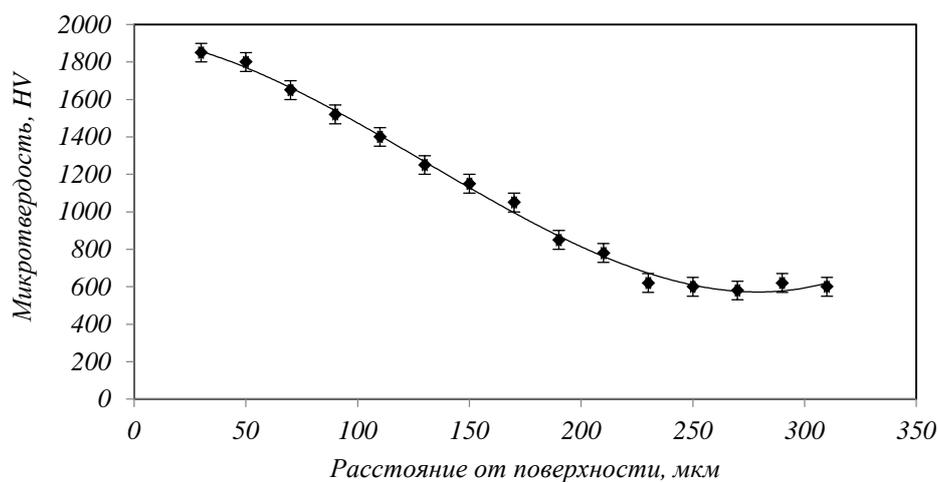


Рис. 3. Распределение микротвердости диффузионного слоя образцов из стали марки 5XNM после насыщения поверхности бором и медью
 Fig. 3. Distribution of microhardness of the diffusion layer of samples made of 5XNM steel after saturation of the surface with boron and copper

Оценочная характеристика повышения или снижения износостойкости будет определена по потери массы исследуемых материалов при одинаковых режимах нагружения. Определим расстояние, прошедшее колесом (контртелом) за 10 и 40 мин испытания на износ. Длина окружности контртела составляет 15,7 см. За 10 мин контртело совершит 600 оборотов, а за 40 мин – 2400 оборотов. Путь за 10 мин составит 94,2 м, а за 40 мин – 376,8 м. Испытания на износостойкость образцов после ХТО сопровождались отделением мелкодисперсных включений (рис. 4). Образцы после проведения испытаний на износ представлены на рис. 5.

В результате испытаний установлено следующее:

- процесс сопровождается обильным отделением мелких частиц металла и диффузионного слоя (рис. 4), что приводит к изменению геометрии испытываемого образца и контртела;

- отделившиеся частицы от диффузионного слоя, имея высокую микротвердость, попадают в зону контакта образца и контртела, тем самым происходит процесс аналогичный процессу резания.

В контексте исследования механизма абразивного износа рассматриваемый процесс называют микрорезанием (рис. 5). Из-за асимметричной геометрии высокотвердых частиц он сопровождается высокочастотным звуком, подобно точению изношенным инструментом.



Рис. 4. Микрочастицы металла, образованные в результате износа контртела и образца из стали марки 5XNM после ХТО
 Fig. 4. Metal microparticles formed as a result of wear of the counterbody and the 5XNM steel sample after chemical treatment

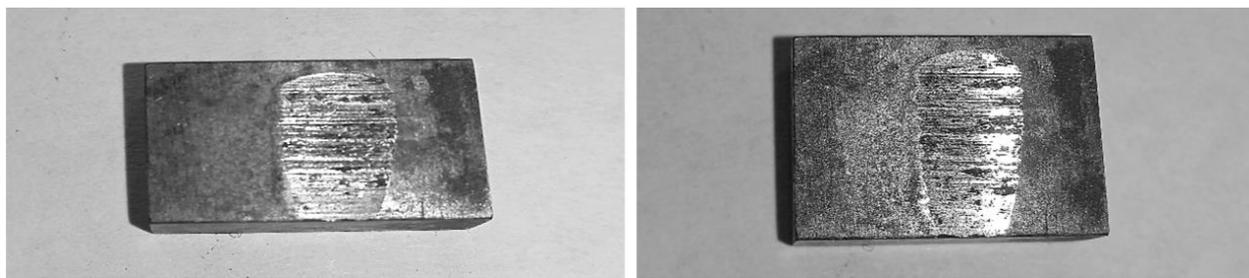


Рис. 5. Образцы из стали марки 5XHM после испытания на износ
Fig. 5. Samples 5XHM after wear testing

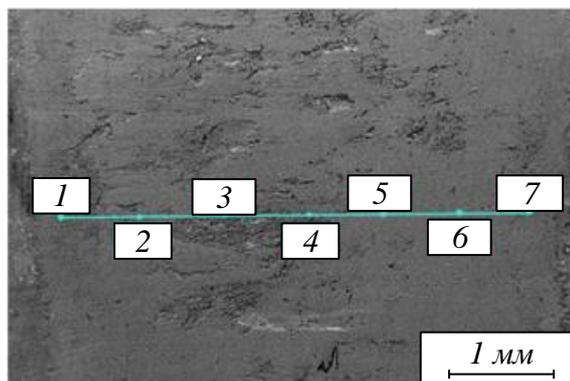


Рис. 6. Точки спектра контактного пятна стали марки 5XHM после проведения испытаний на износ
Fig. 6. Points of the spectrum of the contact spot of 5XHM steel after wear tests

В настоящей работе был проведен элементный анализ нескольких участков контактного пятна образца (рис. 6). Результаты элементного состава приведены в табл. 2. Углерод присутствует в чистом виде, тогда как все остальные элементы находятся в состоянии оксидов (B_2O_3 , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , FeO , CuO , NiO , MoO_3). Оксидные пленки на черных и цветных металлах часто отличаются по плотности от основного металла. Из-за этого оксидные пленки имеют разрывы или трещины, внутрь ко-

торых попадает кислород, процесс окисления металлов продолжается. Для рассматриваемых металлов характерными являются более толстые слои оксидов, которые в процессе трения могут легко разрушаться и образовывать мелкие частицы абразива. Окислительные процессы на поверхности металлов могут играть важную роль в ускорении химических изменений смазки, которые часто приводят к образованию пленки полимеризованного материала на самих металлических поверхностях. Они могут быть вредными, вызывая пригорание поршневых колец в ДВС. Однако полимеризационная пленка может служить защитным слоем при абразивном износе. При сухом трении обычно образуются более толстые и насыщенные пленки оксидов, близких по составу и свойствам к известным оксидам металла. В зависимости от условий трения (прежде всего от температуры) на железе образуются пленки, содержащие оксиды FeO , Fe_2O_3 и Fe_3O_4 [16].

На рис. 7 представлена зависимость потери массы от времени при испытаниях образцов из стали марки 5XHM в различных структурных состояниях. Аналогичными можно считать данные, если вместо времени добавить путь контртела, совершенного за определенный промежуток времени. При одинаковой нагрузке и пути,

Т а б л и ц а 2

Элементный состав контактного пятна в контрольных точках

Table 2. Elemental composition of the contact spot at control points

Точка измерения	Содержание элементов, %								
	B	C	O	Al	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe
1	3,75	1,34	7,29	5,86	1,27	1,24	0,61	0,31	78,33
2	0,24	2,61	4,51	2,81	0,94	–	0,81	0,62	87,46
3	–	1,24	3,5	1,41	0,63	0,87	–	0,55	91,8
4	–	6,33	4,47	0,28	1,33	1,22	1,34	0,22	84,81
5	–	2,84	11,19	0,57	0,77	1,53	2,83	0,43	79,84
6	0,12	1,67	6,24	1,24	1,03	0,92	3,55	0,38	84,85
7	2,84	1,29	7,24	3,52	0,9	1,08	2,41	0,47	80,25

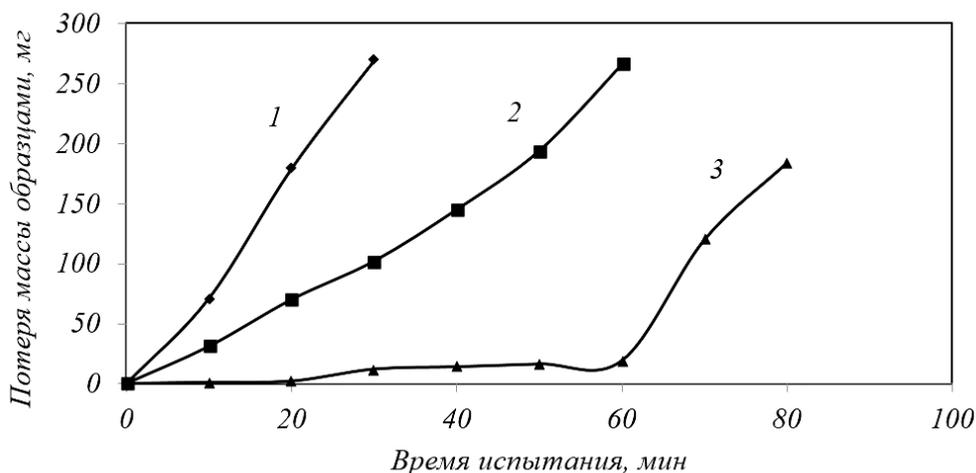


Рис. 7. Зависимость потери массы от времени при испытании на износ образцов из стали марки 5ХНМ в отожженном состоянии (1), после термической обработки (2) и ХТО (3)

Fig. 7. Dependence of mass loss on time during wear testing of 5KHNM steel samples in the annealed state (1), after heat treatment (2) and CTO (3)

пройденным контртелом, наименьшую износостойкость имеет образец в отожженном состоянии. Динамика потери массы образца после термической обработки неизменна в процессе всего испытания (в среднем $0,035 \pm 0,1$ г за 10 мин). Наименьшую потерю массы при износе продемонстрировали образцы после ХТО. После термической обработки и ХТО сопротивление износу возросло в 2,6 и 22,4 раза после 30 мин испытания по сравнению с образцом без обработки в отожженном состоянии.

Выводы

Результаты проведенного исследования показали высокие возможности покрытия стали марки 5ХНМ, полученного при химико-термической обработке в виде боромеднения, которое проводили в смеси B_4C , CuO , Al и NaF при температуре 950°C с выдержкой в течении 4 ч.

В результате диффузионного боромеднения на поверхности стали были получены покрытия толщиной 90 – 120 мкм с наибольшей микротвердостью (1850 HV) на поверхности.

Процесс износа обработанной поверхности стали сопровождается обильным отделением мелких частиц металла и диффузионного слоя. Эти частицы, имея высокую микротвердость, попадают в зону контакта тел и приводят к интенсификации износа.

Установлено, что износостойкость образцов из стали марки 5ХНМ после ХТО примерно в 22 раза выше, чем у образцов в исходном состоянии. Образцы, прошедшие термическую обработку в виде закалки и старения показали повышение износостойкости лишь в 2,6 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжкин А.А., Зотов В.В., Глоба Д.П., Висторопская Ф.А. Трибохимический аспект влияния износостойких покрытий на износ при резании. *Вестник ДГТУ*. 2010;10(6):844–857.
2. Bulloch J.H., Henderson J.L. Some considerations of wear and hardfacing materials. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1991;46:251–267.
3. Коротков В.А., Ананьев С.П., Злоказов М.В. Износостойкость сталей с плазменной закалкой и карбонитрацией. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ. 2014:104.
4. Ahn D.-G. Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: a review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2013;14:1271–1283.
5. Галынская Н.А., Кухарева Н.Г., Петрович С.Н., Бабуль Т., Обухович З. Исследование износостойкости боридных покрытий, полученных из композиционных порошковых сред. *Наука и техника*. 2012;1:10–16.
6. Емельянова Т.В., Грызунов В.И., Приймак Е.Ю., Фирсова Н.В. Упрочнение поверхностных слоев штамповых сталей борированием. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2017;13(1):40–44.
7. Трахтенберг Б.Ф. *Стойкость штампов и пути ее повышения*. Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство. 1964:280.
8. Сорокин В.Г. *Стали и сплавы. Марочник*. Москва: Интермет Инжиниринг. 2001:608.
9. Salyi Z., Kaptay G., Koncz-Horvath D., Somlyai-Sipos L., Zoltan Kovacs P., Lukacs A., Benke M. Boride Coatings on Steel Protecting

it Against Corrosion by a Liquid Lead-Free Solder Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022;53:730–743.

10. Anthymidis K.G., Trakali A., Tsipas D.N. Production and Characterization of Boride Coatings on Steels. *Key Engineering Materials*. 2019;827:61–66.
11. Xu R., Zhang J., Li Z., Zhang S., Zhang Y. Research Status of Metal Boride Hard Coatings. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2020;9(12):223–226.
12. Malinochka Ya.N., Koval'chuk G.Z., Yarmosh V.N. Structure and properties of low-carbon steel alloyed with boron and copper. *Structural Steels*. 1982;24:760–765.
13. Полюшкин Н.Г. *Основы теории трения, износа и смазки*. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т., 2013:192.
14. Ivanov A.S., Karmanov D.V., Vdovina O.N. Surface saturation of low-carbon martensite steels with boron and copper. *Chemicothermal Treatment Published*. 1999;41:246–249.
15. Pashechko M., Dziedzic K., Jozwik J. Analysis of Wear Resistance of Borided Steel C45. *Materials*. 2020;13(23):5529.
16. Тавтилов И.Ш. *Практикум по основам теории трения, изнашивания и триботехническим испытаниям*. Оренбург: Оренбургский гос. ун-т., 2017:231.
1. Ryzhkin A.A., Zotov V.V., Globa D.P., Vistoropskaya F.A. Tribochemical aspect of the influence of wear-resistant coatings on wear during cutting. *Vestnik DGTU*. 2010;10(6):844–857. (In Russ.).
2. Bulloch J.H., Henderson J.L. Some considerations of wear and hardfacing materials. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1991;46:251–267.
Korotkov V.A., Anan'ev S.P., Zlokazov M.V. *Wear resistance of steels with plasma hardening and carbonitration*. Nizhnii Tagil: NTI (branch) UrFU, 2014:104. (In Russ.).
3. Ahn D.-G. Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: a review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2013;14:1271–1283.
4. Galynskaya N.A., Kukhareva N.G., Petrovich S.N., Babul' T., Obukhovich Z. Study of the wear resistance of boride coatings obtained from composite powder media. *Nauka i tekhnika*. 2012;1:10–16. (In Russ.).
5. Emel'yanova T.V., Gryzunov V.I., Priimak E.Yu., Firsova N.V. Hardening of surface layers of die steels by boriding. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2017;13(1):40–44. (In Russ.).
6. Trakhtenberg B.F. *Durability of dies and ways to improve it*. Kuibyshev: Kuibyshevskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1964:280. (In Russ.).
7. Sorokin V.G. *Steels and alloys. Vintage*. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2001:608. (In Russ.).
8. Salyi Z., Kaptay G., Koncz-Horvath D., Somlyai-Sipos L., Zoltan Kovacs P., Lukacs A., Benke M. Boride Coatings on Steel Protecting it Against Corrosion by a Liquid Lead-Free Solder Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022;53:730–743.
9. Anthymidis K.G., Trakali A., Tsipas D.N. Production and Characterization of Boride Coatings on Steels. *Key Engineering Materials*. 2019;827:61–66.
10. Xu R., Zhang J., Li Z., Zhang S., Zhang Y. Research Status of Metal Boride Hard Coatings. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2020;9(12):223–226.
11. Malinochka Ya.N., Koval'chuk G.Z., Yarmosh V.N. Structure and properties of low-carbon steel alloyed with boron and copper. *Structural Steels*. 1982;24:760–765.
12. Polyushkin N.G. *Fundamentals of the theory of friction, wear and lubrication*. Krasnoyarsk: Krasnoyarskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet, 2013:192. (In Russ.).
13. Ivanov A.S., Karmanov D.V., Vdovina O.N. Surface saturation of low-carbon martensite steels with boron and copper. *Chemicothermal Treatment Published*. 1999;41:246–249.
14. Pashechko M., Dziedzic K., Jozwik J. Analysis of Wear Resistance of Borided Steel C45. *Materials*. 2020; 13(23):5529.
15. Tavtilov I.Sh. *Workshop on the basics of the theory of friction, wear and tribological testing*. Orenburg: Orenburgskii gosudarstvennyi universitet, 2017:231. (In Russ.).

REFERENCES

Сведения об авторах:

Степан Алексеевич Лысых, м.н.с. лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения СО РАН
E-mail: lysyh.stepa@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-1421-5251
SPIN-код: 6995-9590

Василий Николаевич Корнопольцев, к.т.н., н.с. лаборатории химии полимеров, Бурятский институт природопользования СО РАН
E-mail: kompro@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1970-2945

Сергей Васильевич Калашиников, к.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения СО РАН
E-mail: betch_kail@mail.ru
ORCID: 0000-0003-3272-0072
SPIN-код: 3164-6450

Ундрах Лхагвасуренович Мишигдоржийн, к.т.н., зав. лабораторией физического материаловедения, Институт физического материаловедения СО РАН
E-mail: druh@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7863-9045
SPIN-код: 2781-4995

Information about the authors:

Stepan A. Lysykh, Junior Research Fellow physical materials science laboratories, Institute of Physical Materials Science SO RAN
E-mail: lysyh.stepa@yandex.ru

Vasilii N. Kornopol'tsev, Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Laboratory of Polymer Chemistry, Buryat Institute of Nature Management SO RAN
E-mail: kompo@mail.ru
ORCID: 0000-0003-1970-2945

Sergei V. Kalashnikov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Physical Materials Science, Institute of Physical Materials Science SO RAN
E-mail: betch_kail@mail.ru
ORCID: 0000-0003-3272-0072
SPIN-код: 3164-6450

Undrakh L. Mishigdorzhiiin, Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Physical Materials Science, Institute of Physical Materials Science SO RAN
E-mail: druh@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7863-9045
SPIN-код: 2781-4995

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 25.11.2024
После доработки 23.12.2024
Принята к публикации 25.12.2024

Received 25.11.2024
Revised 23.12.2024
Accepted 25.12.2024

Оригинальная статья

УДК 669.58: 621.45.038.72

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-93-101

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ ВЫДЕРЖКИ В РАСПЛАВЕ
НА МИКРОСТРУКТУРУ И ФАЗОВОЕ СТРОЕНИЕ ПОКРЫТИЯ Zn + 7 % Al
НА СТАЛЯХ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК**

© 2025 г. О. С. Бондарева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

Аннотация. Алюминий является одним из самых распространенных легирующих элементов для цинкового расплава. Сплавы с содержанием 1 – 20 % Al демонстрируют высокую формемость, пластичность и коррозионную стойкость. Известно, что в присутствии алюминия на границе раздела между расплавленным цинком и железной подложкой образуются интерметаллиды Fe – Al, которые играют роль диффузионного барьера, контролируя реакцию между железом и расплавленным цинком, обеспечивая меньшую толщину покрытия по сравнению с традиционными цинковыми покрытиями. Влияние температуры, времени выдержки и химического состава стали на структуру и фазовый состав цинк-алюминиевых покрытий изучено недостаточно. Было проведено исследование микроструктуры и фазового состава покрытий, полученных в расплаве Zn + 7 % Al при температуре 420 – 520 °С с временем выдержки до 8 мин, на сталях различного состава. Установлено, что время выдержки в расплаве не влияет на толщину покрытия. Последняя не зависит от марки стали, следовательно, покрытия Zn + 7 % Al неактивны по отношению к кремнию, содержащемуся в стали. Показано, что толщина покрытия постоянна в диапазоне 420 – 460 °С и интенсивно возрастает при температуре расплава выше 480 °С, что связано с интенсивным растворением стальной подложки. Методом электронной микроскопии изучена микроструктура покрытия при температурах 420, 480, 520 °С. Рентгенофазовый анализ позволил установить изменение фазового состава покрытия при повышении температуры расплава. С помощью энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа определен состав отдельных структурных составляющих покрытия. Измерена микротвердость фаз покрытия.

Ключевые слова: горячее цинкование, покрытие Zn – Al, Гальфан, система Zn – Fe – Al, микроструктура покрытия, фазовое строение, микротвердость

Для цитирования: Бондарева О.С. Влияние температуры и времени выдержки в расплаве на микроструктуру и фазовое строение покрытия Zn + 7 % Al на сталях различных марок. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):93–101. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-93-101](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-93-101)

Original article

**INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HOLDING TIME IN THE MELT ON THE
MICROSTRUCTURE AND PHASE STRUCTURE Zn + 7 % Al COATINGS ON VARIOUS
GRADES OF STEEL**

© 2025 O. S. Bondareva

Samara National Research University (34 Moskovskoe route, Samara, 443086, Russian Federation)

Abstract. Aluminum is one of the most common alloying elements for zinc melt. Alloys with a content of 1 – 20 % Al exhibit high formability, ductility, and corrosion resistance. It is known that in the presence of aluminum, Fe – Al intermetallics are formed at the interface between molten zinc and an iron substrate, which play the role of a diffusion barrier, controlling the reaction between iron and molten zinc, providing a lower coating thickness compared to traditional zinc coatings. The effect of temperature, exposure time, and chemical composition of steel

on the structure and phase composition of zinc-aluminum coatings has not been sufficiently studied. A study of the microstructure and phase composition of coatings obtained in a Zn + 7 % Al melt at a temperature of 420 – 520 °C with a holding time of up to 8 minutes on steels of various compositions was carried out. It was found that the exposure time in the melt does not affect the thickness of the coating. The latter does not depend on the steel grade, therefore, Zn + 7 % Al coatings are non-reactive with respect to silicon contained in steel. It is shown that the coating thickness is constant in the range of 420 – 460 °C and increases intensively at a melt temperature above 480 °C, which is associated with intensive dissolution of the steel substrate. The microstructure of the coating was studied by electron microscopy at temperatures of 420, 480, and 520 °C. X-ray phase analysis made it possible to establish a change in the phase composition of the coating with increasing melt temperature. The composition of the individual structural components of the coating was determined using energy-dispersive X-ray microanalysis. The microhardness of the coating phases was measured.

Keywords: hot-dip galvanizing, Zn – Al coating, Galfan, Zn – Fe – Al system, coating microstructure, phase structure, microhardness

For citation: Bondareva O.S. Effect of temperature and holding time in the melt on the microstructure and phase structure of the Zn + 7 % Al coating on steels of various grades. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):93–101. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-93-101](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-93-101)

Введение

Развитие горячего цинкования в последние десятилетия неразрывно связано с легированием цинкового расплава различными добавками для повышения коррозионной стойкости покрытия, контроля его толщины и структуры. Алюминий является одним из самых распространенных легирующих элементов для цинкового расплава [1]. Добавки до 0,005 % Al используются для осветления покрытия, а до 0,06 % Al – для контроля роста толщины покрытия при серийном цинковании [2]. При содержании 0,1 – 0,2 % Al на границе раздела между расплавленным цинком и подложкой железа образуются интерметаллиды Fe – Al, которые играют роль диффузионного барьера, контролируя тем самым последующие реакции между железом и расплавленным цинком [3]. В цинковых ваннах, содержащих 1 – 20 % Al, на поверхности железа образуется слой, имеющий структурный изоморфизм с соединением FeAl₃ [4]. В работах [5; 6] идентифицировали ингибирующий слой как Zn-содержащий интерметаллид Fe₂Al₅, толщина которого увеличивается с ростом концентрации алюминия в цинковой ванне.

В 1980-х гг. для непрерывного цинкования листа и проволоки был внедрен сплав на основе цинка, содержащий 5 % алюминия и 0,05 % мишметалла (ММ), который получил название Galfan. Покрытия из этого сплава на стали демонстрируют более высокие пластичные свойства, чем у обычных горячих цинковых покрытий [7]. Отмечается, что присутствие алюминия в цинковом покрытии повышает его коррозионную стойкость [8]. Это связано с тем, что в покрытии содержатся интерметаллиды FeAl, обладающие высокой коррозионной стойкостью [9; 10]. При эксплуатации изде-

лий на поверхности покрытия формируются защитные слои из оксидов и гидрокарбонатов цинка и алюминия [11; 12]. Однако внедрение расплавов цинка с содержанием алюминия более 0,25 % в отрасли погружного цинкования затруднено из-за того, что традиционный флюс для горячего цинкования ZnCl₂ – NH₄Cl не обеспечивает удовлетворительной смачиваемости изделий расплавом и требуется подбор новых многокомпонентных составов флюсов. Исследования влияния технологических параметров на формирование цинк-алюминиевых покрытий при погружном цинковании очень мало численны. Практически единственная работа по исследованию влияния температуры и продолжительности горячего погружения на микроструктуру и свойства покрытий Zn – 5 % Al была проведена для низкоуглеродистой (0,05 %) и низкокремнистой (0,008 %) стали St13 [13]. В то время как представляет интерес образование цинк-алюминиевых покрытий на сталях различных марок. Известно, что химический состав стали, особенно содержание в ней кремния, оказывает влияние на толщину покрытия, получаемого горячим цинкованием в расплаве чистого цинка [14].

Целью настоящей работы было исследование микроструктуры и фазового состава покрытий, полученных в расплаве Zn + 7 % Al при температуре 420 – 520 °C с временем выдержки до 8 мин для сталей различного состава.

Методы исследования и оборудование

Покрытие наносили на плоские стальные образцы размерами 50 × 50 × 3 мм из стали марок С235, СтЗсп, 09Г2С, 10ХСНД. С помощью оптического-эмиссионного анализатора Foundry-Master XPR определяли химический состав образцов (табл. 1).

Химический состав образцов

Table 1. Chemical composition of the samples

Марка стали	Содержание, %, элементов в стали										
	Fe	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	W
C235	99,46	0,14	0,02	0,35	0,03	–	–	–	–	–	–
Ст3сп	99,17	0,18	0,23	0,41	0,01	–	0,04	0,03	–	–	–
09Г2С	97,53	0,14	0,59	1,65	0,01	0,04	0,03	0,01	–	–	–
10ХСНД	96,11	0,10	0,87	0,50	0,01	0,74	0,03	0,86	0,02	0,68	0,08

Для получения покрытия образцы подвергали щелочному обезжириванию, травлению в 10 %-ой соляной кислоте и флюсованию в разработанном составе флюса (28.12.2024 г. подана заявка на патент № 2024140243), а затем погружали в расплав цинка, содержащий 7 % Al. Температурный диапазон расплава составлял 410 – 520 °С, время цинкования 1 – 8 мин. Толщину покрытия определяли с помощью магнитного толщиномера. Микроструктурные исследования проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA SB. Элементный микроанализ структурных компонентов покрытия определяли с помощью приставки энергодисперсионного спектрального (ЭДС) микроанализа OXFORD INCA x-act. Рентгенофазовый анализ (РФА) покрытия проводили на рентгеновском дифрактометре Дрон-7 в Cu-K_α излучении. Идентификацию фаз проводили по базе Международного центра дифракционных данных ICDD PDF2. Микротвердость структурных составляющих покрытия измеряли на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой 50 г.

Обсуждение результатов

Расплав Zn + 7 % Al имеет температуру плавления около 390 °С, поэтому рабочая температура расплава составляет около 410 – 420 °С. Установлено, что увеличение времени выдержки

изделий в расплаве с 1 до 8 мин не влияет толщину покрытия и составляет в среднем 12,5 мкм (рис. 1).

Толщина покрытия Zn + 7 % Al на сталях различных марок представлена на рис. 2. Выбранные марки стали отличаются по содержанию кремния, который для традиционных горячих цинковых покрытий является реактивным элементом, ускоряющим диффузию между железом и цинком, приводящим к росту толщины покрытия.

Установлено, что толщина покрытия на всех исследуемых марках стали составила 11 – 13 мкм, следовательно, покрытие Zn + 7 % Al нечувствительно по отношению к кремнию, содержащемуся в стали. Изменение толщины покрытия Zn + 7 % Al с ростом температуры расплава приведено на рис. 3.

При температуре цинкования 410 – 460 °С толщина покрытия постоянна (10 – 14 мкм), поверхность покрытия гладкая (рис. 4, а). Однако при температуре 480 °С средняя толщина покрытия составила 35 – 40 мкм, кроме того появились локальные утолщения в виде крупинок 110 – 120 мкм (рис. 4, б). При дальнейшем повышении температуры до 520 °С наблюдается интенсивный рост толщины покрытия до 200 мкм. Поверхность покрытия имеет зернистую структуру (рис. 4, в). Рост толщины покрытия связан с изменением его структуры и фазового состава.

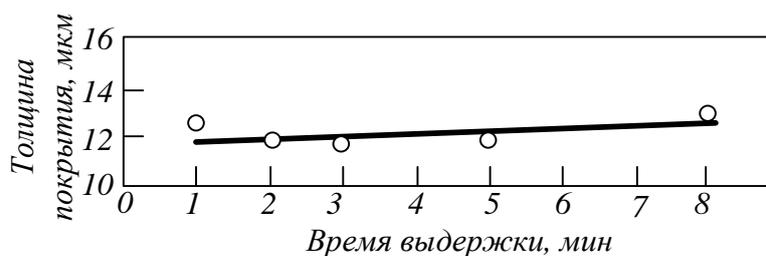


Рис. 1. Влияние времени выдержки в расплаве при температуре 410 – 420 °С на толщину покрытия Zn + 7 % Al
Fig. 1. Effect of the holding time in the melt at a temperature of 410-420 °C on the coating thickness of Zn + 7 % Al

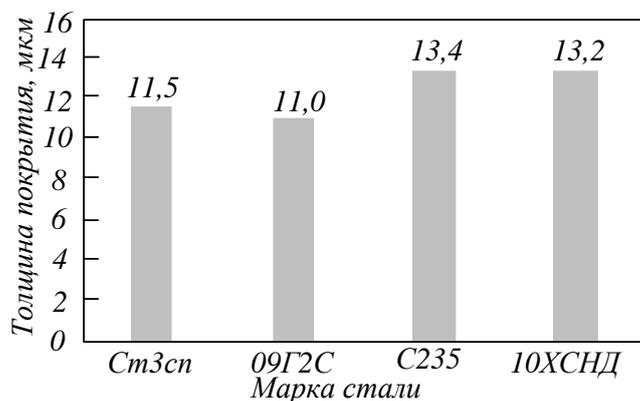


Рис. 2. Толщина покрытия Zn + 7 % Al на различных сталях
Fig. 2. Thickness of Zn + 7 % Al coating on different grades of steel

Рентгенофазовый анализ показал, что в покрытии, полученном при температуре 420 °С, обнаружены фазы цинка и алюминия. Покрытие, полученное при температуре 520 °С, в основном представлено интерметаллидом Fe_2Al_5 и цинком (рис. 5).

Микроструктура покрытия, полученного при температурах 420, 480 и 520 °С, и ЭДС-анализ структурных составляющих приведен в табл. 2 – 4.

Энергодисперсионный и рентгенофазовый анализы позволили установить, что покрытие, полученное при температуре 420 °С, представляет собой тонкий слой интерметаллида $Fe_2Al_5Zn_x$ и расположенную поверх него Zn – Al эвтектику (5 % Al, 3 % Fe и 92 % Zn) с включениями зерен твердого раствора 28 % Al, 3 % Fe в цинке, что соответствует бинарной системе Zn – Al (рис. 6) [15].

При температуре расплава 480 °С на покрытии образуется дефект в виде крупинки. Исследования показали, что в поперечном сечении дефекта есть области различного строения. Был проведен элементный анализ структурных составляющих

покрытия. Результаты элементного анализа приведены в табл. 4.

Можно отметить, что дефект представляет собой интерметаллид, содержащий около 55 % Al, 33 % Fe и 12 % Zn, окруженный фазами бездефектного цинк-алюминиевого покрытия. Качественное распределение элементов показано на рис. 7. На картировании хорошо заметно, что интерметаллид образовался на границе стальная подложка – покрытие в результате растворения стальной подложки.

Покрытие, полученное при температуре 520 °С, имеет слоистое строение, где слои фазы $Fe_2Al_5Zn_x$ чередуются с Zn – Al эвтектикой (табл. 4).

Полученные данные согласуются с диаграммой состояния Zn – Al – Fe (рис. 8) [16; 17].

При увеличении температуры выше 480 °С начинается интенсивное растворение железа и образование тройного интерметаллида η - $Fe_2Al_5Zn_x$.

Микротвердость зерен твердого раствора алюминия в цинке и эвтектической смеси алю-

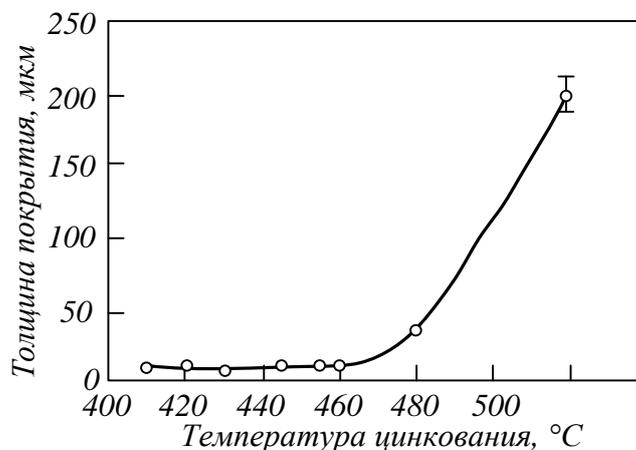


Рис. 3. Влияние температуры цинкования на толщину покрытия
Fig. 3. Effect of galvanizing temperature on coating thickness

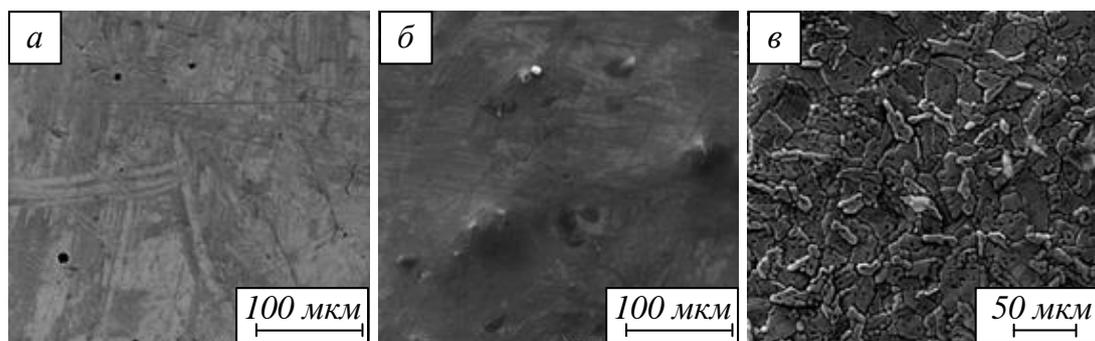


Рис. 4. Поверхность покрытия, полученного в расплаве при температуре 420 (а), 480 (б) и 520 °С (в)
Fig. 4. Surface of the coating obtained in the melt at a temperature of 420 (a), 480 (б) and 520 °C (в)

миния и цинка составила 120 HV₅₀, а интерметаллидных слоев фазы Fe₂Al₅Zn_x около 204 HV₅₀.

Выводы

С увеличением времени выдержки изделий в расплаве с 1 до 8 мин при рабочей температуре 420 °С толщина покрытия не меняется и составляет в среднем 12,5 мкм. Покрытия Zn + 7 % Al имеют одинаковую толщину на всех исследуемых сталях, то есть нечувствительны по отношению к кремнию, содержащемуся в стали. Температура цинкования в диапазоне 410 – 460 °С не оказывает существен-

ного влияния на толщину покрытия, которая составляет 8 – 15 мкм. Микроструктура покрытия представляет собой тонкий слой интерметаллида Fe₂Al₅ и расположенную поверх него Zn – Al эвтектику (около 5 % Al, 3 % Fe и 92 % Zn) с включениями зерен твердого раствора 28 % Al, 3 % Fe в цинке, что соответствует бинарной системе Zn – Al. Средняя толщина покрытия, полученного при температуре 480 °С, составляет 35 – 40 мкм, кроме того появляются локальные утолщения в виде крупинки толщиной 110 – 120 мкм. Этот дефект образуется в результате растворения стальной

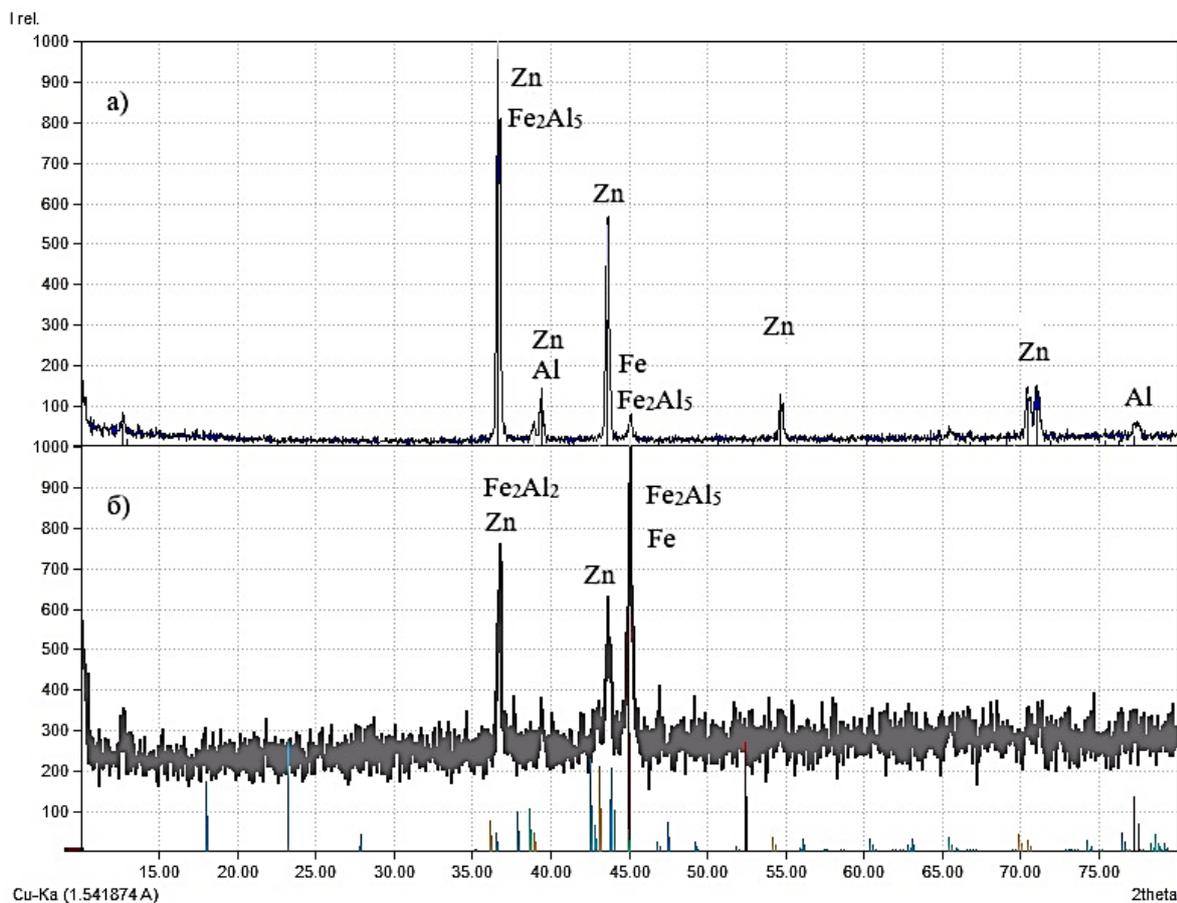
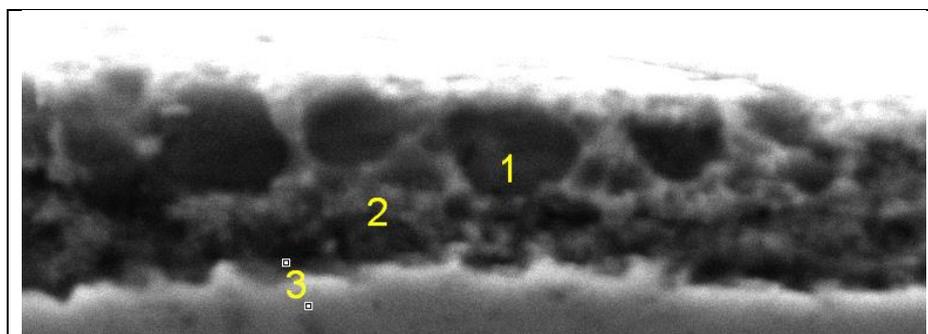


Рис. 5. Дифрактограммы покрытия Zn + 7 % Al, полученного при температуре 420 (а) и 520 °С (б)
Fig. 5. Diffraction patterns of the Zn+7%Al coating obtained at 420 (a) and 520 °C (б)

ЭДС-анализ фазовых слоев в поперечном сечении покрытия Zn + 7 % Al, полученного в расплаве при температуре цинкования 420 °С
 Table 2. EMF analysis of phase layers in the cross section of a Zn + 7% Al coating obtained in a melt at a galvanizing temperature of 420 °C



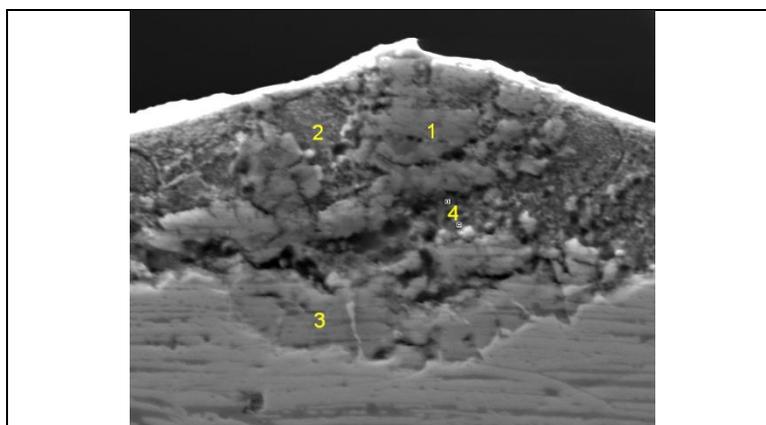
Точка анализа	Al, %	Fe, %	Zn, %	Итого	Фаза
1	4,49	2,85	92,66	100	Эвтектика Zn/Al
2	20,36	3,81	75,83	100	Тв. р-р Zn(Al)
3	26,27	32,80	40,93	100	Fe ₂ Al ₅ Zn _x

Подложки. Он представляет собой интерметаллид Fe₂Al₅Zn_x, содержащий около 55 % Al, 33 % Fe и 12 % Zn, окруженный фазами бездефектного цинк-алюминиевого покрытия. При температуре расплава 520 °С наблюдается резкое увеличение толщины покрытия до 200 мкм. Поверхность покрытия становится зернистой и неоднородной. В поперечном сечении покрытие имеет слоистое строение, где слои фазы η-Fe₂Al₅Zn_x чередуются с Zn – Al эвтектикой. Микротвердость зерен твердого раствора алюминия в цинке и эвтектики составила 120 HV₅₀, а интерметаллидных слоев фазы Fe₂Al₅Zn_x около 204 HV₅₀.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen Z.W. et al. Technigalva and other developments in batch hot-dip galvanizing. *JOM*. 1992;44(1):22–26.
<https://doi.org/10.1007/BF03222746>
2. Бондарева О.С., Добычина О.С. Обзор систем легирования цинкового расплава для погружного горячего цинкования. *Черные металлы*. 2022;(12):76–85.
<https://doi.org/10.17580/chm.2022.12.11>.

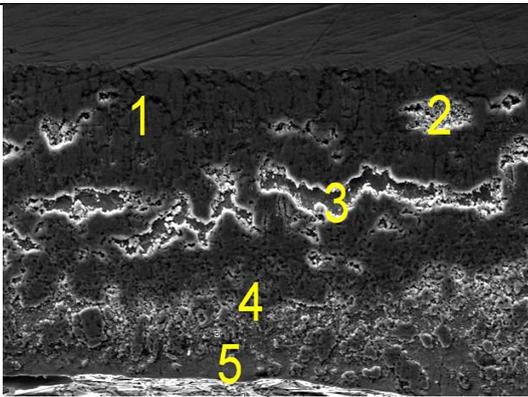
ЭДС-анализ фазовых слоев в поперечном сечении покрытия Zn + 7 % Al, полученного в расплаве при температуре цинкования 480 °С
 Table 3. EMF analysis of phase layers in the cross section of a Zn + 7% Al coating obtained in a melt at a galvanizing temperature of 480 °C



Точка анализа	Al, %	Fe, %	Zn, %	Итого	Фаза
1	55,70	32,58	11,73	100	Fe ₂ Al ₅ Zn _x
2	1,45	1,22	97,34	100	Эвтектика Zn/Al
3	53,28	38,03	8,69	100	Тв. р-р Zn(Al)
4	5,22	3,42	91,36	100	Fe ₂ Al ₅ Zn _x

ЭДС-анализ фазовых слоев в поперечном сечении покрытия Zn + 7 % Al, полученного в расплаве при температуре цинкования 520 °С

Table 4. EMF analysis of phase layers in the cross section of a Zn + 7% Al coating obtained in a melt at a galvanizing temperature of 520 °C



Точка анализа	Al, %	Fe, %	Zn, %	Итого	Фаза
1	45,82	36,16	18,02	100	Fe ₂ Al ₅ Zn _x
2	43,32	30,35	26,32	100	Fe ₂ Al ₅ Zn _x
3	7,17	3,20	89,63	100	Эвтектика Zn/Al
4	41,43	16,52	42,05	100	Fe ₂ Al ₅ Zn _x
5	1,18	0,30	98,52	100	Тв. р-р Zn(Al)

- Kato T. et al. Formation of the ζ phase at an interface between an Fe substrate and a molten 0.2 mass % Al – Zn during galvannealing. *Acta Mater.* 2000;48(9):2257–2262. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00037-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00037-9)
- Shawki S., Hamid Z.A. Effect of aluminium content on the coating structure and dross formation in the hot-dip galvanizing process. *Surf. Interface Anal.* 2003;35(1)2:943–947. <https://doi.org/10.1002/sia.1608>
- Min T. et al. Effects of aluminum concentration on the formation of inhibition layer during hot-dip galvanizing. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018;127:394–402. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.016>
- Khalik A. et al. Iron Intermetallic Compounds (IMCs) Formation Mechanism in the Molten Aluminium Zinc (Al-Zn) Coating Alloy: 2. *Teh. Vjesn.-Tech. Gaz.* 2024; 31(2). <https://doi.org/10.17559/TV-20230523000660>
- Khezarloo A. et al. Effect of coating parameters on microstructure, corrosion behavior, hardness and formability of hot-dip Galfan and galvanized coatings. *Int. J. Mater. Res.* 2021;112(4):321–332. <https://doi.org/10.1515/ijmr-2020-7991>
- Mendala J. Influence of the cooling method on the structure of 55AlZn coatings. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2011;22:012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/22/1/012004>
- Fornalczyk A., Cebulski J., Dorota P. The Morphology of Corrosion Products in FeAl Alloys after Heat-Resistance Tests at Different Temperatures. *Solid State Phenom.* 2015;227:409–412. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.227.409>
- Kania H., Komorowski L. The Influence of the Chemical Composition of a Zinc Bath upon Corrosion Resistance of Coatings Obtained on Sebisty Steel. *Solid State Phenom.* 2016;246:85–90. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.246.85>

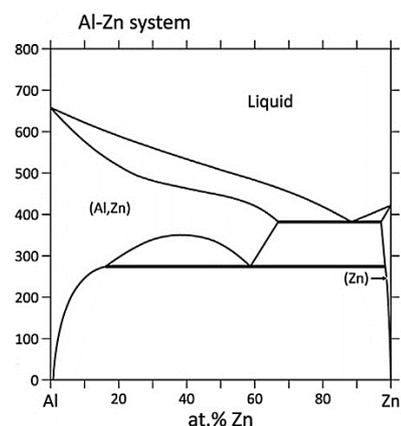


Рис. 6. Фазовая диаграмма Zn – Al [15]
Fig. 6. Phase diagram of the Zn – Al system [15]

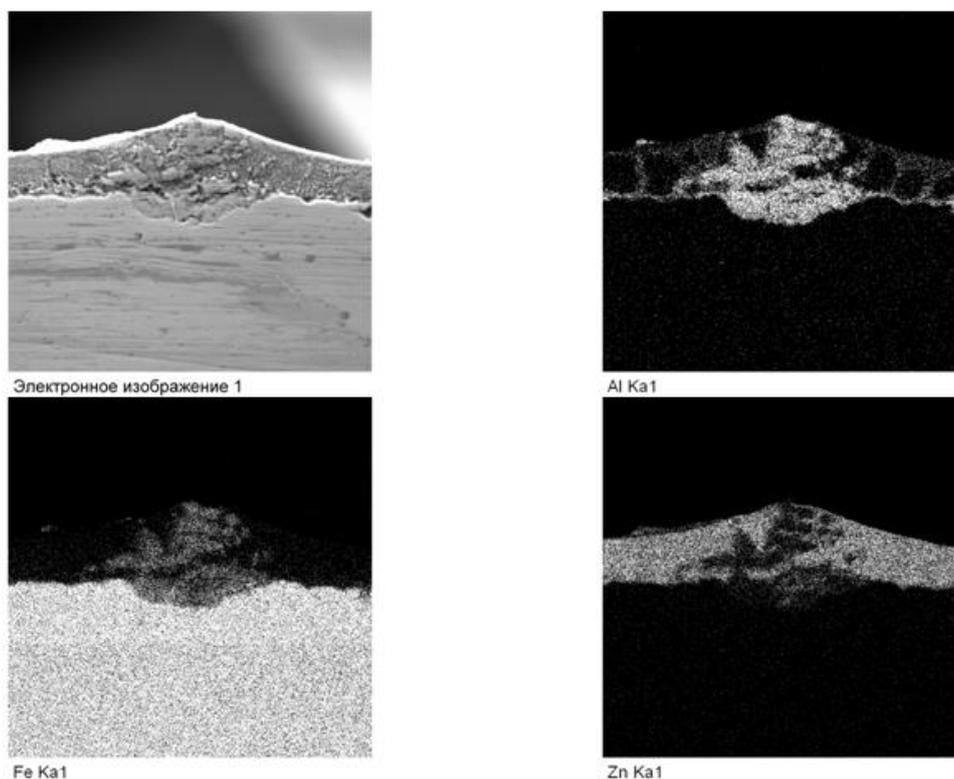


Рис. 7. Распределение элементов по площади поперечного сечения дефекта покрытия, полученного при температуре цинкования 480 °С

Fig. 7. Distribution of elements by the cross-sectional area of the coating defect obtained at a galvanizing temperature of 480 °C

11. Zhang X., Leygraf C., Odnevall Wallinder I. Atmospheric corrosion of Galfan coatings on steel in chloride-rich environments. *Corros. Sci.* 2013;73:62–71. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.03.025>
12. Zhu X. et al. Effect of Hot Dip Plating Process Parameters on Microstructure and Properties of Zinc – 10 % Aluminum – Mischmetal Alloy Coated for Bridge Cable Steel Wire. *Metals.* 2022;12(8):1257. <https://doi.org/10.3390/met12081257>
13. Mesbahzadeh A. et al. Interfacial Investigation of St13/Molten Zn – 5 % Al and Corrosion Behavior of Formed Layer via Hot-Dip Process. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2021;57(1):124–135. <https://doi.org/10.3103/S1068375521010087>
14. Han S.-C. et al. Role of silicon on formation and growth of intermetallic phases during rapid Fe – Zn alloying reaction. *Mater. Today Adv.* 2023;18:100368. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2023.100368>
15. Lee I. et al. Experimental determination of phase diagram at 450 °C in the Zn–Fe–Al ternary system. *J. Alloys Compd.* 2021;854:157163.
16. Ghosh G., Palm M. Al-Fe-Zn Ternary Phase Diagram Evaluation. *MSI Eureka.* 2023;96:10.17658.4.5. <https://doi.org/10.7121/msi-eureka-10.17658.4.5>
17. Tang N.-Y., Su X. On the ternary phase in the zinc-rich corner of the Zn-Fe-Al system at temperatures below 450 °C. *Metall. Mater. Trans. A.* 2002;33(50):1559–1561. <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0078-5>

REFERENCES

1. Bondareva O.S., Dobychnina O.S. Review of zinc melt alloying systems for immersion hot-dip galvanizing. *Chernye metally.* 2022;(12):76–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2022.12.11>
2. Chen Z.W. et al. Technigalva and other developments in batch hot-dip galvanizing. *JOM.* 1992;44(1):22–26. <https://doi.org/10.1007/BF03222746>
3. Kato T. et al. Formation of the ζ phase at an interface between an Fe substrate and a molten 0.2 mass % Al – Zn during galvannealing. *Acta Mater.* 2000;48(9):2257–2262. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00037-9](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00037-9)
4. Shawki S., Hamid Z.A. Effect of aluminium content on the coating structure and dross formation in the hot-dip galvanizing process. *Surf. Interface Anal.* 2003;35(12):943–947. <https://doi.org/10.1002/sia.1608>
5. Min T. et al. Effects of aluminum concentration on the formation of inhibition layer during hot-dip galvanizing. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018;127:394–402. <https://doi.org/10.1016/j.ijheat-masstransfer.2018.08.016>

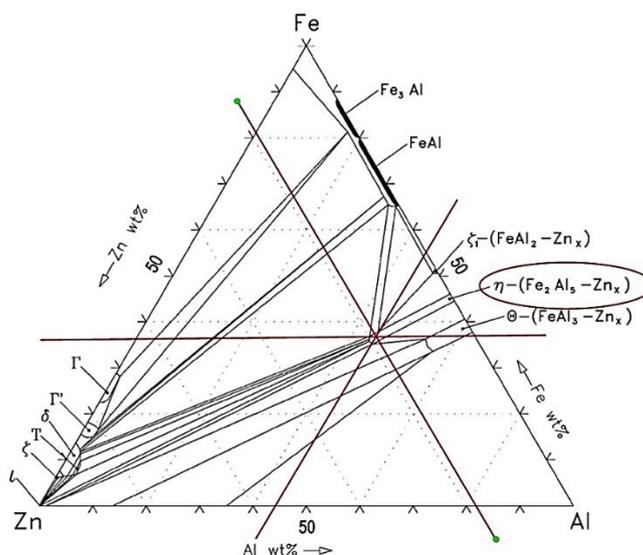


Рис. 8. Тройная диаграмма состояния Zn – Al – Fe (изотермический разрез при температуре 450 °C [16; 17])
 Fig. 8. Ternary phase diagram of Zn – Al – Fe system (isothermal section at 450 °C [16; 17])

6. Khaliq A. et al. Iron Intermetallic Compounds (IMCs) Formation Mechanism in the Molten Aluminium Zinc (Al-Zn) Coating Alloy: 2. *Teh. Vjesn.-Tech. Gaz.* 2024; 31(2).
<https://doi.org/10.17559/TV-20230523000660>
7. Khezrloo A. et al. Effect of coating parameters on microstructure, corrosion behavior, hardness and formability of hot-dip Galfan and galvanized coatings. *Int. J. Mater. Res.* 2021;112(4):321–332.
<https://doi.org/10.1515/ijmr-2020-7991>
8. Mendala J. Influence of the cooling method on the structure of 55AlZn coatings. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2011;22:012004.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/22/1/012004>
9. Fornalczyk A., Cebulski J., Dorota P. The Morphology of Corrosion Products in FeAl Alloys after Heat-Resistance Tests at Different Temperatures. *Solid State Phenom.* 2015;227:409–412.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.227.409>
10. Kania H., Komorowski L. The Influence of the Chemical Composition of a Zinc Bath upon Corrosion Resistance of Coatings Obtained on Sebisty Steel. *Solid State Phenom.* 2016;246:85–90.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.246.85>
11. Zhang X., Leygraf C., Odnevall Wallinder I. Atmospheric corrosion of Galfan coatings on steel in chloride-rich environments. *Corros. Sci.* 2013;73:62–71.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.03.025>
12. Zhu X. et al. Effect of Hot Dip Plating Process Parameters on Microstructure and Properties of Zinc – 10 % Aluminum – Mischmetal Alloy Coated for Bridge Cable Steel Wire. *Metals.* 2022;12(8):1257.
<https://doi.org/10.3390/met12081257>
13. Mesbahzadeh A. et al. Interfacial Investigation of St13/Molten Zn – 5 % Al and Corrosion Behavior of Formed Layer via Hot-Dip Process. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 2021;57(1):124–135.
<https://doi.org/10.3103/S1068375521010087>
14. Han S.-C. et al. Role of silicon on formation and growth of intermetallic phases during rapid Fe – Zn alloying reaction. *Mater. Today Adv.* 2023;18:100368.
<https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2023.100368>
15. Lee I. et al. Experimental determination of phase diagram at 450 °C in the Zn–Fe–Al ternary system. *J. Alloys Compd.* 2021;854:157163.
16. Ghosh G., Palm M. Al-Fe-Zn Ternary Phase Diagram Evaluation. *MSI Eureka.* 2023;96:10.17658.4.5.
<https://doi.org/10.7121/msi-eureka-10.17658.4.5>
17. Tang N.-Y., Su X. On the ternary phase in the zinc-rich corner of the Zn–Fe–Al system at temperatures below 450 °C. *Metall. Mater. Trans. A.* 2002;33(50): 1559–1561. <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0078-5>

Сведения об авторах

Ольга Сергеевна Бондарева, к.т.н., доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королева

E-mail: osbond@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-4273-2483

Information about the authors:

Olga S. Bondareva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University

E-mail: osbond@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-4273-2483

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
 The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 28.01.2025

После доработки 17.02.2025

Принята к публикации 20.02.2025

Received 28.01.2025

Revised 17.02.2025

Accepted 20.02.2025

Оригинальная статья

УДК 669.782

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-102-109

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАФИНИРОВАНИЯ РАСПЛАВА
В КОНВЕРТЕРАХ С ЖИДКОФАЗНЫМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ**

© 2025 г. **Е. В. Протопопов, А. А. Уманский, М. К. Шакиров, Е. А. Беленецкий,
С. С. Фатьянов**

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. С точки зрения ресурсосбережения актуальным является совершенствование существующих и разработка новых модификаций конвертерных процессов, в том числе технологии с комбинированной продувкой и элементами жидкофазного восстановления, обеспечивающих переработку различных отходов и экономию материалов при улучшении технико-экономических показателей и экологической обстановки. Представлены основные положения процессов с жидкофазным восстановлением промышленных отходов, предусматривающих двухстадийное газоокислородное рафинирование расплава при пространственном распределении технологических операций в объеме агрегата. Для реализации технологии конвертер должен иметь системы подачи различных технологических газов в расплав, в том числе донного перемешивания инертным газом, с использованием двухпоточных продувочных и боковых фурм. Высокая степень восстановления оксидов железа из техногенных отходов достигается на первой (восстановительной) стадии. На этом этапе в залитый в агрегат чугун присаживают железосодержащие отходы и углеродсодержащие материалы (восстановители). Теоретический анализ процесса позволил выделить основные взаимодействующие фазы и зоны (поверхности) их контакта. Описаны термодинамические и кинетические закономерности протекания реакций жидкофазного восстановления. Скорость процесса окисления – восстановления предложено рассматривать как суммарную скорость процессов окисления железа жидкого чугуна газообразным кислородом и восстановления оксидов железа кремнием, фосфором и углеродом. Определены основные параметры, влияющие на скорость и полноту протекания процесса восстановления оксидов железа перерабатываемых отходов примесными элементами жидкого чугуна, а также дополнительно вводимым углеродсодержащим восстановителем. Предложена математическая модель, описывающая взаимодействие фаз, использование которой позволяет целенаправленно воздействовать на кинетические факторы в зависимости от текущих термодинамических условий и решаемых задач.

Ключевые слова: конвертер, жидкофазное восстановление, комбинированная продувка, шлако-металлическая эмульсия, модель рафинирования

Для цитирования: Протопопов Е.В., Уманский А.А., Шакиров М.К., Беленецкий Е.А., Фатьянов С.С. Физико-химическая модель рафинирования расплава в конвертерах с жидкофазным восстановлением. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):102–109. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-102-109](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-102-109)

Original article

**PHYSICO-CHEMICAL MODEL OF REFINING MELT IN LIQUID PHASE
REDUCTION CONVERTERS**

© 2025 **E. V. Protopopov, A. A. Umansky, M. K. Shakirov, E. A. Belenetsky, S. S. Fatyanov**

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. From the point of view of resource conservation, it is important to improve existing and develop new modifications of converter processes, including technologies with combined purging and liquid-phase recovery elements, which ensure the processing of various wastes and save materials while improving technical and economic performance and environmental conditions. The main provisions of processes with liquid-phase recovery of industrial waste involving two-stage oxygen-gas refining of the melt with spatial distribution of technological operations in the volume of the unit are presented. To implement the technology, the converter must have systems for supplying various process gases to the melt, including bottom mixing with inert gas, using two-flow purge and side tuyeres. A high degree of reduction of iron oxides from man-made waste is achieved at the first (reducing) stage. At this stage, iron-containing waste and carbon-containing materials (reducing agents) are added to the cast iron poured into the unit. A theoretical analysis of the process made it possible to identify the main interacting phases and the zones (surfaces) of their contact. Thermodynamic and kinetic patterns of liquid-phase reduction reactions are described. The rate of the oxidation–reduction process is proposed to be considered as the total rate of oxidation of iron in liquid cast iron with gaseous oxygen and reduction of iron oxides with silicon, phosphorus and carbon. The main parameters influencing the speed and completeness of the iron oxide reduction process of the processed waste by impurity elements of liquid cast iron, as well as an additional carbon-containing reducing agent, are determined. A mathematical model describing the interaction of phases is proposed, the use of which makes it possible to purposefully influence kinetic factors depending on the current thermodynamic conditions and the tasks being solved.

Keywords: converter, liquid phase reduction, combined purging, slag-metal emulsion, refining model

For citation: Protopopov E.V., Umansky A.A., Shakirov M.K., Belenetsky E.A., Fatyanov S.S. Physico-chemical model of melt refining in liquid-phase reduction converters. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):102–109. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-102-109](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-102-109)

Введение

Для реализации основных направлений развития мировой отрасли [1 – 4] необходимо совершенствование существующих и разработка новых модификаций ресурсо- и энергосберегающих конвертерных процессов, в том числе работающих по технологии с комбинированной продувкой и элементами жидкофазного восстановления, обеспечивающих переработку различных отходов и экономию материалов при улучшении технико-экономических показателей и экологической обстановки [5 – 9]. Успешное решение поставленных проблем невозможно без теоретических и экспериментальных исследований в новых направлениях для создания достоверной физико-химической модели явлений, протекающих при различных способах конвертирования металла и осознанного практического применения полученных данных.

Рациональная оценка определения эффективности использования комплексной технологии в реальных условиях может быть основана на гипотезе баланса железа как основного элемента расплава конвертерной ванны. При этом в основу анализа может быть положена идея определения термодинамической «движущей силы» реакций восстановления железа из шлакометаллической фазы в течение процесса, а также ее изменение с учетом кинетических факторов [10 – 12].

Железо (химический элемент) является основой металлозавалки в любом сталеплавильном процессе

и по ходу плавки в определенном количестве переходит в окисленной форме в шлаковую фазу, частично остается в конечном шлаке, что приводит к потерям металла [13]. Возможны и другие потери железа: при выбросах шлакометаллической эмульсии из конвертера; испарение железа в высокотемпературной реакционной зоне; дополнительные потери при выносе и сворачивании шлака [7; 9; 14]. Все эти негативные явления связаны с текущим изменением содержания оксидов железа в шлаке, которое оказывает влияние не только на закономерности протекания основных физико-химических превращений, но и на целый ряд важнейших показателей (на выход жидкой стали). В случае реализации процесса с жидкофазным восстановлением предусматривается ввод значительного количества железосодержащих промышленных отходов в ванну по ходу продувки.

Методика исследований

Для обеспечения максимального восстановления железа из оксидов при переработке техногенных отходов в шлаковой ванне разработана технология конвертерной плавки (рис. 1), предусматривающая двухстадийное газокислородное рафинирование расплава с элементами жидкофазного восстановления [15]:

1. Восстановительная стадия – обеспечивает высокую степень восстановления железа из шлаковых концентратов, техногенных отходов,

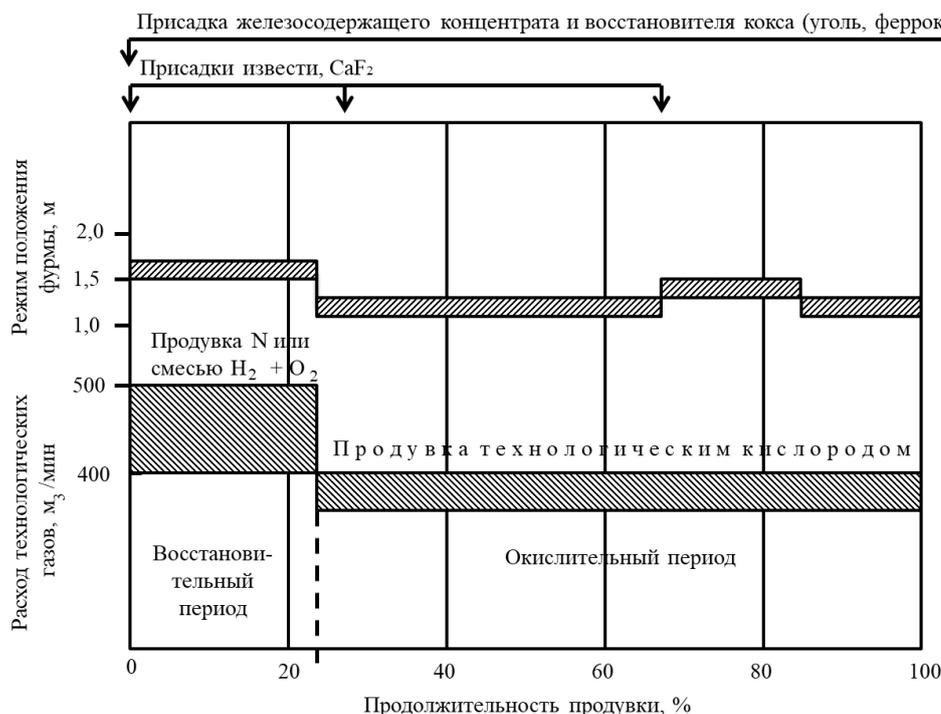


Рис. 1. Технологический режим двухстадийной конвертерной плавки с элементами жидкофазного восстановления
 Fig. 1. Technological mode of two-stage converter melting with elements of liquid phase reduction

шлакостальных коржей. Для этого в залитый в агрегат чугун («подложка») присаживают железосодержащие отходы и углеродсодержащие материалы – восстановители (кокс, феррококс, антрацит и другие), для интенсификации массообменных процессов при восстановлении расплав интенсивно перемешивается азотом или газокислородной смесью.

2. Реализуется окислительная продувка по разработанному дутьевому и шлаковому режимам плавки.

Принципиальная схема конвертерного процесса с жидкофазным восстановлением техногенных отходов и дожиганием отходящих газов в полости агрегата представлена на рис. 2.

В рассматриваемом случае конвертер с комбинированной продувкой должен быть оборудован системой донного перемешивания нейтральными газами, подачей через боковые фурмы газообразного топлива для интенсификации массообменных процессов в ванне и для улучшения теплового баланса плавки.

Важным элементом технологии следует считать использование специальных конструкций дутьевых устройств, обеспечивающих дожигание в рабочем пространстве отходящих газов [9; 16 – 19].

Выделенными реакционными зонами восстановления будут следующие: 1 – поверхность контакта всплывающих частиц железосодержащих отходов (ЖО) с жидким чугуном; 2 – поверхность контакта всплывающих капель шлака

(ШЛ) с жидким чугуном; 3 – поверхность контакта всплывающих капель шлака с взвешенным в расплаве углеродсодержащим материалом (УМ); 4 – поверхность контакта шлака с жидким чугуном; 5 – поверхность контакта шлака с взвешенными в расплаве углеродсодержащими материалами.

Можно выделить следующие взаимодействующие фазы:

I – жидкий чугун, который будет являться начальной «емкостью» тепла и постоянным гетерогенным многофазным расплавом для восстановления железа [9];

II – твердая смесь из железосодержащего концентрата и восстановителя – углерода (антрацит, энергетический уголь, угольная пыль, феррококс), в которой протекают основные восстановительные процессы; впоследствии выделяются жидкие фазы (оксидная (шлак) и металлическая (на основе железа)), которые переходят в фазу *I*;

III – газовая фаза (зона смешения продуктов конверсии) природного газа и горения оксида углерода CO и водорода; распределена практически по всему внутреннему объему над жидкими фазами расплава; в этой зоне предусматривается подача технологических газов через верхнюю основную и вспомогательные фурмы в зону смешения отходящих газов, в оксидную фазу и через донные фурмы в металлическую фазу;

IV – разделительная «вспомогательная» фаза, твердый углерод (восстановитель и топливо)

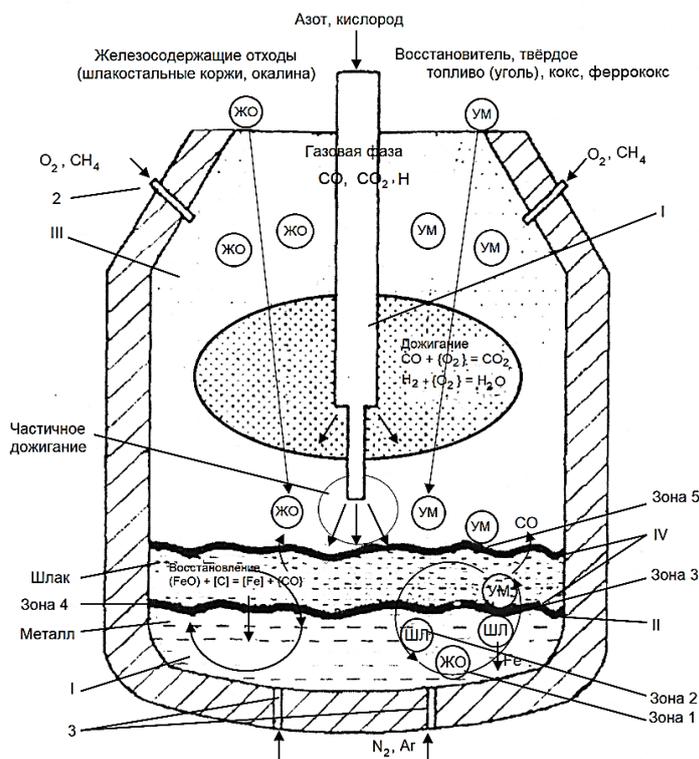


Рис. 2. Схема конвертерного процесса с жидкофазным восстановлением железосодержащих материалов:
 1 – верхняя двухпоточная кислородная фурма; 2 – боковые фурмы (O₂, CH₄); 3 – донные фурмы (N₂, Ar, O₂, CO)
 Fig. 2. Diagram of the converter process with liquid-phase reduction of iron-containing materials:
 1 – upper double-flow oxygen tuyere; 2 – side tuyeres (O₂, CH₄); 3 – bottom tuyeres (N₂, Ar, O₂, CO)

состоит из двух условных областей (в нижней части между металлической (I) и оксидной (II) фазами), где поддерживается концентрация углерода в металле на уровне насыщения и обеспечивается восстановление железа из его оксида. В верхней области между зонами смешения газов и оксидов проходит условная граница раздела пространства с преобладанием восстановительных (II) и окислительных (III) свойств; кроме того, в зоне IV определенная часть углерода окисляется при взаимодействии с кислородом технологических газов и служит дополнительным источником тепла.

Для описания исследуемого объекта, в частности для оценки текущего содержания оксидов железа в активно барботируемом расплаве с развитой межфазной поверхностью, использовали подходы, рассмотренные в работах [13; 20].

При разработке математической модели процесса жидкофазного восстановления учитывали, что содержание оксидов железа в ванне изменяется в результате протекания на условной границе раздела металла и шлака двух противоположно направленных процессов: окисления железа со скоростью W_1 на поверхности контакта жидкого металла с потоком окислительного газа (струи кислорода) и восстановления железа из его оксида со скоростью W_2 в начале кремнием, а затем фосфором и углеродом, растворенными в

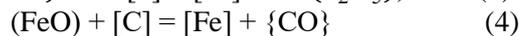
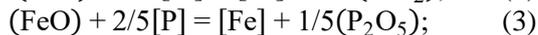
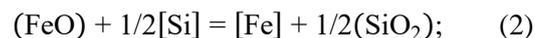
жидком чугуне, и дополнительно введенным углеродсодержащим восстановителем (например, феррококсом).

Для промышленных агрегатов скорость W_1 образования оксида железа (скорость окисления железа) будет определяться в основном объемной скоростью q подачи окислительного газа [10; 21]:

$$W_1 = 80\alpha_0 x_{\text{ок}}^{\text{нач}} q x_{\text{Fe}}, \quad (1)$$

где α_0 – степень использования окислителя, доля от единицы; $x_{\text{ок}}^{\text{нач}}$ и x_{Fe} – молярная доля окислителя в исходном газе и железа в металле.

Суммарная скорость противоположного процесса – восстановления оксидов железа по реакциям



будет зависеть не только от термодинамических функций, но и от их кинетических констант и суммарной эффективной площади $S_{\text{эф}}$ контакта жидких металла и шлака. В рассматриваемых условиях особую роль будут играть мероприятия по организации интенсивного перемешивания барботируемой шлакометаллической ванны (рис. 2).

В общем случае смешанного в кинетическом отношении взаимодействия величину W_2 , моль FeO/c, можно определить по следующей формуле:

$$W_2 = S_{\text{эф}} \sum_{i=1}^3 k_i^0 \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \{[i]^{n_i}[(\text{FeO}) - (\text{FeO})_i^*]^{m_i}\}; \quad (5)$$

здесь k_i^0 и E_i – безразмерная предэкспонента константы скорости i -й реакции и ее энергия активации, Дж/моль; $R = 8,314$ Дж/(моль·К); T – температура, К; $[i]$ – содержание компонента i (кремния, фосфора или углерода) в металле, %; (FeO) и $(\text{FeO})_i^*$ – фактическое и равновесное с i -м компонентом содержания оксида железа FeO в шлаке, %; n_i и m_i – порядок реакции по компоненту i и оксиду железа FeO.

Разность между величинами W_1 и W_2 будет определять суммарную скорость изменения содержания оксида железа FeO в шлаке:

$$W = \frac{dn_{\text{FeO}}}{d\tau} = W_1 - W_2. \quad (6)$$

Постановка задачи оптимизации параметров процесса с целью получения минимального конечного содержания оксида железа FeO в шлаке будет определяться условием

$$n_{\text{FeO}}^{\text{кон}} = \int_0^{n_{\text{FeO}}^{\text{кон}}} dn_{\text{FeO}} = \int_0^{\tau_{\text{пр}}} W d\tau = \int_0^{\tau_{\text{пр}}} [(W_1) - (W_2)] d\tau \rightarrow \min, \quad (7)$$

здесь индексы «кон» и «пр» – конечное значение параметров и времени продувки.

Решение задачи оптимизации с использованием уравнения (7) осложняется тем, что не все кинетические константы известны (k_i^0 , E_i , n_i и m_i). Для качественного анализа можно предложить упрощенную кинетическую теорию гетерогенных реакций между двумя жидкими фазами [11]. Суть этой кинетической теории заключается в том, что гетерогенные реакции типа (а) – (б) лимитируются медленными стадиями диффузии одного из компонентов в одной из фаз [10; 11]. При этом наиболее простую форму кинетическое уравнение (5) приобретает в случае малой скорости диффузии оксида железа FeO в шлаковой фазе, а это один из наиболее вероятных вариантов, так как константы равновесия реакций взаимодействия оксида железа FeO с кремнием, фосфором и углеродом достаточно велики и поэтому торможение реакций диффузией их продуктов маловероятно. При таком предположении кинетические уравнения реакции восстановления же-

леза из его оксида каждым из отмеченных элементов (восстановителей) будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} W_2^{\text{Si}} &= \beta_{\text{FeO}} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{Si}}^*] = \nu D_{\text{FeO}}^{0,5} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{Si}}^*]; \\ W_2^{\text{P}} &= \beta_{\text{FeO}} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{P}}^*] = \nu D_{\text{FeO}}^{0,5} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{P}}^*]; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} W_2^{\text{C}} &= \beta_{\text{FeO}} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{C}}^*] = \nu D_{\text{FeO}}^{0,5} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{C}}^*]. \\ W_2^{\text{C}} &= \beta_{\text{FeO}} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{C}}^*] = \nu D_{\text{FeO}}^{0,5} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{C}}^*]. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} W_2^{\text{C}} &= \beta_{\text{FeO}} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{C}}^*] = \nu D_{\text{FeO}}^{0,5} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{C}}^*]. \\ W_2^{\text{C}} &= \beta_{\text{FeO}} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{C}}^*] = \nu D_{\text{FeO}}^{0,5} S_{\text{эф}} [(\text{FeO}) - (\text{FeO})_{\text{C}}^*]. \end{aligned} \quad (10)$$

При этом суммарное уравнение будет иметь вид:

$$W_2 = W_2^{\text{Si}} + W_2^{\text{P}} + W_2^{\text{C}} = 3\nu D_{\text{FeO}}^{0,5} S_{\text{эф}} \times \left\{ (\text{FeO}) - \frac{1}{3} [(\text{FeO})_{\text{Si}}^* + (\text{FeO})_{\text{P}}^* + (\text{FeO})_{\text{C}}^*] \right\}; \quad (11)$$

здесь $\beta_j = D_i/\delta_i$ – константа скорости массоотдачи, м/с; D_i – коэффициент диффузии компонента, м²/с; δ_i – эффективная толщина пограничного диффузионного слоя, м; ν – одинаковая для всех компонентов константа конвекции, с^{-0,5} [10; 21].

Движущая сила каждой из реакций восстановления железа из оксида FeO, кроме текущего содержания последнего, определяется равновесной с восстановителем величиной $(\text{FeO})_i^*$, которая в свою очередь связана с рассчитываемой по табличным термодинамическим данным константой равновесия K соответствующей реакции:

$$K_a = \frac{\alpha_{\text{Fe}} \alpha_{\text{SiO}_2}^{1/2}}{\alpha_{\text{FeO}} \alpha_{\text{Si}}^{1/2}} = f_a(T); \quad (12)$$

$$K_b = \frac{\alpha_{\text{Fe}} \alpha_{\text{P}_2\text{O}_5}^{1/5}}{\alpha_{\text{FeO}} \alpha_{\text{P}}^{2/5}} = f_b(T); \quad (13)$$

$$K_c = \frac{\alpha_{\text{Fe}} \alpha_{\text{CO}}}{\alpha_{\text{FeO}} \alpha_{\text{C}}} = f_c(T). \quad (14)$$

где α_j – активность компонента j .

Результаты и их обсуждение

Использование уравнений (1), (7) и (11) позволяет решать задачу оптимизации процесса по тому или иному отмеченному признаку [10; 11]. Если необходимо будет реализовать задачу повышения производительности процесса, необходимо

увеличивать движущую силу и кинетические факторы, то есть оптимизировать развитие процессов восстановления железа из присаженных материалов (техногенных отходов) при создании условий эффективного перемешивания взаимодействующих фаз. При реализации более сложных задач необходимо целенаправленно менять кинетические факторы в отдельные периоды процесса в зависимости от сложившихся термодинамических условий, то есть от движущей силы.

Выводы

На основе современных представлений построено описание процессов, протекающих при переработке твердых железосодержащих отходов с использованием технологии жидкофазного восстановления. Выделены основные взаимодействующие фазы и параметры, определяющие скорость и полноту восстановления оксидов железа. Предлагаемая математическая модель может быть использована при разработке рекомендаций для ведения восстановительной стадии процесса при изменяющихся начальных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jan van der, Louwerse G. Top gas recycling blast furnace benefits and “green” and sustainable ironmaking. *Ironmaking and Steelmaking*. 2013;40(7):483–489. <https://doi.org/10.1179/0301923313Z.000000000221>
2. Voraberger B., Wimmer G., Dieguez Salgado U., Wimmer E., Pastucha K., Fleischanderl A. Green LD (BOF) Steelmaking – Reduced CO₂ Emissions via Increased Scrap Rate. *Metals*. 2022;12: 466. <https://doi.org/10.3390/met12030466>
3. Fruehan R. Recycling of Waste Oxides in Steelmaking. *Final Report for Project*. 2000:103. <https://doi.org/10.2172/789632>
4. Singh A.K., Raju M.T., Jha U. Recycling of Basic Oxygen Furnace (BOF) sludge in iron and steel works. *International Journal of Environmental Technology and Management*. 2011;14(1/2/3/4):19–32. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2011.039255>
5. Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. Сравнительная характеристика состояния кислородно-конвертерного производства стали в России и за рубежом. Москва: Элиз, 2000:64.
6. Григорович К.В. Современное состояние черной металлургии и направления ее развития в цифровой экономике. В кн.: *Труды XV международного конгресса сталеплавателей*, Москва – Тула, 15-19 октября 2018 г. Москва: ООО «РПК ПринтАП», 2018:42–59.
7. Меркер Э.Э., Карпенко Г.А. *Физические процессы в конвертере и энергоэкологические показатели производства*. Старый Оскол: Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2014:328.
8. Григорович К.В. Металлургия XXI века: современное состояние и направления развития. В кн.: *Труды XIV международного конгресса сталеплавателей*, Москва – Электросталь, 17-21 октября 2016 г. Москва: ООО «РПК ПринтАП», 2016:56–65.
9. Протопопов Е.В., Шакиров К.М., Айзатулов Р.С. Обоснование некоторых параметров технологии конвертерной плавки с элементами жидкофазного восстановления. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1998;12:15–18.
10. Шакиров К.М. *Кинетика гетерогенных процессов. Развернутое кинетическое уравнение быстрых гетерогенных реакций в потоке*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2012:76.
11. Попель С.И., Сотников А.И., Борисенков В.Н. Теория металлургических процессов. Москва: Металлургия, 1986:463.
12. Pal J., Singh S., Ghose A.K., Mohan S. A mathematical model for end point control of basic oxygen steelmaking furnace. *Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2002;44(1):39–49.
13. Огороков Б.Н. *Линейная энергодинамика открытых систем сталеплавильных процессов*. Москва: Металлургиздат, 2021:520.
14. Мокринский А.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Жибинова И.А., Шакиров К.М., Ганзер Л.А. Исследование гидродинамики конвертерной ванны при продувке расплава в агрегате жидкофазного восстановления. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2006;(6):7–11.
15. Пат. 2107737 РФ. Способ выплавки стали в конвертере / Е.В. Протопопов, Р.С. Айзатулов, В.В. Соколов и др.; заявл. 26.02.97; опубл. 27.03.98.
16. Жибинова И.А., Шакиров К.М., Протопопов Е.В., Шакиров М.К. Термодинамическое обоснование технологии жидкофазного восстановления оксидных материалов в условиях кислородно-конвертерного процесса. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2009;(2):17–20.
17. Chen, J.D., Zhang C.J. and Feng J.H. Static mechanics model in loading converter and energy saving. *Journal of Hebei Institute of Technology*. 2007;29(1):32–35.
18. Ray S.K., Gautam Chattopadhyay G., Asim K. Ray A.K. Evaluation of Dust Generated from Basic Oxygen Furnace Steel Making. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 1997.47(6):716–721. <https://doi.org/10.1080/10473289.1997.10463929>

19. Pal J., Ghorai S., Singh D. P. Performance Assessment of CO₂ Treated Fluxed Iron Oxide Pellets in Basic Oxygen Steel Making Process. *ISIJ International*. 2010;50(1):105–114.
20. Dering D., Swartz C., Dogan N. Dynamic Modeling and Simulation of Basic Oxygen Furnace (BOF) Operation. *Processes*. 2020;8(4):483. <https://doi.org/10.3390/pr8040483>
21. Жибинова И.А., Шакиров К.М., Протопопов Е.В., Пошевнева А.И. Термодинамический анализ реакций восстановления железа и марганца из их монооксидов примесями металла в условиях «подавляющего» окисления железа. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2005;(2):3–6.

REFERENCES

1. Jan van der, Louwense G. Top gas recycling blast furnace benefits and “green” and sustainable ironmaking. *Ironmaking and Steelmaking*. 2013;40(7):483–489. <https://doi.org/10.1179/0301923313Z.000000000221>
2. Voraberger B., Wimmer G., Dieguez Salgado U., Wimmer E., Pastucha K., Fleischanderl A. Green LD (BOF) Steelmaking – Reduced CO₂ Emissions via Increased Scrap Rate. *Metals*. 2022;12: 466. <https://doi.org/10.3390/met12030466>
3. Fruehan R. Recycling of Waste Oxides in Steelmaking. *Final Report for Project*. 2000:103. <https://doi.org/10.2172/789632>
4. Singh A.K., Raju M.T., Jha U. Recycling of Basic Oxygen Furnace (BOF) sludge in iron and steel works. *International Journal of Environmental Technology and Management*. 2011;14(1/2/3/4):19–32. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2011.039255>
5. Lyakishev N.P., Shalimov A.G. *Comparative characteristics of oxygen converter steel production in Russia and abroad*. Moscow: Eliz, 2000:64. (In Russ.).
6. Grigorovich K.V. The current state of ferrous metallurgy and the directions of its development in the digital economy. In: *Proceedings of the XV International Congress of Steelmakers*, Moscow – Tula, October 15-19, 2018, Moscow: OOO «RPK PrintAP», 2018:42–59. (In Russ.).
7. Merker E.E., Karpenko G.A. *Physical processes in the converter and energy-ecological indicators of production*. Stary Oskol: Izd-vo «Tonkie naukoemkie tekhnologii», 2014:328. (In Russ.).
8. Grigorovich K.V. Metallurgy of the XXI century: current state and directions of development. In: *Proceedings of the XIV International Congress of Steelmakers*, Moscow – Elektrostal, October 17-21, 2016, Moscow: OOO «RPK PrintAP», 2016:56–65. (In Russ.).
9. Protopopov E.V., Shakirov K.M., Aizatulov R.S. Substantiation of certain parameters of the technology of converter melting with elements of liquid phase reduction. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1998;12:15–18. (In Russ.).
10. Shakirov K.M. *Kinetics of heterogeneous processes. An expanded kinetic equation of fast heterogeneous reactions in a flow*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2012:76. (In Russ.).
11. Popel' S.I., Sotnikov A.I., Borisenkov V.N. *Theory of metallurgical processes*. Moscow: Metallurgiya, 1986:463. (In Russ.).
12. Pal J., Singh S., Ghose A.K., Mohan S. A mathematical model for end point control of basic oxygen steelmaking furnace. *Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2002;44(1):39–49.
13. Okorokov B.N. *Linear energy dynamics of open systems of steelmaking processes*. Moscow: Metallurgizdat, 2021:520. (In Russ.).
14. Mokrinskii A.V., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Zhibinova I.A., Shakirov K.M., Ganzer L.A. Investigation of the hydrodynamics of a converter bath during purging of a melt in a liquid-phase reduction unit. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2006;(6):7–11. (In Russ.).
15. Protopopov E.V., Aizatulov R.S., Sokolov V.V. etc. Method of steel smelting in a converter. Pat. 2107737 RF.; заявл. 26.02.97; opubl. 27.03.98. (In Russ.).
16. Zhibinova I.A., Shakirov K.M., Protopopov E.V., Shakirov M.K. Thermodynamic substantiation of the technology of liquid-phase reduction of oxide materials in the oxygen converter process. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2009;(2):17–20. (In Russ.).
17. Chen, J.D., Zhang C.J. and Feng J.H. Static mechanics model in loading converter and energy saving. *Journal of Hebei Institute of Technology*. 2007;29(1):32–35.
18. Ray S.K., Gautam Chattopadhyay G., Asim K. Ray A.K. Evaluation of Dust Generated from Basic Oxygen Furnace Steel Making. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 1997.47(6):716–721. <https://doi.org/10.1080/10473289.1997.10463929>
19. Pal J., Ghorai S., Singh D. P. Performance Assessment of CO₂ Treated Fluxed Iron Oxide Pellets in Basic Oxygen Steel Making Process. *ISIJ International*. 2010;50(1):105–114.
20. Dering D, Swartz C, Dogan N. Dynamic Modeling and Simulation of Basic Oxygen Furnace (BOF) Operation. *Processes*. 2020;8(4):483. <https://doi.org/10.3390/pr8040483>

21. Zhibinova I.A., Shakirov K.M., Protopopov E.V., Poshevneva A.I. Thermodynamic analysis of reactions of reduction of iron and manganese from their monoxides by metal impurities under conditions of "suppressive" oxidation of iron. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2005;(2):3–6. (In Russ.).

Сведения об авторах

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Email: protopopov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7554-2168

SPIN-код: 9775-0226

Александр Александрович Уманский, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Email: umanskii@bk.ru

ORCID: 0000-0003-4403-9006

SPIN-код: 2374-4553

Максим Кимович Шакиров, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет

Email: shakirov.maxim@mail.ru

ORCID: 0009-0007-4938-5975

Евгений Анатольевич Беленецкий, магистрант кафедры черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Email: info@vpk-oil.ru

Сергей Сергеевич Фатьянов, магистрант кафедры черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Information about the authors

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

Email: protopopov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7554-2168

SPIN-код: 9775-0226

Aleksandr A. Umanskii, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

Email: umanskii@bk.ru

ORCID: 0000-0003-4403-9006

SPIN-код: 2374-4553

Maksim K. Shakirov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Information Systems, Siberian State Industrial University

E-mail: shakirov.maxim@mail.ru

ORCID: 0009-0007-4938-5975

Sergey Sergeevich Fatyanov, Master's Student at the Department of Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

Evgeny A. Belenetskii, Master's Student at the Department of Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

E-mail: info@vpk-oil.ru

Sergey S. Fat'yanov, Master's Student at the Department of Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 27.01.2025

После доработки 24.02.2025

Принята к публикации 26.02.2025

Received 27.01.2025

Revised 24.02.2025

Accepted 26.02.2025

Обзорная статья

УДК 338

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-110-117

С ЮБИЛЕЕМ, ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ – ИНСТИТУТ ЭКОНОМИКИ И МЕНЕДЖМЕНТА – ИНСТИТУТ ТЕХНОЛОГИЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ! 30 ЛЕТ НА БЛАГО ГОРОДА, КУЗБАССА, РОССИИ!

© 2025 г. А. В. Феоктистов, В. В. Шипунова, Е. Г. Лашкова, О. В. Гринкевич, Н. П. Колпакова

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Институт технологий устойчивого развития отмечает 30-летний юбилей. За эти годы он прошел путь от экономического факультета, Института экономики и менеджмента до Института технологий устойчивого развития. В 1943 г. в университете создали специализированную кафедру, на которой стали преподавать экономические дисциплины техническим специальностям. В 1964 г. начата подготовка специалистов по направлению «Экономика и организация промышленного производства». В 1995 г. решением Ученого совета был создан экономический факультет, который в 2010 г. приобрел статус Института экономики и менеджмента. В 2024 г. решением Ученого совета университета Институт экономики и менеджмента переименован в Институт технологий устойчивого развития.

Ключевые слова: экономический факультет, Институт экономики и менеджмента, Институт технологий устойчивого развития, научная школа, экономическое образование

Для цитирования: Феоктистов А.В., Шипунова В.В., Лашкова Е.Г., Гринкевич О.В., Колпакова Н.П. С юбилеем, экономический факультет – Институт экономики и менеджмента – Институт технологий устойчивого развития! 30 лет на благо города, Кузбасса, России! *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2025;1(51):110–117. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-110-117](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-110-117)

Review article

HAPPY ANNIVERSARY, FACULTY OF ECONOMICS – INSTITUTE OF ECONOMICS AND MANAGEMENT – INSTITUTE OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT TECHNOLOGIES! 30 YEARS FOR THE BENEFIT OF THE CITY, KUZBASS, RUSSIA!

© 2025 A. V. Feoktistov, V. V. Shipunova, E. G. Lashkova, O. V. Grinkevich, N. P. Kolpakova

Siberian State Industrial University (Kirova Str. 42, Novokuznetsk, Kemerovo Region –Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The Institute of Sustainable Development Technologies celebrates its 30th anniversary. Over the years, he has worked his way up from the Faculty of Economics, the Institute of Economics and Management to the Institute of Sustainable Development Technologies. Economic education began in 1943 with the creation of a specialized department that taught economic disciplines to technical specialties. In 1964, the training of economic personnel began in the specialty “Economics and Organization of Industrial Production.” In 1995, by decision of the Academic Council, the Faculty of Economics was created. In 2010, the Faculty of Economics acquired the status of the Institute of Economics and Management. In 2024, by decision of the university’s academic council, the Institute of Economics and Management was renamed the Institute of Sustainable Development Technologies.

Keywords: faculty of Economics, Institute of Economics and Management, Institute of Technologies for Sustainable Development, scientific school, economic education.

For citation: Feoktistov A.V., Shipunova V.V., Lashkova E.G., Grinkevich O.V., Kolpakova N.P. Happy anniversary, Faculty of Economics– Institute of Economics and Management – Institute of Sustainable Development Technologies! 30 years for the benefit of the city, Kuzbass, Russia! *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):110–117. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-110-117](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-110-117)

В 2025 г. Институт технологий устойчивого развития (рис. 1) Сибирского государственного индустриального университета (СибГИУ) отмечает свой юбилей – 30 лет.

За эти годы он прошел путь от экономического факультета, Института экономики и менеджмента до Института технологий устойчивого развития. История экономического образования в университете началась в далеком 1943 г., была создана специализированная кафедра, преподававшая экономические дисциплины обучающимся технических специальностей. На протяжении более 80 лет профессорско-преподавательский состав выпустил не одно поколение успешных и талантливых экономистов и управленцев, вносящих заметный вклад в благосостояние экономической и социальной жизни родного города, Кузбасса, России.

Подготовка кадров экономического профиля в университете была начата в 1964 г. набором студентов на дневное отделение по специальности «Экономика и организация промышленного производства», до 1980-х гг. готовили специалистов для предприятий металлургического комплекса. В 1990-е гг. произошла интенсивная диверсификация образовательных программ, необходимость которой была продиктована переходом к рыночным принципам функционирования экономики. Так в 1995 г. решением

Ученого совета университета (тогда Сибирская государственная горно-металлургическая академия) был создан экономический факультет. У истоков процесса интеграции и развития образовательных программ экономической, управленческой, маркетинговой и социально-гуманитарной направленности в эти годы стояли ректор, профессор Н.М. Кулагин; проректор по учебной работе, профессор Г.В. Галевский; первый декан экономического факультета, доцент Н.А. Ефимов.

Большую помощь и поддержку в открытии новых специальностей и направлений подготовки оказали ученые Новосибирского государственного университета экономики и управления – одного из крупнейших профильных вузов России, с которым жизнь связала экономический факультет (Институт экономики и менеджмента) всерьез и надолго. Именно ученые Новосибирского «нархоза», доктора экономических наук С.Г. Золотаренко, Г.М. Тарасова, П.В. Шеметов и А.А. Шапошников дали положительные экспертные заключения по вопросам открытия в университете направлений бакалавриата «Экономика» и «Менеджмент» (при существующих специалитетах по этим направлениям подготовки), а также специальностей «Финансы и кредит» и «Бухгалтерский учет, анализ и аудит», с которых в 1996 г. началось расширение спектра образовательных программ экономического факультета.



Рис. 1. Коллектив Института технологий устойчивого развития
Fig. 1. The staff of the Institute of sustainable development technologies

Целью настоящей работы является исследование структурно-фазовых преобразований, трибологических свойств стали марки Р6М5, подвергнутой магнитно-импульсной обработке. Стремительный рост популярности и нехватка высококвалифицированных специалистов экономико-управленческого профиля обусловили необходимость реализации программ для получения второго высшего образования. Так была организована очно-заочная форма обучения, позволяющая в ускоренном режиме без отрыва от производства получить высокую квалификацию. Стоит отметить, что в первое десятилетие экономический факультет проводил занятия не только в Новокузнецке, но и в Прокопьевске, Междуреченске, Осинниках. По инициативе декана факультета Н.А. Ефимова в порядке эксперимента с целью обеспечения единого компетентностного подхода к обучению на факультете были объединены три формы (очная, очно-заочная и заочная). Численность студентов достигала 2500 человек. При Николае Алексеевиче сотрудники кафедр экономического факультета вошли в состав Учебно-методических объединений по организации производства, по менеджменту, укрепляли связи с вузами по всей стране.

В 1999 г. состоялось открытие специальности «Социальная работа», сначала на базе лаборатории психологии и педагогики, впоследствии преобразованной в кафедру «Социальной работы, психологии и педагогики». Кафедру возглавила к.ф.н., доцент Вера Федоровна Соколова. Открытие новой гуманитарной специальности стало знаковым событием не только для университета, более полувека специализировавшегося исключительно на подготовке технических специалистов, но и для города и региона, остро нуждающихся в высококвалифицированных, конкурентоспособных кадрах, умеющих эффективно решать любые вопросы в различных сферах социальной деятельности.

В начале 2000 г. кафедра социальной работы, психологии и педагогики получила новый импульс в своем развитии. По инициативе доцента Е.Г. Лашковой была открыта специальность «Реклама». Елена Григорьевна параллельно с педагогической деятельностью на кафедре достаточно активно работала на рынке в сфере консалтинга и дополнительного образования г. Новокузнецк. Она уловила тренд, что предприятия г. Новокузнецк остро нуждались в высокопрофессиональных специалистах по продвижению своих товаров и услуг. Это стало очередным вызовом для университета вообще и для института экономики и менеджмента в частности: разработать с нуля и осуществить подготовку специалистов-рекламщиков, которых никто на тот момент

не учил ни в нашем городе Новокузнецк, ни в Кемеровской области в целом. В этом же году было проведено лицензирование специальности «Реклама», а в 2001 г. зачислили на первый курс обучающихся, кафедра получила новое название «Реклама, социальная работа, психология и педагогика».

В 2004 г. факультет возглавил Павел Петрович Баранов, с его приходом на должность декана экономического факультета научная деятельность стала более широкомасштабной и разносторонней. Павел Петрович начал научно-педагогическую деятельность после окончания Альма-матер в 1996 г. Защитил в 2003 г. в диссертационном совете при Новосибирском государственном университете экономики и управления кандидатскую диссертацию и стал первым в Кузбассе кандидатом экономических наук по специальности 08.00.12 «Бухгалтерский учет, статистика». Павел Петрович активно развивал бухгалтерское и аудиторское направления Сибирской научной школы, сотрудничая с учеными из Новосибирска, Красноярска, Санкт-Петербурга и Москвы. В 2013 г. в возрасте 39 лет П.П. Баранов защитил докторскую диссертацию. В последствии стал доктором финансов Всемирного технологического университета ЮНЕСКО и членом палаты налоговых консультантов России.

Павел Петрович был идейным вдохновителем и первым директором, созданного 1 марта 2010 г. на базе экономического факультета, Института экономики и менеджмента.

Дальнейшим развитием кафедры социальной работы стало открытие специальности «Коммерция», которое впоследствии трансформировалось в соответствии с Приказами Министерства высшего образования в направление подготовки «Торговое дело». Первые обучающиеся по данному направлению приступили к занятиям в 2011 г. Траектория обучения была максимально выстроена таким образом, чтобы были получены знания в области развития бизнеса. Предприниматели города проводили открытые лекции, мастер-классы, делились своим опытом, с удовольствием отвечали на самые каверзные вопросы студентов в живом диалоге о проблемах в бизнесе, перспективах развития той или иной сферы деятельности. Была сделана видеозапись мастер-класса президента Союза предпринимателей г. Новокузнецк С.В. Мартышова, которую впоследствии использовали в учебном процессе. Вся практическая подготовка была ориентирована на решение конкретных проблем бизнес-предприятий г. Новокузнецк и всего Юга Кузбасса, которую оформляли в виде курсовых и дипломных работ. Пути решения проблем предприниматели с успехом внедряли в свою практическую деятельность.

Очередным вызовом в 2012 г. для Института экономики и менеджмента стало создание новой кафедры «Экономической теории и предпринимательской деятельности», где подготовку продолжили обучающиеся по специальностям «Реклама» и «Торговое дело». Основной упор при их обучении был сделан на формирование предпринимательских компетенций. В 2015 г. кафедра получила название Бизнеса и инноваций, это было связано с внедрением проектного обучения в университете, при котором планировали не только создание проекта в профессиональной сфере, но и дальнейшую его коммерциализацию.

На протяжении более 10 лет в состав института входила кафедра управления качеством и документооборота (в последующем кафедра менеджмента качества), которой заведовал Юрий Григорьевич Сильвестров. На этой кафедре осуществляли подготовку по всем уровням высшего и среднего профессионального образования в области управления качеством, стандартизации и сертификации и документооборота.

Научно-педагогический потенциал Института экономики и менеджмента был представлен когортой ведущих ученых, среди которых было шесть докторов и более 50 кандидатов наук. В XXI в. преподавателями Института экономики и менеджмента было успешно защищено четыре докторских и более 30 кандидатских диссертаций. Существенный вклад в развитие региональной экономики внесли представители научной школы «Экономика, организация производства, планирование и управление на предприятиях», зарождение которой приходится на 1940-е гг., в это время в Сибирском металлургическом институте началась экономическая подготовка инженерных кадров. У истоков этой научной школы стояли видные ученые-экономисты: д.э.н., профессор Николай Сидорович Сачко и Кирилл Еремеевич Капустин, к.э.н., доценты Эммануил Соломонович Гликман и Нина Викторовна Абакумова.

Под руководством и при самом активном участии д.э.н., профессоров Игоря Германовича Степанова, Виктора Яковлевича Медикова, Николая Алексеевича Ефимова коллективом научной школы в 1980 – 1990-е гг. было разработано следующее:

- теория и методология расчета производственных мощностей и оценки уровня их использования,
- модель регионального хозяйственного расчета;
- методология обоснования рациональной стратегии развития промышленных предприятий и оценки уровня организации металлургического производства.

Представителями горнорудного направления научной школы под руководством к.т.н., профессора, полного кавалера ордена «Шахтерская слава» Альберта Ивановича Нифонтова было разработано следующее:

- многоуровневая система управления материальными и трудовыми затратами для угледобывающих компаний, обеспечивающая создание и регулирование мотивационного механизма роста экономического потенциала региона; система бюджетирования горного бизнеса;
- разработаны теоретические и методологические основы формирования механизмов устойчивого развития сырьевого сектора экономики;
- модель оптимизации затрат на осуществление производственных услуг угольной компании;
- комплекс методических положений по совершенствованию экономических методов управления горно-подготовительными подсистемами угольных шахт и др.

В рамках этих направлений выполнен комплекс научных работ, на базе которого подготовлены и защищены восемь кандидатских и две докторских диссертации по экономическим наукам, разработан конкурсный проект по гранту Российского гуманитарного научного фонда на тему «Нормативное обеспечение управления производственно-хозяйственной деятельностью предприятий горнодобывающей отрасли в условиях рынка».

Результаты работы коллектива исследователей представляли на площадках производственных предприятий, в ведущих научных изданиях, на форумах и конференциях международного, федерального и регионального уровней, в монографиях, учебных пособиях, статьях и докладах, опубликованных в России и за рубежом.

Богатейший трудовой путь от горного мастера шахты № 5-6 треста «Прокопьевскуголь» до генерального директора концерна «Кузнецкуголь» и глубокие теоретические знания горного инженера-экономиста А.И. Нифонтова явились важнейшей предпосылкой успешного становления и развития в университете кафедры экономики и управления горным производством, которую Альберт Иванович возглавлял в течение 20 лет.

Благодаря блестящему преподавательскому составу, стоявшему у истоков создания кафедры, уже в первые годы ее работы удалось выстроить эффективный образовательный процесс, учитывавший постоянно меняющиеся условия рыночной экономики. Студенты получали не только мощную теоретическую базу, но и практические умения и навыки, погружаясь в методическую базу и отчетность реального бизнеса, что делало их по-настоящему ценными и востребованными специалистами. Со дня основания подготовку

экономистов-менеджеров осуществляли с прицелом на конечный результат – работу в промышленном секторе экономики.

Для угледобывающих компаний юга Кузбасса кафедра экономики и управления горным производством стала центром профильных исследований в Сибирском регионе. Отличительной особенностью этого образовательного подразделения являлась тесная связь с угольными предприятиями и компаниями Кузбасса и других регионов Российской Федерации, столичными вузами отраслевой направленности, именно коллективом были сформулированы перспективные направления региональных исследований и решены принципиальные вопросы в области теории и практики управления горным бизнесом, задан правильный вектор в подготовке будущих специалистов, направленный на практико-ориентированный образовательный подход.

Визитной карточкой кафедры экономики и управления горным производством были и остаются ее выпускники, занимающие руководящие посты в компаниях горно-металлургического сектора страны.

Во многом благодаря достижениям научной школы «Экономика, организация производства, планирование и управление на предприятиях» в 1990-е гг. была разработана Программа реструктуризации горно-металлургического комплекса Кузбасса, реализация которой позволила к концу XX в. преодолеть глубокий структурный кризис в региональной экономике.

На начало XXI в. пришелся этап становления в университете единственной в регионе научной школы «Финансы, учет и аудит», возглавляемой директором Института экономики и менеджмента д.э.н., профессором Павлом Петровичем Барановым. Главным результатом 15-летней работы этой школы стало формирование когорты молодых ученых-экономистов, исследования которых лежат в области редких даже по российским меркам научных специальностей «Бухгалтерский учет, статистика» и «Финансы, денежное обращение и кредит». По указанным специальностям представителями научной школы были защищены одна докторская и семь кандидатских диссертаций, научные положения которых используются:

- в кредитно-финансовой сфере Кузбасса при оценке кредитоспособности корпоративных заемщиков;

- в аудиторской деятельности российских компаний при управлении рисками и оценке достоверности финансовой отчетности в соответствии с Международными стандартами;

- в бухгалтерском учете предприятий региона при формировании эффективной учетной политики.

Многие разработки коллектива научной школы «Финансы, учет и аудит» получили признание не только на региональном, но и на всероссийском уровнях, нашли отражение в регулирующих и нормативных документах Института профессиональных бухгалтеров и аудиторов, Палаты налоговых консультантов и Министерства финансов Российской Федерации. Институт экономики и менеджмента являлся самым крупным учебно-научным подразделением университета как по количеству образовательных программ, реализуемых в очной, очно-заочной и заочной формах обучения, так и по количеству обучающихся (более 1200 человек).

Социально-экономическое развитие общества в XX – XXI вв., в основном ориентированное на быстрые темпы экономического роста, породило беспрецедентное причинение вреда окружающей природной среде. Человечество столкнулось с противоречиями между растущими потребностями мирового сообщества и невозможностью биосферы их обеспечить.

Переход к устойчивому развитию предполагает постепенное восстановление естественных экосистем до уровня, гарантирующего стабильность окружающей среды. Этого можно достичь усилиями всего человечества, но начинать движение к поставленной цели каждая страна должна самостоятельно.

Переход к устойчивому развитию должен обеспечить на перспективу сбалансированное решение проблем социально-экономического развития и сохранение благоприятной окружающей среды и природно-ресурсного потенциала, удовлетворение потребностей настоящего и будущих поколений людей. При этом необходимо реализовать последовательное решение ряда принципиальных задач:

- в процессе выхода страны из кризиса обеспечить стабилизацию экологической ситуации;

- добиться коренного улучшения состояния окружающей среды за счет экологизации экономической деятельности в рамках институциональных и структурных преобразований, позволяющих обеспечить становление новой модели хозяйствования и широкое распространение экологически ориентированных методов управления;

- ввести хозяйственную деятельность в пределы емкости экосистем на основе массового внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий, целенаправленных изменений структур экономики, личного и общественного потребления.

Основными направлениями перехода России к устойчивому развитию являются:

- создание правовой основы перехода к устойчивому развитию, включая совершенствование



Рис. 2. Коллектив дирекции Института технологий устойчивого развития
Fig. 2. The staff of the Directorate of the Institute of sustainable development technologies pulse treatment

действующего законодательства, определяющего, в частности, экономические механизмы регулирования природопользования и охраны окружающей среды;

– разработка системы стимулирования хозяйственной деятельности и установление пределов ответственности за ее экологические результаты, при которых биосфера воспринимается уже не только как поставщик ресурсов, ни и как фундамент жизни, сохранение которого должно быть непременным условием функционирования социально-экономической системы и ее отдельных элементов;

– оценка хозяйственной емкости локальных и региональных экосистем страны, определение допустимого на них антропогенного воздействия;

– формирование эффективной системы пропаганды идей устойчивого развития и создание соответствующей системы воспитания и обучения.

Переход к устойчивому развитию потребует скоординированных действий во всех сферах жизни общества, адекватной переориентации социальных,

экономических и экологических институтов государства, регулирующая роль которого в таких преобразованиях является основополагающей.

Важнейшее значение в создании методологической и технологической основ этих преобразований будет принадлежать науке.

Входя в четвертое десятилетие перед Институтом экономики и менеджмента встают новые задачи, которые предстоит решать Институту технологий устойчивого развития.

Институт экономики и менеджмента СибГИУ решением Ученого совета от 31.10.2024 г. переименован в Институт технологий устойчивого развития (ИТУР) (рис. 2).

Новые названия присвоены и кафедрам института:

– кафедра менеджмента и территориального развития (рис. 3);

– кафедра экономики и устойчивого развития бизнеса (рис. 4).

В настоящее время в Институте технологий устойчивого развития реализуется полный цикл



Рис. 3. Коллектив кафедры менеджмента и территориального развития
Fig. 3. Staff of the department of management and territorial development



Рис. 4. Коллектив кафедры экономики и устойчивого развития бизнеса
Fig. 4. Staff of the department of economics and sustainable business development

подготовки высококвалифицированных специалистов, начинающийся программами уровня среднего профессионального образования, продолжающийся программами подготовки высшего образования (бакалавриат и магистратура), завершающийся программой подготовки кадров высшей научной квалификации (программой аспирантуры).

В Институте технологий устойчивого развития реализуется обучение по следующим направлениям подготовки:

38.02.01 Экономика и бухгалтерский учет (по отраслям);

43.02.16 Туризм и гостеприимство;

38.03.01 Экономика;

38.03.02 Менеджмент;

38.03.03 Управление персоналом;

38.04.01 Экономика;

38.04.02 Менеджмент;

38.06.01 Экономика;

5.2.3 Региональная экономика.

В 2024 г. был дан старт новому направлению 22.03.02 Металлургия с профилем «Экономика и управление на предприятиях в металлургии». Новое направление позволило расширить спектр программ в институте, получить бюджетные места и готовить высококвалифицированные кадры технического направления с углубленным изучением экономико-управленческих дисциплин, что несомненно приведет к повышению конкурентоспособности выпускника. Первый выпуск по этому направлению состоится в 2028 г.

С 2025 г. в Институте технологий устойчивого развития стартует еще одно новое направление 09.03.02 Информационные системы и технологии с профилем «Экономика и аналитика интеллектуального бизнеса». По этой программе пла-

нируется готовить специалистов в области информационных технологий со знанием экономики, которые смогут анализировать, прогнозировать, определять стратегию развития предприятия. На выходе это будут бизнес-аналитики, специалисты по управлению рисками, бизнес-консультанты, бизнес-архитекторы.

Научно-педагогический потенциал Института технологий устойчивого развития представлен когортой ведущих ученых, среди которых четыре доктора и 15 кандидатов наук.

Институт технологий устойчивого развития становится важнейшим ресурсным центром реализации стратегического проекта СибГИУ «Технологии устойчивого развития».

В рамках стратегического проекта идет работа по трем блокам: экспертность в области экономики, социальное развитие, экологическая повестка.

Обучающиеся института – участники и призеры российских и международных олимпиад и конкурсов, в том числе Международных инженерных кейс-чемпионатов «Case-In», «Metal Cup»; конкурса студенческих проектов «Лаборатория РУСАЛа», «ECODOCs», олимпиады по проектному менеджменту «КВАЗАР», «Новое поколение».

Сохраняя традиции, Институт технологий устойчивого развития уверенно смотрит в будущее и продолжает развивать новейшие педагогические технологии и направления подготовки специалистов.

Наращивать компетенции и вкладывать в свое образование – приоритеты небольшого, но целеустремленного института. Сильные стороны выпускников – логика, коммуникабельность, активность, креативность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сибирский государственный индустриальный университет 1930 – 2010 гг.* / Под ред. С.П. Мочалова и др. Кемерово: Кузбассвузиздат. 2010:399.
2. Кулагин Н.М., Кулаков С.М., Воскресенский В.А. и др. *СМИ – СибГИУ. 75 лет. Хроника. Люди. События: очерки истории СибГИУ.* Кемерово: Кузбасс. 2005:304.
3. *Сибирский государственный индустриальный университет. 85 лет в образовании и науке* / Под общ. ред. Е.В. Протопопова. Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ. 2015:278.

REFERENCES

1. Mochalov S.P. ed. *Siberian State Industrial University 1930–2010.* Kemerovo: Kuzbassvuzizdat. 2010:399. (In Russ.).
2. Kulagin N.M., Kulakov S.M., Voskresenskii V.A. *SMI – SibGIU. 75 years. Chronicle. People. Events: essays on history.* SibGIU. Kemerovo: Kuzbass. 2005:304. (In Russ.).
3. Protopopov E.V. ed. *Siberian State Industrial University. 85 years in education and science. Under general editorship.* Novokuznetsk: Publishing Center of SibGIU. 2015:278. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Андрей Владимирович Феоктистов, д.т.н., доцент, директор Института технологий устойчивого развития, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: feoktis1@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2409-215X

SPIN-код: 6492-3863

Вера Васильевна Шипунова, к.э.н., доцент, доцент кафедры экономики и устойчивого развития бизнеса, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: shipunovav@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-5692-6580

SPIN-код: 9901-1888

Елена Григорьевна Лашкова, к.т.н., доцент, доцент кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: e.lashkova@inbox.ru

Ольга Владимировна Гринкевич, к.э.н., доцент, доцент кафедры экономики и устойчивого развития бизнеса, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: grinkevichov@mail.ru

SPIN-код: 8389-8828

Наталья Павловна Колпакова, к.э.н., доцент, доцент кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: kolpakova_np@mail.ru

Information about the authors:

Andrei V. Feoktistov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of the Institute of Sustainable Development Technologies, Siberian State Industrial University

E-mail: feoktis1@gmail.com

ORCID: 0000-0003-2409-215X

SPIN-код: 6492-3863

Vera V. Shipunova, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics and Sustainable Business Development, Siberian State Industrial University

E-mail: shipunovav@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-5692-6580

SPIN-код: 9901-1888

Elena G. Lashkova, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University

E-mail: e.lashkova@inbox.ru

Ol'ga V. Grinkevich, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics and Sustainable Business Development, Siberian State Industrial University

E-mail: grinkevichov@mail.ru

SPIN-код: 8389-8828

Natal'ya P. Kolpakova, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University

E-mail: kolpakova_np@mail.ru

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 03.03.2025

После доработки 11.03.2025

Принята к публикации 13.03.2025

Received 03.03.2025

Revised 11.03.2025

Accepted 13.03.2025

Оригинальная статья

УДК 338.48:322.122

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-118-129

**ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ
ТУРИЗМА В КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ – КУЗБАССЕ В КОНТЕКСТЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ**

© 2025 г. **Е. В. Иванова, Н. В. Ивушкина, Н. В. Перекрест**

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Отражены результаты экспресс-анализа развития туризма в Кемеровской обл. в период с 2015 по 2024 гг. На основе использования методов сравнения, вертикального и горизонтального анализа, диалектического подхода, обобщения и систематизации избыточного набора статистических показателей была проведена оценка динамики развития регионального туризма в контексте реализуемой в регионе стратегии и обеспечения устойчивого развития региональной экономики. Данные взяты из открытых источников, включая официальные. Проведенный анализ не является завершенным, но дает объективное представление о направлении вектора стратегического развития туристической отрасли региона, достигнутых результатах и основных тенденциях, сформировавшихся в региональной экономике. Неизбежными издержками проведенного анализа являются не во всем актуальные статистические показатели, что обусловлено отсутствием официальных статистических данных по региональной статистике за 2024 г., а по отдельным показателям и за 2023 г, однако в целом это не искажает основные результаты исследования. Выбор периода (2014 – 2023 гг.) для исследования обусловлен необходимой достаточностью и объективностью, соответствует периоду реализации Стратегии развития туризма в Кемеровской обл., принятой в 2013 г, отражает существенные этапы развития Кузбасса и страны в целом: 2014 – 2017 гг. – этап стагнации экономики; 2017 – 2018 гг. – непродолжительный период экономического роста; 2019 г. – замедление экономического роста; 2020 г. – кризисный период, обусловленный последствиями пандемии COVID-19; 2021 г. – период восстановления экономики; 2022 – 2024 гг. – период санкционных ограничений.

Ключевые слова: туризм, стратегия развития, региональная экономика, устойчивое развитие

Для цитирования: Иванова Е.В., Ивушкина Н.В., Перекрест Н.В. Оценка результатов реализации стратегии развития туризма в Кемеровской области – Кузбассе в контексте обеспечения устойчивости региональной экономики. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):118–129. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-118-129](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-118-129)

Original article

**ASSESSMENT OF THE RESULTS OF THE IMPLEMENTATION OF THE TOURISM
DEVELOPMENT STRATEGY IN THE KEMEROVO REGION – KUZBASS IN THE
CONTEXT OF ENSURING THE SUSTAINABILITY OF THE REGIONAL ECONOMY**

© 2025 **E. V. Ivanova, N. V. Ivushkina, N. V. Perekrest**

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The article reflects the results of an express analysis of tourism development in the Kemerovo region in the period from 2015 to 2024. Based on the use of comparison methods, vertical and horizontal analysis, dialectical approach, generalization and systematization of an inordinate set of statistical indicators, the dynamics of regional tourism development was assessed in the context of the strategy implemented in the region and ensuring the sustainable development of the regional economy. The data is taken from open sources, including official ones.

The analysis is not complete, but it gives an objective idea of the direction of the vector of strategic development of the tourism industry in the region, the results achieved and the main trends in the regional economy. The unavoidable costs of the analysis were not all relevant statistical indicators, due to the lack of official statistical data on regional statistics for 2024, and on individual indicators for 2023, however, in general, this does not distort the main results of the study. The choice of the period 2014-2023 for the study is due to the necessary sufficiency and objectivity, corresponds to the period of implementation of the Strategy for the development of tourism in the Kemerovo region, adopted in 2013, and reflects the significant stages of development of Kuzbass and the country as a whole: 2014 – 2017 – the stage of economic stagnation; 2017 – 2018 – a short period of economic growth; 2019 – economic slowdown; 2020 is a crisis period caused by the consequences of the COVID-19 pandemic; 2021 is a period of economic recovery, and 2022 – 2024 is a period of sanctions restrictions.

Keywords: tourism, development strategy, regional economy, sustainable development

For citation: Ivanova E.V., Ivushkina N.V., Perekrest N.V. Assessment of the results of the implementation of the tourism development strategy in the Kemerovo region – Kuzbass in the context of ensuring the sustainability of the regional economy. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):118–129. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-118-129](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-118-129)

Введение

Вопросам устойчивого развития региона в последние годы уделяется большое внимание на страницах отечественных научных изданий, что обусловлено важностью понимания и необходимостью создания условий для стабильного социально-экономического развития территории, которые бы не способствовали ухудшению региональной экосистемы, разрушению ее природного потенциала, а напротив обеспечивали бы прогресс общества, рост уровня жизни населения на основе эффективного использования имеющихся в регионе ресурсов [1 – 6].

Использованию возможностей туристической отрасли для обеспечения устойчивого регионального развития посвящены работы [7 – 11].

Туризм в современном мире выступает значимым фактором формирования бизнес-пространства территории, ее привлекательности и конкурентоспособности за счет диверсификации региональной экономики, формирования дополнительных источников дохода регионального бюджета, создания рабочих мест, стимулирования развития смежных секторов экономики. Согласно официальным данным [12], один рубль налогов в туристической отрасли продуцирует три рубля налогов в смежных отраслях. В концепции федеральной целевой программы «Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации (2019 – 2025 гг.)», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 мая 2018 г. № 872-р, отмечается, что туризм оказывает влияние на 53 смежные отрасли, при этом каждое дополнительно созданное рабочее место в туризме стимулирует создание до пяти рабочих мест в отраслях-смежниках [13].

Развитие туризма в регионе также способствует достижению целевых показателей, предусмотренных Указом Президента Российской Федерации «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 г.» [14], в частности сохранению численности населения, здоровья и благополучия людей, повышению продолжительности жизни людей. Создание условий, благоприятствующих развитию предпринимательства и росту инвестиций в сфере туризма, обеспечивает достижение еще одной национальной цели – достойный и эффективный труд и успешное предпринимательство.

В связи с этим особую значимость приобретает проблема эффективного формирования и реализации на региональном уровне программных документов, отражающих готовность и состоятельность региональной политической системы поддерживать (в определенные моменты координировать и стабилизировать) ситуацию в туристической отрасли.

В сентябре 2023 г. Постановлением Правительства Кемеровской обл. – Кузбасса утверждена государственная программа «Развитие туризма Кузбасса» [15].

Рассматриваемый нормативный акт призван заместить собой Стратегию развития туризма в Кемеровской обл. (КО) до 2025 г. [16], принятую 1 марта 2013 г. Оба эти документа стратегического планирования и управления определяют базовые аспекты развития туристической отрасли региона, реальное положение дел в которой предопределяет темпы регионального развития, финансовую устойчивость региона, предпринимательские риски и уровень инвестиционной привлекательности региональной экономики. Рассматриваемые обстоятельства актуализи-

**Структура валового регионального продукта по основным видам экономической деятельности
Кемеровской области**

*Table 1. The structure of the gross regional product by the main types of economic activity
of the Kemerovo region*

Показатель	Значение показателя, %, по годам									
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Добыча полезных ископаемых	22,3	21,5	25,8	29,7	36,5	36,7	26,3	19	39,7	41,8
Обрабатывающие производства	16,2	18,9	17,9	16,1	14,4	17,1	14	14,9	13,8	10,9
Производство, распределение электроэнергии, газа, воды	4,7	4,8	5,1	4,6	4,8	3,9	4,5	5,5	3,3	2,7
Строительство	5,5	5,6	3,9	4,0	3,4	3,6	5,4	5,6	3,3	3,0
Оптовая и розничная торговля, ремонт	9,9	9,4	9,9	9,7	9,1	8,5	10	10,3	9,0	9,6
Транспорт и связь	8,0	8,9	8,2	7,6	7,6	7,3	8,5	8,6	6,0	6,8
Сельское и лесное хозяйства, охота	3,9	4,1	4,0	3,2	2,3	1,9	2,2	3,3	2,6	2,1
Пр и м е ч а н и е. Составлено по статистическим сборникам «Регионы России. Социально-экономические показатели» за 2016 – 2024 гг.										

зируют значимость следующих научных и практических задач:

1. Оценить количественно итоги исполнения Стратегии развития туризма в КО-2025.

2. Сопоставить между собой Стратегию развития туризма в КО-2025 и государственную программу КО-Кузбасса «Развитие туризма Кузбасса» в части целей, методов, ожидаемых результатов.

3. Оценить актуальность и реалистичность государственной программы КО-Кузбасса «Развитие туризма Кузбасса» с позиций Федерального Закона №172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» [17].

В настоящей работе на основе использования методов анализа, синтеза, аналогии, обобщения и сравнения проведена оценка достигнутого уровня исполнения ключевых задач Стратегии развития туризма в КО-2025, опираясь на информационную основу в виде инструктивных и нормативных материалов, статистической информации официальных сайтов Федеральной службы государственной статистики РФ, территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Кемеровской обл. – Кузбассу, рейтингового агентства «Эксперт РА», периодической печати.

Результаты исследования

Ключевой целью Стратегии развития туризма в КО-2025 декларировали обеспечение вклада туристской отрасли в решение значимых задач экономического развития региона [16]:

– интенсификация темпов экономического развития региона за счет высокой скорости роста индустрии туризма и смежных отраслей;

– рост уровня и качества жизни населения в результате повышения доступности туристских услуг, увеличения занятости и доходов населения Кемеровской обл.;

– повышение конкурентоспособности региональной экономики за счет роста привлекательности Кемеровской обл. как туристского направления;

– сокращение дисбаланса в социально-экономическом развитии городов региона в результате повышения доли туризма в валовом региональном продукте Кемеровской обл.

Базовыми секторами экономики КО продолжают оставаться добыча полезных ископаемых, производство металлургической и химической продукции (табл. 1), что понятно в условиях благоприятной рыночной конъюнктуры и ориентации региональной и национальной экономики на экспорт сырьевых ресурсов.

Такой рост доли добычи природных ископаемых в структуре валового регионального продукта (ВРП) к 2022 г. не мог не настораживать: при неблагоприятном изменении цен на экспортируемое сырье, сокращении рынков сбыта базовые компании региона в рассматриваемой отрасли имеют достаточно тяжелое финансовое положение.

О величине и динамике доли индустрии туризма в ВРП по имеющимся статистическим данным судить достаточно сложно (эта отрасль в структуре ВРП в статистической отчетности отдельно не выделяется). Однако, если посмотреть на показатели деятельности гостиниц и предприятий общественного питания, их динамику развития в отраслевой структуре ВРП, то можно констатировать, что ни на региональном уровне,

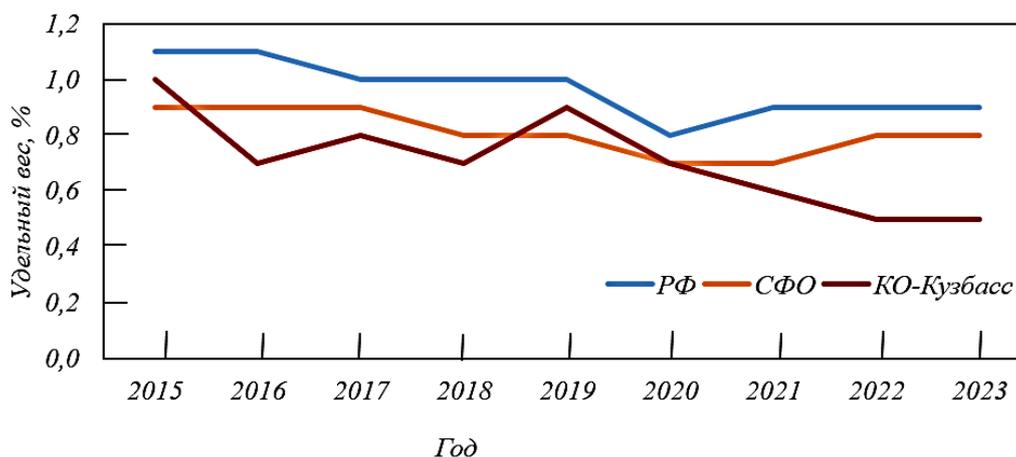


Рис. 1. Удельный вес деятельности гостиниц и предприятий общественного питания и его динамика в отраслевой структуре ВРП
Fig. 1. The share of hotel and catering activities and its dynamics in the sectoral structure of GRP

ни в национальном масштабе туризм пока не является ключевым драйвером экономического развития. Более того и региональная, и национальная динамика демонстрируют незначительное сокращение доли рассматриваемого вида деятельности в структуре ВРП за десятилетний период (рис. 1).

Динамика валового регионального продукта на душу населения в Кузбассе заслуживает положительной оценки: в 2021 – 2022 гг ВРП на душу населения в регионе превысил среднее значение рассматриваемого показателя по Сибирскому федеральному округу (СФО), хотя и уступает среднероссийскому значению, разрыв на региональном и национальном уровнях заметно сократился по сравнению с 2019 – 2020 гг. (рис. 2).

Позитивная динамика показателя на региональном уровне в основном обусловлена двумя факторами: увеличением объема производства в

базовых секторах экономики и ростом цен на них до 2022 г., а также снижением численности населения в регионе.

Темпы роста инвестиций в основной капитал Кузбасса (рис. 3) также не свидетельствуют о видимом прорыве в развитии. Если в 2017 – 2019 и 2021 гг. рассматриваемый показатель в Кемеровской обл. опережал аналогичный показатель по СФО и РФ, то в большем числе рассматриваемых периодов региональные значения были ниже окружающих и общероссийских.

В 2024 г. Кузбасс планировал реализацию регионального проекта «Развитие туристической инфраструктуры», предусматривающего финансирование из бюджетов разных уровней на сумму свыше 2 млрд руб., в 2025 и 2026 гг. бюджетное финансирование по проекту по плану составит 449 360 000 руб. [11].

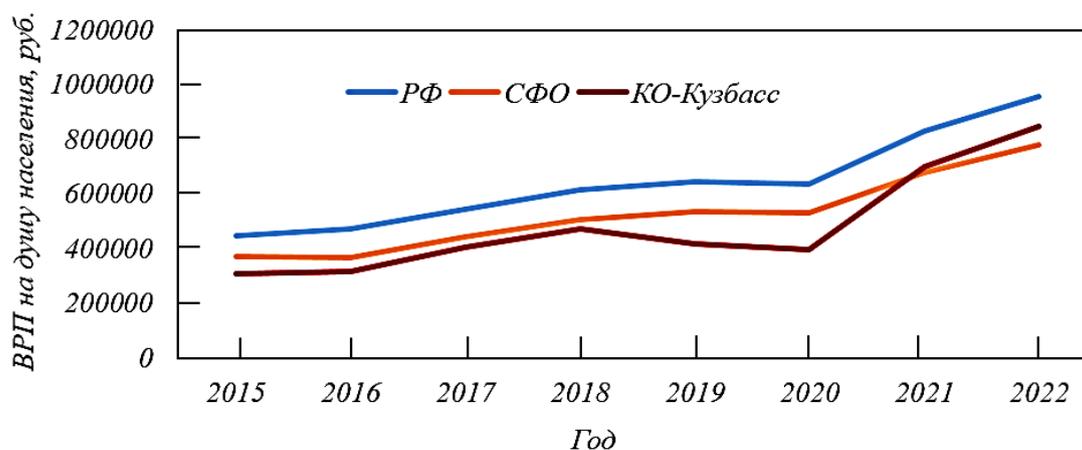


Рис. 2. Динамика валового регионального продукта на душу населения в 2015 – 2022 гг.
Fig. 2. Dynamics of gross regional product per capita in 2015–2022

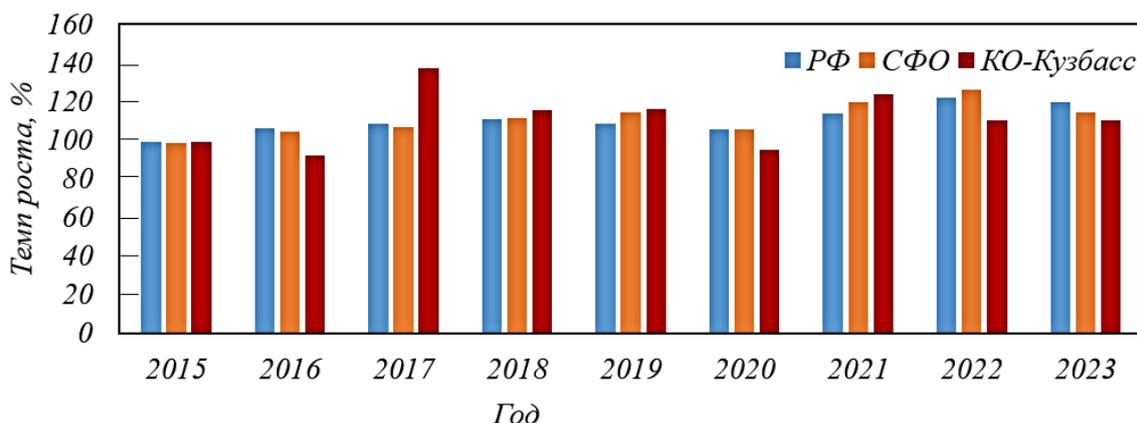


Рис. 3. Динамика темпов роста объема инвестиций в основной капитал
 Fig. 3. Dynamics of growth rates of investment in fixed assets, %

При этом для развития инфраструктуры туризма в Кемеровской обл. требуются колоссальные инвестиции. Окончание строительства и ввод в эксплуатацию нового терминала международного аэропорта им. Б.В. Волынова повысит привлекательность региона как туристического направления и увеличит въездной туристический поток. Однако, пробки на дорогах в пик сезона, устаревшие системы водоснабжения и канализации, теплоснабжения, отсутствие дополнительных мощностей этих систем для строительства новых мест размещения существенно тормозят дальнейшее развитие регионального туристического сектора, не позволяя ему в полной мере выполнить роль драйвера экономики области.

Надежда на улучшение ситуации связана с принятием 13 февраля 2025 г. Постановления Правительства РФ №155 «О создании на территории Таштагольского муниципального района Кемеровской обл. – Кузбасса особой экономической зоны туристско-рекреационного типа». Создание

ОЭЗ «Горная Шория» в регионе предусматривает строительство инженерной, транспортной, социальной и иной инфраструктур за счет средств регионального бюджета в размере более 2 млрд руб. до 2029 г. [18].

Динамику уровня и качества жизни населения Кемеровской обл. оценивали в первую очередь по среднедушевым доходам жителей региона (рис. 4).

Положительной оценки заслуживает рост среднедушевых доходов населения в Кузбассе, однако по этому показателю Кемеровская обл. занимала в 2023 г. лишь 57 место из 89 регионов страны, в то время как ближайшие соседи по федеральному округу, имеющие в структуре ВРП промышленное ядро и туристическую составляющую, по данному показателю занимают следующие места: 24 – Новосибирская обл., 23 – Красноярский край, 44 – Иркутская обл. Алтайский край с более развитым сектором туризма и меньшей индустриальной направленностью находит-

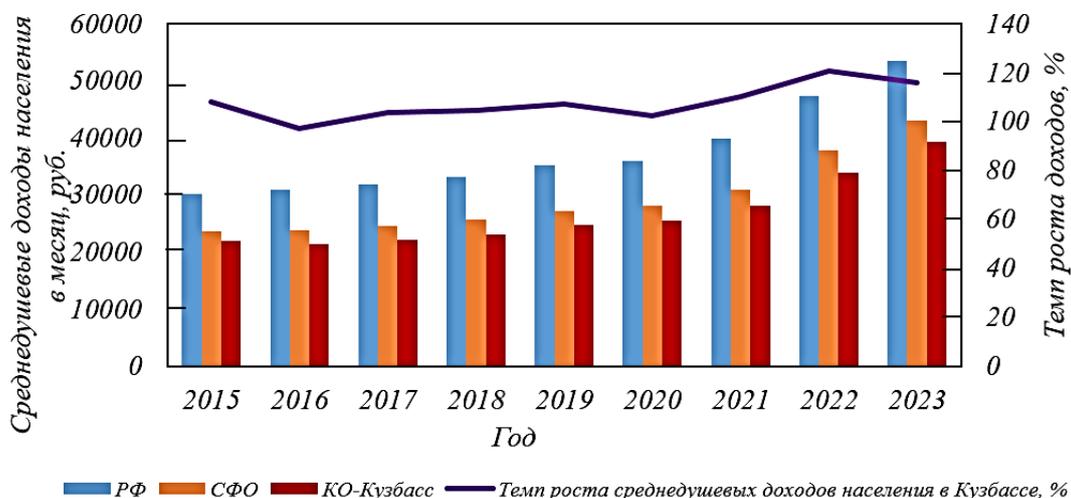


Рис. 4. Динамика и темпы роста среднедушевых доходов населения в 2015 – 2023 гг.
 Fig. 4. Dynamics of the size and growth rate of average per capita income of the population in 2015–2023

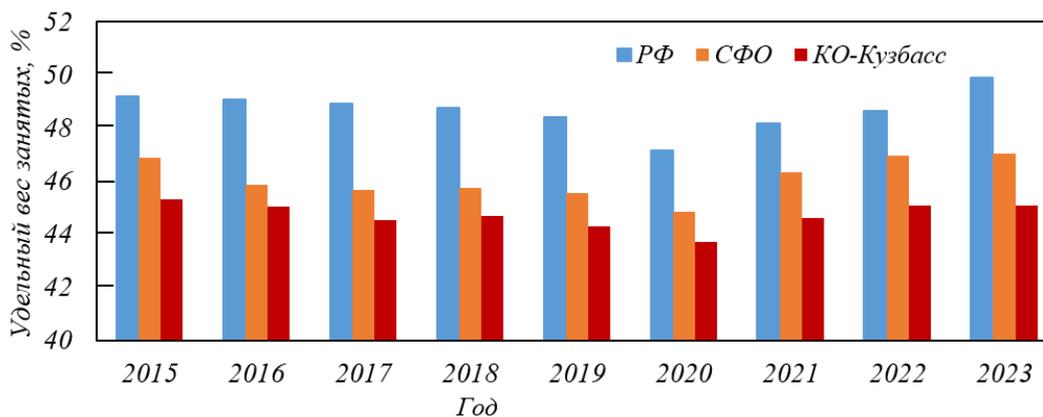


Рис. 5. Динамика удельного веса занятых в экономике в 2015 – 2023 гг.
Fig. 5. Dynamics of the share of people employed in the economy in 2015–2023

ся на 67 месте среди регионов РФ по среднедушевым доходам населения в рассматриваемом периоде.

В 2023 г. количество занятых в экономике Кузбасса (45,6 %) зафиксировано на уровне ниже, чем в 2015 г. (45,32 %) (рис. 5). Уровень занятых в экономике Кузбасса на протяжении всего анализируемого периода уступает среднероссийскому значению и среднему уровню по СФО. Наметившийся рост доли занятых в экономике с 2020 г. в Кузбассе был обусловлен не ростом их количества, а опережающим сокращением общей численности населения региона по сравнению со снижением числа занятых (табл. 2).

При этом динамика смертности населения трудоспособного возраста на 100 000 человек населения соответствующего возраста в регионе практически полностью повторяет динамику по Сибирскому федеральному округу и Российской Федерации, однако абсолютные значения этого

показателя на региональном уровне выше средних по округу и стране (рис. 6).

Вызывают озабоченность и более высокие значения смертности населения старше трудоспособного возраста и смертности от новообразований, в том числе злокачественных в Кемеровской обл. по сравнению со среднеокружными и среднефедеральными значениями (в табл. 3 динамика данных показателей отражена с 2018 г., так как до 2018 г. официальную статистику в региональном разрезе не представляли).

Суммарный коэффициент рождаемости в Кузбассе стабильно снижается, аналогичная ситуация наблюдается в целом по России и Сибирскому федеральному округу (рис. 7). Суммарный коэффициент рождаемости в среднем по СФО к 2023 г. приблизился к общероссийскому уровню, а негативный отрыв рассматриваемого показателя увеличился по Кемеровской обл. от общенационального и общеокружного уровней.

Т а б л и ц а 2

Динамика общей численности населения и численности занятых в экономике

Table 2. Dynamics of the total population and the number of people employed in the economy

Регион, страна	Численность населения по годам, тыс. чел.								
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Численность населения</i>									
РФ	147182,3	146804	146880	146781	146749	147455,7	146980,1	146447,4	146150,8
СФО	17198,3	17263	17230	17173	17118	16884,5	16758,5	16645,8	16567,1
Кузбасс	2711,9	2709	2695	2674	2658	2622,3	2592	2568,2	2547,7
<i>Среднегодовая численность занятых</i>									
РФ	72424,9	72065,2	71842,7	71561,7	71064,5	69550,3	70817,9	71216,9	72911,8
СФО	8061,3	7918,2	7865,6	7852,8	7795,2	7572	7764,8	7815,8	7795,2
Кузбасс	1229,1	1220,4	1200	1195	1177,2	1146,5	1156,6	1157,8	1148,1

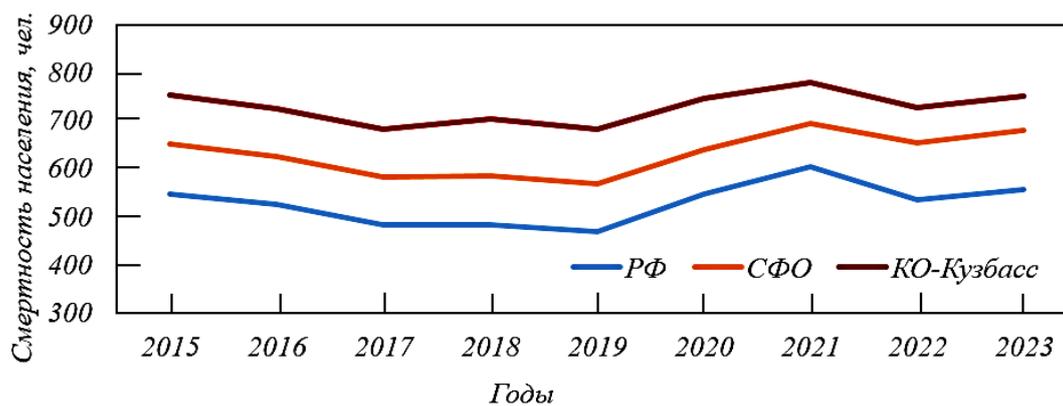


Рис. 6. Динамика смертности населения трудоспособного возраста соответствующего возраста
Fig. 6. Mortality dynamics of the working-age population of the corresponding age

Депопуляция (стабильное сокращение абсолютной численности населения), обусловленная не только нарастанием естественной убыли, но и перманентным миграционным оттоком, является важным демографическим показателем, определяющим конкурентоспособность региона. Отток населения и естественная убыль населения на определенной территории свидетельствуют о неблагоприятных условиях ее проживания или о низком качестве жизни в регионе. Для Кемеровской обл. свойственны эти два процесса, что отрицательно сказывается на экономике региона [19]. Такая тенденция подтверждается проведенными исследованиями [20], которая сохраняется в регионе на протяжении последних двух десятилетий.

Следует отметить повышение конкурентоспособности региона именно как туристического направления. Ежегодно в Кузбассе наблюдается рост туристического потока (2022 г. – 1 065 010 туристов; 2023 г. – 1 423 328 туристов (+33,6 %)). В январе – июне 2024 г. турпоток в Кемеровской обл.

составил 645 639 единиц, в результате чего Кузбасс занял первое место по рассматриваемому показателю среди регионов СФО. Увеличивается число коллективных средств размещения (в 2023 г. +10 % к уровню 2015 г., однако к концу анализируемого периода показатель вернулся к значению 2018 г.) и численность размещенных в них лиц (в 2023 г. +61,5 % к уровню 2015 г.) (табл. 4). Следует отметить, что по числу коллективных средств размещения и по численности граждан, размещенных в этих средствах размещения, фактические значения заметно превысили целевой сценарий, обозначенный в Стратегии развития туризма в Кемеровской обл. до 2025 г.

В целом за рассматриваемый период отмечается рост доходов от туристической деятельности (табл. 5), однако темп этого роста нестабилен как в динамике, так и относительно среднероссийских, среднеокружных значений, а также значений в других регионах СФО, имеющих туристическую направленность (рис. 8).

Т а б л и ц а 3

Динамика смертности населения старше трудоспособного возраста и смертности от новообразований на 100 000 человек населения

Table 3. Dynamics of mortality among the population over working age and mortality from neoplasms per 100 000 population

Регион, страна	Значение показателя по годам, тыс. чел.					
	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Смертность населения старше трудоспособного возраста</i>						
РФ	3768	3667,9	4557	5366,9	4040,6	3571
СФО	3947,6	3879,6	4776	5637,5	4367,2	3837,8
Кузбасс	4054,3	3958,5	4747	5513,6	4354,2	3860,4
<i>Смертность населения от новообразований на 100000 человек населения</i>						
РФ	203	203,5	202	194,1	191,6	197,4
СФО	223	226,6	228,1	219,3	216,85	224,2
Кузбасс	244	243,6	246	239,5	234,13	239,1

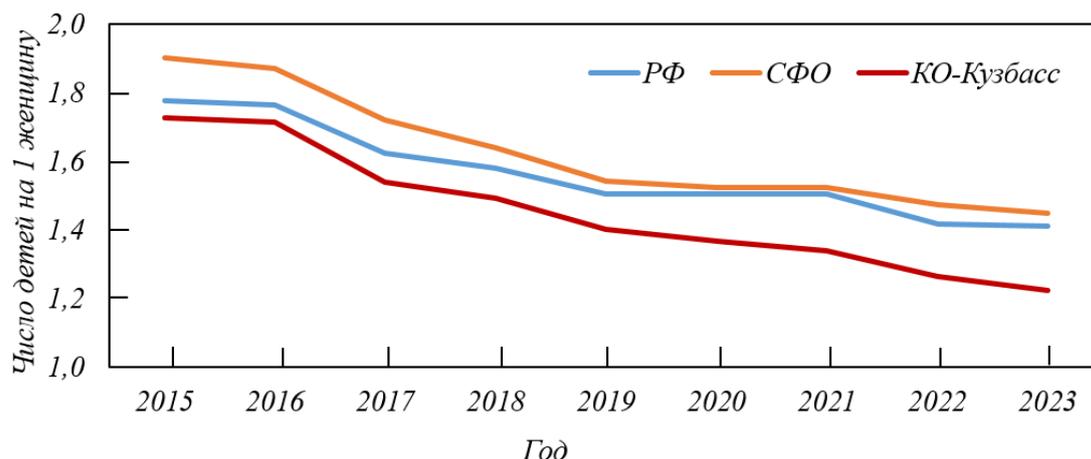


Рис. 7. Динамика суммарного коэффициента рождаемости в 2015 – 2023 гг.

Fig. 7. Dynamics of the total fertility rate in 2015–2023

Можно констатировать, что инфраструктура коллективного размещения в Кемеровской обл. развивается, вместе с тем ценовая политика отелей пока не позволяет привлечь более широкие слои населения Кузбасса для отдыха в гостиницах, санаториях и т.п. При этом уровень цен в коллективных средствах размещения в свою очередь определяется уровнем загрузки гостиниц, отелей и домов отдыха. Для повышения уровня загрузки важным является развитие туризма, позволяющий активно использовать имеющиеся коллективные средства размещения круглогодично. Например, в весенне-осеннее время делать упор на развитие образовательного туризма, развивая сотрудничество с работодателями, желающими повысить квалификацию своих сотрудников, и образовательными организациями, готовыми предоставить соответствующие образовательные услуги в виде программ повышения квалификации или программ профессиональной переподготовки. Необходимо интенсивно развивать оздоровительный туризм, объединяя Fitness-

программы с программами медицинского массажа, консультациями специалистов и т.д.

Выводы

Стратегия развития туризма в Кемеровской обл. до 2025 г. выполнена с использованием SWOT-анализа, сбалансирована в части оценки рисков, возможностей противодействия им, она имела все шансы успешной реализации. Ретроспективно видится, что в основу при ее разработке были положены тренды, прогнозы и перспективы суверенной и мировой экономической ситуации, не предвещающие тех эпидемиологических и геополитических событий международного масштаба, которые произошли в конце последнего десятилетия.

Представленные результаты экспресс-анализа в целом позволяют оценить уровень исполнения ключевых задач Стратегии развития туризма в КО-2025 как средний. Положительной оценки заслуживает рост ресурсной базы, обеспеченный

Т а б л и ц а 4

Динамика числа коллективных средств размещения и численности размещенных в них лиц

Table 4. Dynamics of the number of collective accommodation facilities and the number of persons accommodated in them

Регион, страна	Значение показателя по годам, тыс. чел.								
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
<i>Число коллективных средств размещения</i>									
РФ	20135	20534	25292	28074	28302	27328	28979	29547	31488
СФО	2252	2177	2577	2792	2793	2806	3021	3143	3238
Кузбасс	302	275	323	330	324	306	312	319	330
<i>Численность размещенных лиц</i>									
РФ	49284	54431	61563	71538	76042	47382	66540	73093	83578
СФО	4299	4144	4632	5234	5485	3567	5354	6112	6965
Кузбасс	486	440	554	586	587	387	683	671	785

Динамика доходов от туристической деятельности

Table 5. Dynamics of income from tourism activities

Регион, страна	Доход от туристической деятельности, млн руб.								
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
РФ	233495,3	258589,8	397457,2	432314,4	560853,9	572680,6	363583,8	561983,2	677310,0
СФО	16412,9	17114,5	27827,5	29040,6	31324,0	35532,4	20241,5	34755,5	48920,9
Кузбасс	17953,5	1749,4	3378,7	3817,1	3970,1	4939,6	1930,4	3588,7	4835,2
Республика Алтай	313,7	338,8	1451,7	1111,8	1084,3	1411,2	1435,9	2330,6	3572,8
Томская обл.	614,2	609,0	1404,6	948,5	1552,8	1428,2	575,3	1269,7	2116,1

за счет привлечения средств федерального и регионального бюджетов в рамках реализации отдельных целевых программ, а также средств частных инвесторов, позитивно воспринимающих потенциал развития туризма в Кузбассе. Создание особой экономической зоны туристско-рекреационного типа «Горная Шория» на территории Таштагольского муниципального района Кемеровской обл. – Кузбасса позволяет ожидать создания за счет средств государственного бюджета в обозримой перспективе инфраструктуры для развития бизнеса, получения определенных таможенных льгот, налоговых преференций и упрощения взаимодействия с государственными регулирующими органами.

Следует признать, что на развитие отрасли в регионе и достижение целевых ориентиров в Стратегии позитивное влияние оказало благоприятное изменение рыночной конъюнктуры и повышение привлекательности туристических услуг региона в результате пандемийных ограничений 2020 – 2021 гг., а также ограничений, связанных с геополитической обстановкой 2022 – 2024 гг., сокративших объемы выездного российского туризма. При этом инфраструктурные ограничения для развития туристического сектора региональ-

ной экономики области окончательно не устранены: сохраняется нехватка мощностей систем электро-, водоснабжения, высокий уровень физического износа действующих тепловых и водопроводных сетей, требуется увеличение пропускной способности автодорог при въездах на туристические территории.

Кадровое обеспечение развития отрасли значительно улучшилось: помимо образовательных организаций, указанных в Стратегии развития туризма КО-2025, подготовкой специалистов в сфере туризма и гостеприимства стал заниматься Сибирский государственный индустриальный университет, налажены и развиваются партнерские отношения между образовательными организациями и работодателями в части трудоустройства выпускников, участия работодателей в разработке и реализации соответствующих образовательных программ. Наблюдается опережающий рост отрасли по сравнению с темпами подготовки кадров, отсутствие в ряде образовательных организаций бюджетных мест, ограничивающее приток абитуриентов.

Обозначенные в настоящей работе негативные моменты реализации Стратегии развития туризма в Кемеровской обл. до 2025 г. обуславливают,

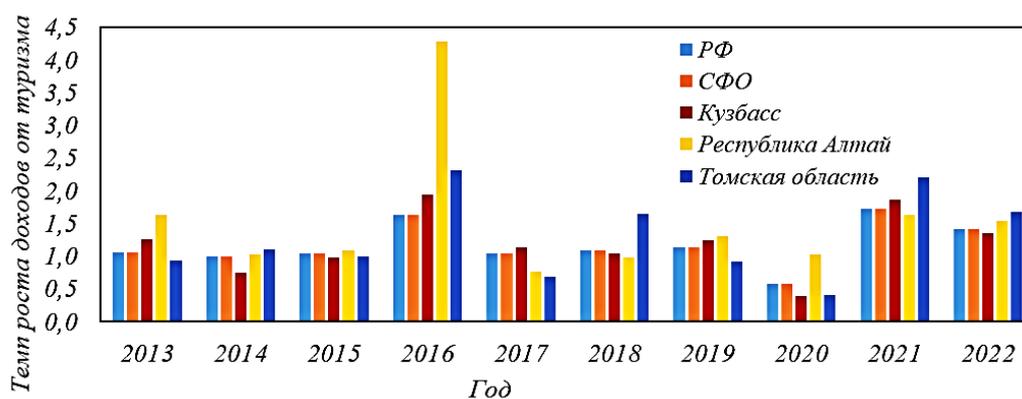


Рис. 8. Динамика темпов роста доходов от туристической деятельности в 2013 – 2022 гг.

Fig. 8. Dynamics of growth rates of income from tourism activities in 2013–2022

с одной стороны, необходимость объективной оценки показателей, достигнутых при реализации программного документа, с другой – разработки большего числа сценариев развития, а также более активного внимания государства к разработанным стратегиям развития субъектов Российской Федерации путем поддержки региональных проектов, связанных с ресурсосбережением, диверсификацией направлений деятельности, развитием несырьевых отраслей экономики.

При этом следует отметить, что достигнутые показатели развития туристической отрасли в настоящее время не являются достаточными для повышения уровня жизни населения, обеспечения устойчивого развития региона как в силу сохранения имеющегося уровня конкурентоспособности страны на мировом рынке туристических услуг, так и в силу специфики отраслевой структуры региональной экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородин С.Н. Модель оценки устойчивого развития региона на основе индексного метода. *Экономика региона*. 2023;1:45–59.
2. Гутак О.Я., Иванова Е.В., Попова О.А., Хренова А.В. Высшее образование в контексте обеспечения устойчивого развития Кузбасса. *Вестник Бурятского государственного университета. Экономика и менеджмент*. 2022;2:30–45.
3. Гамидуллаева Л.А., Толстых Т.О., Шмелева Н.В. Методика комплексной оценки потенциала промышленной экосистемы в контексте устойчивого развития региона. *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2020;2:29–48.
4. Коростышевская Е.М., Плотников В.А., Пролубников А.В., Рукинов М.В. Социальная компонента государственной региональной политики и ее роль в обеспечении устойчивого развития и экономической безопасности. *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. 2018;6:120–126.
5. Урсул А.Д., Романович А.Л. Концепция устойчивого развития и проблема безопасности. *Философия науки*. 2001;3(11):83–105.
6. Коршунов И.В. Устойчивое развитие в стратегиях регионов: выбираемые подходы и решения. *Экономика региона*. 2023;1:15–28.
7. Макаренко В.С., Штимер А.И. Проблема интенсификации въездного туризма Ростовской области как фактора устойчивого развития региона. *Стратегия устойчивого развития регионов России*. 2014;24:63–66.
8. Уткина Н.В. Аспекты управления туризмом как инструментом устойчивого развития региона (на примере Пензенской области). *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2024;1:32–47.
9. Васенина М.Е., Матушкин А.С. К вопросу о формировании кластера экологического туризма в Кировской области. *Форум молодежной науки*. 2020;2:31–36.
10. Кукушкина О.С. Особенности формирования модели туристического бизнес-пространства региона. В кн.: *Сборник материалов международной научно-практической конференции. Экономика и управление гостеприимством территории*. Великий Новгород: Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого. 2021:44–50.
11. Шипунова В.В., Иванова Е.В., Цымбалюк М.В. Развитие туризма в контексте диверсификации региональной экономики как фактор устойчивого развития промышленного региона. *Экономика. Профессия. Бизнес*. 2024;3:154–163.
12. Ростуризм заявил, что туризм обеспечивает 10 млн рабочих мест. URL: <https://tass.ru/ekonomika/15667797> (дата обращения 24.12.2024).
13. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 5 мая 2018 года № 872-р «Об утверждении концепции федеральной целевой программы «Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации (2019 – 2025 годы)». URL: <https://docs.cntd.ru/document/557414759> (дата обращения 24.12.2024).
14. Указ Президента Российской Федерации от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года».
15. Постановление Правительства Кемеровской обл. – Кузбасса «Об Утверждении государственной программы Кемеровской обл. – Кузбасса «Развитие туризма Кузбасса» от 29.09.2023 № 632. URL: <https://ako.ru/bulletin/319368> (дата обращения 24.12.2024).
16. Стратегия развития туризма в Кемеровской обл. до 2025 г., утвержденная Распоряжением Коллегии Администрации Кемеровской области от 1 марта 2013 г. № 194-р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/412811132> (дата обращения 24.12.2024).
17. О стратегическом планировании в Российской Федерации: федеральный закон от 28.06.2014 № 172-ФЗ (последняя редакция). URL: <https://docs.cntd.ru/document/420204138> (дата обращения: 24.12.2024).

18. Постановление Правительства Российской Федерации «О создании на территории Таштагольского муниципального района Кемеровской области – Кузбасса особой экономической зоны туристско-рекреационного типа» от 13.02.2025 № 155. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1311337816> (дата обращения 15.02.2025).
19. Лешуков Т.В. Демографическая безопасность горнопромышленного региона (на примере Кемеровской области). *Вестник КемГУ*. 2013;4(56):14.
20. Буланов Ю.Н., Иванова Е.В. Оценка предварительных результатов реализации Стратегии развития Кемеровской обл. до 2025 г. *Региональная экономика и управление: электронный научный журнал*. 2018;3. URL: <https://eee-region.ru/article/5512/> (дата обращения 20.12.2024).
8. Utkina N.V. Aspects of tourism management as a tool for sustainable development of the region (using the example of the Penza region). *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve*. 2024;1:32–47. (In Russ.).
9. Vasenina M.E., Matushkin A.S. On the issue of forming an ecological tourism cluster in the Kirov region. *Forum molodezhnoi nauki*. 2020;2:31–36. (In Russ.).
10. Kukushkina O.S. Features of the formation of a model of the regional tourism business space. *Ekonomika i upravlenie gostepriimstvom territorii*. Collection of materials of the international scientific and practical conference. Velikii Novgorod: Novgorodskii gosudarstvennyi universitet imeni Yaroslava Mudrogo. 2021:44–50. (In Russ.).
11. Shipunova V.V., Ivanova E.V., Tsybalyuk M.V. Tourism development in the context of regional economic diversification as a factor in sustainable development of an industrial region. *Ekonomika. Professiya. Biznes*. 2024;3:154–163. (In Russ.).
12. Rostourism stated that tourism provides 10 million jobs. URL: <https://tass.ru/ekonomika/15667797>. (accessed 24.12.2024). (In Russ.).
13. Order of the Government of the Russian Federation of May 5, 2018 no. 872-r "On approval of the concept of the federal target program «Development of domestic and inbound tourism in the Russian Federation (2019–2025)». URL: <https://docs.cntd.ru/document/557414759>. (accessed 24.12.2024). (In Russ.).
14. Decree of the President of the Russian Federation of 21.07.2020 No. 474 «On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030».
15. Resolution of the Government of the Kemerovo Region-Kuzbass «On Approval of the State Program of the Kemerovo Region-Kuzbass "Development of Tourism in Kuzbass» dated September 29, 2023 No. 632. URL: <https://ako.ru/bulletin/319368> (accessed 24.12.2024). (In Russ.).
16. Strategy for the development of tourism in the Kemerovo region until 2025, approved by the Order of the Board of the Administration of the Kemerovo Region dated March 1, 2013 No. 194-r. <https://docs.cntd.ru/document/412811132>. (accessed 24.12.2024). (In Russ.).
17. On strategic planning in the Russian Federation: Federal Law of 28.06.2014 No. 172-FZ (latest revision). URL: <https://docs.cntd.ru/document/420204138> (accessed 24.12.2024). (In Russ.).
18. Resolution of the Government of the Russian Federation «On the creation of a special economic zone of a tourist and recreational type on the territory of the Tashtagol municipal district of the Kemerovo region – Kuzbass» dated 13.02.2025 No. 155.

REFERENCES

1. Borodin S.N. Model for assessing sustainable development of a region based on the index method. *Ekonomika regiona*. 2023;1:45–59. (In Russ.).
2. Gutak O.Ya., Ivanova E.V., Popova O.A., Khrenova A.V. Higher education in the context of ensuring sustainable development of Kuzbass. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika i menedzhmen*. 2022;2:30–45. (In Russ.).
3. Gamidullaeva L.A., Tolstykh T.O., Shmeleva N.V. Methodology for a comprehensive assessment of the potential of an industrial ecosystem in the context of sustainable development of a region. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve*. 2020;2:29–48. (In Russ.).
4. Korostyshevskaya E.M., Plotnikov V.A., Pro-lubnikov A.V., Rukinov M.V. The social component of state regional policy and its role in ensuring sustainable development and economic security. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*. 2018;6:120–126. (In Russ.).
5. Ursul A.D., Romanovich A.L. The concept of sustainable development and the problem of security. *Filosofiya nauki*. 2001;3(11):83–105. (In Russ.).
6. Korshunov I.V. Sustainable Development in Regional Strategies: Selected Approaches and Solutions. *Ekonomika regiona*. 2023;1:15–28. (In Russ.).
7. Makarenko V.S., Shtimer A.I. The problem of intensification of inbound tourism in the Rostov region as a factor in sustainable development of the region. *Strategiya ustoichivogo razvitiya regionov Rossii*. 2014;24:63–66. (In Russ.).

URL: <https://docs.cntd.ru/document/1311337816> (accessed 24.12.2024). (In Russ.)

19. Leshukov T.V. Demographic security of the mining region (on the example of the Kemerovo region). *Vestnik KemGU*. 2013;4(56):14. (In Russ.).
20. Bulanov Yu.N., Ivanova E.V. Assessment of preliminary results of the implementation of the Kemerovo Region Development Strategy until 2025. *Regional'naya ekonomika i upravlenie: elektronnyi nauchnyi zhurnal*. 2018;3. URL: <https://eee-region.ru/article/5512/> (In Russ.).

Сведения об авторах:

Елена Владимировна Иванова, к.э.н., доцент кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: ivanova_ev@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-3174-0426

SPIN-код: 3163-2542

Ивушкина Наталья Владимировна, к.э.н., преподаватель кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: ivushkina_nv@sibsiu.ru

Перекрест Наталья Васильевна, преподаватель кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: perekrest_nv@sibsiu.ru

ORCID: 0009-0002-2550-2341

SPIN-код: 6566-7590

Information about the authors:

Elena V. Ivanova, Cand. Sci. (Econ.), associate professor of the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University

E-mail: ivanova_ev@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-3174-0426

SPIN-код: 3163-2542

Natalya V. Ivushkina, Cand. Sci. (Econ.), associate professor of the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University

E-mail: ivushkina_nv@sibsiu.ru

Natalya V. Perekrest, Lecturer at the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University

E-mail: perekrest_nv@sibsiu.ru

ORCID: 0009-0002-2550-2341

SPIN-код: 6566-7590

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 21.02.2025

После доработки 03.03.2025

Принята к публикации 12.03.2025

Received 21.02.2025

Revised 03.03.2025

Accepted 12.03.2025

Оригинальная статья

УДК 338

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-130-138

**ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

© 2025 г. Н. Г. Жданова, Р. А. Садыкина

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. В рамках глобальной повестки актуальным для современного общества становится обеспечение устойчивого развития, которое предполагает создание условий для экономического прогресса и улучшения качества жизни населения. В контексте устойчивого развития регионов Российской Федерации ключевой является концепция, предусматривающая динамичное преобразование, направленное на достижение гармонии между экономическими, социальными и экологическими компонентами. При этом промышленный сектор, являющийся основой российской экономики, играет основополагающую роль в достижении этой цели. В основу исследования положена гипотеза о том, что интеграция передовых экологических, социальных и управленческих практик способна кардинально улучшить устойчивость развития отечественной промышленности. Рассмотрены практические аспекты современных технологий устойчивого развития промышленных предприятий; выявлены «узкие места», тормозящие движение в этом направлении. Проведенный анализ международного опыта устойчивого развития в промышленном секторе позволил выделить лучшие подходы и практики, которые могут быть адаптированы к российским условиям. В рамках исследования были выявлены отечественные лидеры в области реализации экологических и социальных практик, их опыт служит примером и источником ценных рекомендаций. По результатам проведенного научного исследования обозначены ключевые шаги, которые могут быть реализованы предприятиями промышленного сектора для повышения устойчивости и конкурентоспособности. Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что устойчивое развитие российской промышленности является не только важной целью, но и стратегической необходимостью. Оно способно обеспечить долгосрочный экономический рост, социальную стабильность и сохранение окружающей среды. Исследование создает основу для дальнейшего изучения эффективных направлений по обеспечению устойчивости промышленных предприятий России, открывая путь к формированию более устойчивой и конкурентоспособной экономики.

Ключевые слова: устойчивое развитие, технологии устойчивого развития, социальные и экологические практики, промышленность, циркулярная экономика, зеленые технологии

Для цитирования: Жданова Н.Г., Садыкина Р.А. Практические аспекты технологий устойчивого развития промышленных предприятий. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2025;1(51):130–138. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-130-138](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-130-138)

Original article

**PRACTICAL ASPECTS OF SUSTAINABLE INDUSTRIAL DEVELOPMENT
TECHNOLOGIES**

© 2025 N. G. Zhdanova, R. A. Sadykina

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. Within the framework of the global agenda, ensuring sustainable development is becoming relevant for modern society, which involves creating conditions for economic progress and improving the quality of life of the population. In the context of the sustainable development of the regions of the Russian Federation, the key concept is a dynamic transformation aimed at achieving harmony between economic, social and environmental components. At the same time, the industrial sector, which is the backbone of the Russian economy, plays a fundamental role in achieving this goal. The research is based on the hypothesis that the integration of advanced environmental, social and management practices can dramatically improve the sustainability of the development of domestic industry. The practical aspects of modern technologies for the sustainable development of industrial enterprises are considered; the "bottlenecks" that hinder movement in this direction are identified. The analysis of the international experience of sustainable development in the industrial sector has allowed us to identify the best approaches and practices that can be adapted to Russian conditions. The study identified domestic leaders in the field of environmental and social practices, and their experience serves as an example and a source of valuable recommendations. Based on the results of the conducted scientific research, the key steps that can be implemented by enterprises of the industrial sector to increase sustainability and competitiveness are outlined. The results of the study allow us to conclude that the sustainable development of Russian industry is not only an important goal, but also a strategic necessity. It is capable of ensuring long-term economic growth, social stability and environmental conservation. The study creates the basis for further study of effective directions for ensuring the sustainability of Russian industrial enterprises, paving the way for the formation of a more stable and competitive economy.

Keywords: sustainable development, sustainable development technologies, social and environmental practices, industry, circular economy, green technologies

For citation: Zhdanova N.G., Sadykina R.A. Practical aspects of sustainable industrial development technologies. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):130–138. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-130-138](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-130-138)

Введение

В контексте глобальных вызовов, связанных с экологическими проблемами, повышением требований к энергоэффективности и усилением социальной ответственности, промышленный сектор России сталкивается с необходимостью осмысления перспектив своего развития.

В современных условиях российская промышленность имеет дело со множеством проблемных аспектов, включая амортизацию производственных мощностей, недостаточную энергоэффективность, значительные объемы эмиссии загрязняющих веществ и отходов производства [1], а также адаптацию к изменившейся геополитической ситуации, подразумевающей развитие стратегий импортозамещения.

В контексте этих вызовов интеграция эффективных методов управления и технологических решений как отечественного, так и международного происхождения может оказать существенное влияние на улучшение текущей ситуации.

Необходимость проведения комплексных мероприятий по техническому переоснащению и инновационному развитию становится очевидной. Разработка и внедрение стратегических рекомендаций может способствовать не только обновлению производственных мощностей, но и укреплению позиций российских предприятий на международном рынке. Это способно сыграть ключевую роль в обеспечении устойчивого развития отечественной промышленности.

Целью настоящей работы является выявление практических аспектов эффективных технологий устойчивого развития предприятий промышленного сектора экономики России.

В настоящей работе ставили следующие задачи исследования:

- оценить «узкие места» современного состояния российской промышленности и ее способность к достижению устойчивости;
- проанализировать международный опыт устойчивого развития промышленного сектора;
- установить отечественных лидеров в области реализации экологических и социальных практик;
- определить направления повышения устойчивости, которые могут быть успешно реализованы промышленными предприятиями России.

Для идентификации факторов, оказывающих негативное воздействие на российскую промышленность, и разработки стратегий их нейтрализации целесообразно обратиться к концепции устойчивого развития [2].

Суть рассматриваемой концепции заключается в применении подхода экономического и социального улучшений, ориентированных на обеспечение текущих нужд без ущерба для способности грядущих поколений обеспечивать собственные требования. Устойчивое развитие включает в себя гармонизацию экономического роста, социального развития и экологической безопасности,

а также учет долгосрочных последствий принимаемых решений и принципов социальной справедливости и равноправия в распределении ресурсов.

Устойчивое развитие стало одним из центральных направлений глобальной повестки. В 2015 г. Организацией Объединенных Наций был принят ряд целей устойчивого развития до 2030 г. [3], охватывающих экономические, экологические и социальные аспекты. Это оказало влияние на формирование новых тенденций во всех сферах человеческой деятельности, в том числе в промышленном секторе. Российская промышленность обладает значительным потенциалом для повышения экологической и экономической эффективности, а также для внедрения инновационных технологий, способствующих достижению целей устойчивого развития.

Для современной российской промышленности характерны определенные «узкие места», обусловленные комплексом факторов, оказывающих как прямое, так и косвенное воздействие на ее развитие. В работе [4] акцентируется внимание на тех аспектах, которые оказывают наиболее негативное влияние на состояние промышленного сектора и его способность к достижению устойчивости (конкурентоспособность, экспортная зависимость добычи сырьевых ресурсов, инвестиции, развитие сектора малого и среднего бизнеса, экология).

Относительно низкий уровень конкурентоспособности российских промышленных предприятий на международной арене коррелируется с применением устаревших производственных технологий, ограниченной инновационной активностью и зависимостью от импорта компонентов и оборудования, что особенно актуально в условиях введения санкционных мер. Зависимость от экспорта сырьевых ресурсов, в частности нефти и газа, ставит российскую промышленность в подчиненное положение относительно колебаний мировых цен на товары, что делает сектор уязвимым в условиях глобальных изменений. Вместе с тем такая зависимость ограничивает диверсификацию экономического развития, что может привести к упущению потенциала развития других отраслей, включая производство высокотехнологичной продукции и услуг. Для решения рассматриваемых проблем необходимо разработать и внедрить стратегии, направленные на диверсификацию экономики и снижение зависимости от добычи природных ресурсов, что позволит стимулировать развитие других секторов экономики.

Недостаток инвестиций (в том числе внутренних) в развитие и модернизацию производственных мощностей ограничивает возможности внедрения передовых технологий, повышения производитель-

ности труда и качества продукции, что является существенным препятствием для промышленного роста. Недостаточное развитие сектора малого и среднего бизнеса, который мог бы стимулировать экономический рост и создание новых рабочих мест, связано с проблемами доступа к финансовым ресурсам, высокой степенью бюрократизации и недостаточной поддержкой со стороны государственных институтов, что приводит к неравномерному распределению промышленного потенциала по регионам страны.

Промышленный сектор России сталкивается с экологическими вызовами, включая загрязнение окружающей среды и недостаточное соблюдение экологических норм. Эти факторы могут иметь негативное воздействие на здоровье населения, состояние природной среды и замедлить инновационное развитие промышленных предприятий. Недостаточно развитая «зеленая» экономика приводит к неэффективному использованию ресурсов, ухудшению экологической ситуации и снижению возможностей для устойчивого развития. Необходимость разработки и реализации новых стратегий и подходов, направленных на повышение энергоэффективности, сокращение выбросов и отходов, а также на более широкое внедрение инновационных методов (создание промышленных симбиозов и инновационных экосистем) является актуальной задачей для достижения целей устойчивого развития.

Следует подчеркнуть, что динамика состояния промышленного комплекса Российской Федерации подвержена временным колебаниям и обусловлена комплексом факторов, включая экономическую стратегию государственного управления, глобальные экономические тенденции и трансформации в сфере международной торговли.

Адаптация и интеграция принципов устойчивого развития в промышленный сектор на текущем этапе может быть достигнута не только через разработку и реализацию новых законодательных инициатив или освоение передовых технологий, но и путем эффективного использования накопленного опыта (как внутри страны, так и за ее пределами). Многоаспектный подход к преодолению существующих вызовов может стать важнейшим фактором в обеспечении устойчивости и усилении конкурентных преимуществ промышленных предприятий как на международной арене, так и на внутреннем рынке.

Ключевые направления устойчивого развития промышленного сектора России

Анализ международного опыта в сфере устойчивого развития промышленного сектора [5 – 11]

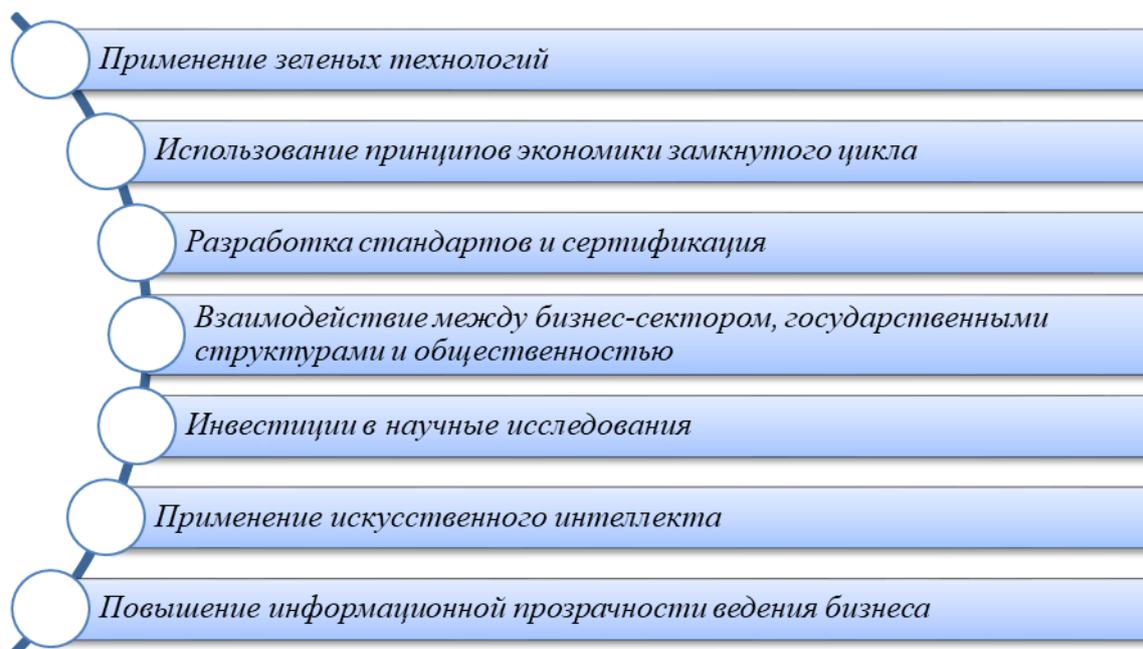


Рис. 1. Ключевые направления устойчивого развития промышленного сектора России
 Fig. 1. Key areas of sustainable development of the Russian industrial sector

позволяет выделить ряд эффективных направлений, которые могут быть успешно реализованы в России (рис. 1).

Принципы зеленой экономики направлены на устойчивое развитие общества через эффективное использование природных ресурсов, минимизацию экологического ущерба и внедрение инновационных технологий. Это помогает снизить нагрузку на экосистемы, улучшить качество жизни людей и создать условия для долгосрочного экономического роста.

Переход к циркулярной экономике, которая предполагает многократное использование и переработку материалов и ресурсов, позволяет значительно сократить потребление природных ресурсов и уменьшить количество мусора.

Разработка стандартов и последующая сертификация для промышленных предприятий способствует соблюдению экологических и социальных норм, что оказывает положительное воздействие на качество продукции и способствует укреплению репутации предприятий.

Сотрудничество между ключевыми участниками экономической деятельности обеспечивает разработку и реализацию эффективных программ, учитывающих интересы всех сторон, что способствует гармонизации их взаимодействия.

Вложения в научные разработки играют основополагающую роль в создании инновационных технологий и методов, которые делают производственные процессы более экологичными и устойчивыми. Благодаря этим технологиям, предприятия могут эффективно использовать ресурсы, ми-

нимизируя негативное воздействие на окружающую среду на всех этапах (от добычи сырья до утилизации готовой продукции).

В современном мире искусственный интеллект становится незаменимым инструментом, глубоко проникая в производственные процессы для достижения максимальной эффективности и снижения затрат. Его применение охватывает широкий спектр задач: от оптимизации производственных линий и прогнозирования технического обслуживания оборудования до обеспечения высокого качества выпускаемой продукции. Экономия достигается за счет минимизации простоев, предотвращения брака, а также оптимизации потребления ресурсов (энергии, материалов и человеческого труда).

Примеры успешных зарубежных практик в области устойчивого развития промышленности могут быть адаптированы и внедрены в России для повышения уровня устойчивости отечественных промышленных предприятий. Комплексное применение таких практик может ускорить процесс повышения конкурентоспособности российских производителей.

Стоит отметить распространенную среди крупных мировых промышленных компаний практику публикации экологических отчетов, демонстрирующую их приверженность принципам устойчивого развития. Компании Канады, Финляндии, Германии, Швеции, США и Японии являются лидерами в раскрытии информации не только об экологическом состоянии внутри производства, но и о его воздействии на окружающую среду [12].

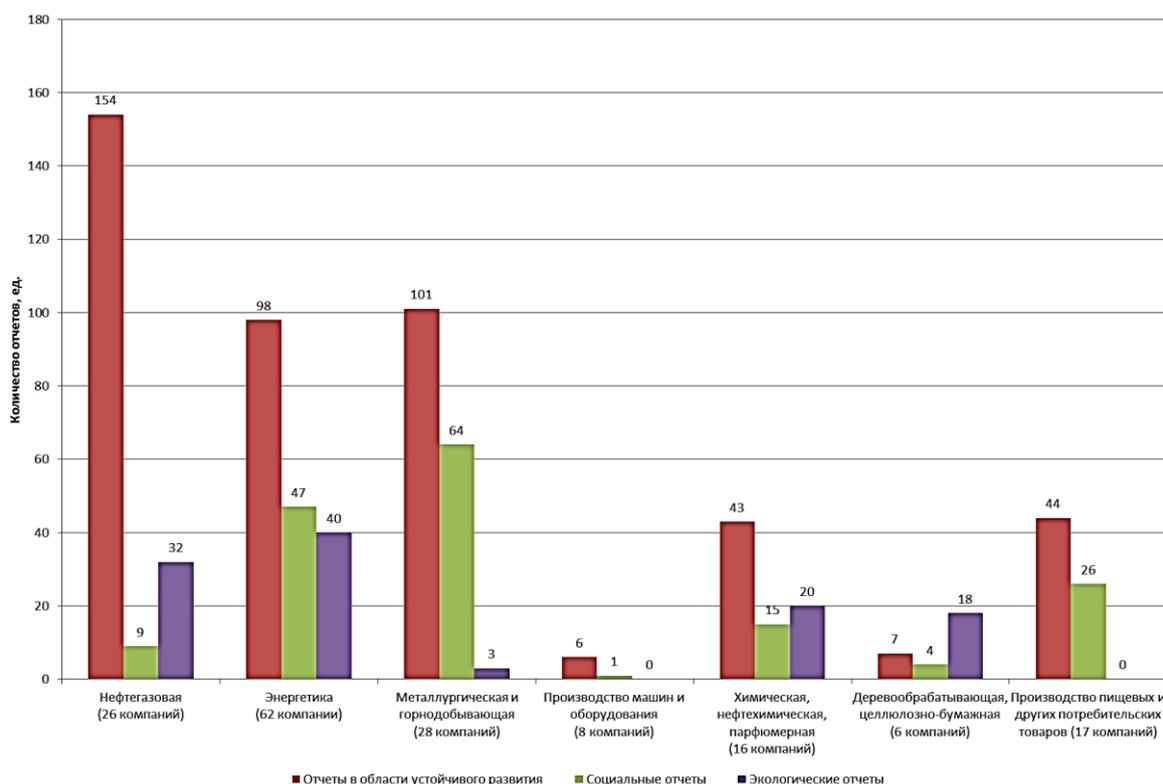


Рис. 2. Распределение корпоративных нефинансовых отчетов промышленной отрасли России за период с 2001 по 2023 гг. [13]
Fig. 2. Distribution of corporate non-financial reports of the Russian industrial sector for the period from 2001 to 2023 [13]

В российской практике экологические отчеты пока являются наименее распространенными: из 1669 нефинансовых отчетов, зарегистрированных в Национальном Регистре (296 компаний) за период с 2001 по 2023 гг. представлено 121 экологический отчет, социальных отчетов – 393, отчетов в области устойчивого развития – 695, интегрированных отчетов – 460 [13].

Распределение нефинансовых отчетов промышленных российских компаний по видовому составу и отраслям промышленной сферы представлено на рис. 2. Лидирующие позиции занимает нефтегазовая (27 %), металлургическая и горнодобывающая отрасли (23 %), а также энергетика (25 %).

Проведенный анализ данных библиотеки корпоративных нефинансовых отчетов по состоянию на март 2025 г. позволил выявить, что из 150 представленных в реестре промышленных компаний публикуют свою нефинансовую отчетность на регулярной основе за период 2020 – 2023 гг. (сроки публикации отчетности за 2024 г. еще не наступили) только 39 предприятий (26 %). При этом 21 компания формирует отчеты в области устойчивого развития, 14 – составляют интегрированные отчеты, 4 – экологические. Социальные отчеты представлены лишь производственной компанией ООО «Нестле Россия» в 2020 и 2021 гг. (см. таблицу).

Эффективные практики лидеров российской промышленности в области устойчивого развития

В настоящее время флагманами отечественной промышленности, которые осуществляют интеграцию принципов устойчивого развития в свою производственную деятельность, можно назвать следующие предприятия: ПАО «ГМК «Норильский никель», ПАО «Газпром нефть», ПАО «ОК «РУСАЛ».

Одним из лидеров мировой индустрии по производству никеля и палладия является ПАО «ГМК «Норильский никель». Компания реализует мероприятия, направленные на минимизацию эмиссий загрязняющих веществ в атмосферу и повышение экологической эффективности производственных процессов. Инвестиции направляются на внедрение передовых технологий по очистке газовых выбросов и систем водоочистки, а также на разработку и реализацию энергоэффективных решений.

Одним из лидеров российской нефтяной индустрии является ПАО «Газпром нефть». Компания осуществляет комплекс мероприятий по снижению эмиссий парниковых газов и оптимизации энергетического потребления. В рамках стратегии устойчивого развития компания внедряет инновационные технологии, в том числе использование солнечной энергии для энергетического обеспечения своих объектов, а также проводит

Состав российских промышленных компаний, публикующих свою нефинансовую отчетность на регулярной основе за период 2020 – 2023 гг.
Composition of Russian industrial companies that publish their non-financial statements on a regular basis for the period 2020 – 2023

Вид отчетов	Компании промышленного сектора
Отчеты в области устойчивого развития	ПАО «ЛУКОЙЛ», ПАО «НК «Роснефть», ООО «Сахалинская Энергия», ПАО «НОВАТЭК», ПАО «ЯТЭК», ПАО «Газпром», Инжиниринговый дивизион Госкорпорации «Росатом», ПАО «Россети», ПАО «ЭЛС-Энерго», Госкорпорация «Росатом», ООО УК «Металлоинвест», ПАО «ГМК «Норильский никель», ПАО «Северсталь», ООО «ЕВРАЗ», ОК «РУСАЛ», ПАО «Полус», ПАО АК «АЛРОСА», АО «ОМК», ПАО «Уралкалий», ООО «Свеза»
Социальные отчеты	–
Экологические отчеты	ПАО «Сургутнефтегаз», АО «ГНЦ НИИАР», АО «СХК», АО «Уральский электрохимический комбинат»
Интегрированные отчеты	ПАО «Гатнефть», ПАО «ЯТЭК», ПАО «Россети Северо-Запад», ПАО «Россети Московский регион», ПАО «РусГидро», ПАО «Россети Сибирь», Госкорпорация «Росатом», ПАО «Россети Центр и Приволжье», ПАО «Россети Центр», ПАО «ИНТЕР ПАО ЕЭС», ПАО «Юнипро», АО «Сетевая компания», ПАО «Полиметалл», ПАО «ФосАгро», ПАО «СИБУР-Холдинг», Segezha Group
Примечание. Составлено по данным Российского союза промышленников и предпринимателей [13].	

оптимизацию производственных процессов с целью уменьшения объема отходов.

ПАО «ОК «РУСАЛ» занимает одну из ведущих позиций на мировом рынке алюминия, активно работает над сокращением эмиссий парниковых газов и повышением энергоэффективности производственных процессов. Компания инвестирует в проекты, связанные с использованием возобновляемых источников энергии (в частности гидроэнергетики), и разрабатывает инновационные технологии для переработки и утилизации отходов. Кроме этого, ПАО «ОК «РУСАЛ» реализует множество благотворительных программ посредством корпоративного благотворительного фонда. В управлении фонда находятся следующие проекты: «Устойчивые города РУСАЛА», «Помогать просто», «Школа городских изменений». Они направлены на развитие потенциала местных сообществ (социальной инфраструктуры и городской среды), вовлечение местного населения в волонтерство и обучение будущих лидеров городских изменений передовым социальным технологиям.

По данным Национального рейтингового агентства по итогам 2023 г. примерами лучших экологических практик названы проекты, реализуемые на ПАО «НЛМК», ГК «Дело», ПАО «КАМАЗ» [14].

В ПАО «НЛМК» разработана система мер по снижению воздействия на водные ресурсы, которая включает создание замкнутых водооборотных циклов на предприятиях и обратное водоснабжение. Внедрены технологии очистки и подготовки воды.

ГК «Дело» реализует мероприятия, направленные на повышение энергоэффективности, использует электрическое крановое оборудование для улучшения операционной эффективности и снижения выбросов; развивает использование солнечной энергии.

ПАО «КАМАЗ» реализует инициативы по снижению выбросов парниковых газов путем замены системы освещения на светодиодную, оптимизации работы компрессорного оборудования. Кроме того, на предприятии осуществляется разработка конструкторской документации для двигателей, а также их испытание, проводится контроль над отработанными газами автотранспорта, используется электротранспорт.

Лидерами в области социальных практик являются холдинг ЭН+, ПАО «ОК «РУСАЛ», ОАО «КРАСЦВЕТМЕТ».

С целью соблюдения прав человека в холдинге ЭН+ разработана Политика многообразия и равных возможностей для сотрудников и кандидатов на всех этапах осуществления трудовой деятельности. Компания регулярно проводит оценку рисков, связанных с правами человека, и включает их в систему управления рисками.

Основу социальной политики ОАО «КРАСЦВЕТМЕТ» составляет программа «Мои бонусы». Она включает компенсации и выплаты социального характера, предоставляемые сотрудникам, по девяти программам. Согласно отчету охват сотрудников, пользующихся социальным пакетом, составляет 95 % [14].

Отдельного внимания заслуживает положительный опыт внедрения крупными промышленными компаниями технологий искусственного интеллекта в свои процессы [15]. Цифровая система управления атомной отраслью «Навигатор», разработанная специалистами госкорпорации «Росатом», помогает в обеспечении повышения скорости и качества принятия управленческих решений руководителями всех уровней. Функцио-

нал «Навигатора» включает в себя не только голосовое распознавание и протоколирование совещаний, но и глубокую интеграцию с первичными источниками данных. Система автоматически собирает, визуализирует и проверяет информацию из различных источников, обеспечивая ее систематизацию, хранение и дальнейший анализ. Важно отметить, что «Навигатор» способен к кросс-верификации данных, исключая возможные неточности и погрешности. Система выполняет сложные аналитические задачи, включая предиктивную аналитику. На основе собранной информации «Навигатор» создает детальные «портреты отрасли», охватывающие кадровые, финансовые и производственные аспекты, что позволяет руководству компании принимать компетентные решения на стратегическом уровне.

На промышленной площадке Магнитогорского метизно-калибровочного завода «ММК-МЕТИЗ» успешно испытали беспилотное транспортное средство автомобильного завода «Урал» для доставки грузов между производственными переделами и в транспортно-логистические центры. Машины, оснащенные системами автономного управления, эффективно решают задачи доставки грузов даже в сложных условиях (низкие температуры, плохая видимость и сложный рельеф местности).

«Газпром нефть – смазочные материалы» (оператор бизнеса масел «Газпром нефть») запустил первую в России цифровую систему «Алхимик», направленную на создание многокомпонентных рецептур моторных масел с помощью искусственного интеллекта. Эта система сокращает время между разработкой и началом массового производства новых товаров с шести месяцев до одного – двух.

ПАО «Газпром нефть» перешло к перевозке грузов в Арктике беспилотным автотранспортом. Их применение на северных месторождениях значительно повышает эффективность логистики, увеличивая объемы поставок необходимого оборудования и материалов. Этот фактор играет критическую роль в успешной реализации промышленных проектов в суровых климатических условиях.

ПАО «Северсталь» внедрило собственную разработку по управлению темпом прокатки и выдачей слябов из печей на основе моделей машинного обучения. Программный комплекс «Автотемп 2.0» позволяет анализировать табличные неоднородные данные и с высокой точностью вычислять время прокатки металла в стане, увеличивая производительность.

Объединенная двигателестроительная корпорация «Ростех» внедрила новый способ люминесцентного контроля качества деталей авиационных двигателей с применением машинного зрения и нейросетевых технологий. Он обеспечивает высокоточную

инспекцию изделий, выполняет полный цикл обработки изображений, включая съемку всех поверхностей детали, поиск дефектов любого типа и размера, расчет их геометрических характеристик, классификацию дефектов и окончательное определение годности изделия в соответствии с установленными нормативными документами. Применение такого метода значительно повышает точность и достоверность результатов контроля качества, минимизируя риск выпуска бракованной продукции.

Один из примеров применения искусственного интеллекта в металлургии является интеллектуальная система управления флотаторами на обогатительной фабрике в г. Норильск. Основанная на сложной математической модели она автоматически определяет оптимальные режимы работы флотационных машин, позволяя достичь максимальной эффективности обогащения руды и снизить энергопотребление. Математическая модель учитывает множество параметров (состав руды, температуру, реагенты и другие факторы), обеспечивая динамическую оптимизацию производственного процесса в реальном времени. Использование искусственного интеллекта позволяет добиться значительного повышения производительности и снижения издержек на всех этапах производственного цикла.

Это наглядные примеры российских промышленных предприятий, осуществляющих интеграцию принципов устойчивого развития в свою производственную деятельность. Применение рассматриваемых принципов лидерами отрасли способствует осознанию значимости устойчивого развития среди прочих компаний и их переходу к внедрению соответствующих практик и технологий.

Важно отметить, что в условиях санкций и цифровой трансформации искусственный интеллект в промышленности России становится ключевым инструментом для оптимизации производства, логистики и управления.

В качестве основных направлений искусственного интеллекта [16], которые внедряют российские промышленные компании, можно выделить следующие:

- предиктивную аналитику (прогнозирование поломок);
- роботизацию производства (коллаборативные роботы);
- контроль качества через компьютерное зрение;
- цифровые двойники заводов;
- логистика и цепочки поставок;
- энергоэффективность и снижение выбросов;
- кибербезопасность промышленных систем.

Выводы

Концепция устойчивого развития предполагает нахождение сбалансированного взаимодействия

между экологическими, социальными и экономическими факторами. В рамках рассматриваемой концепции устойчивое развитие не ограничивается исключительно экономическим прогрессом, оно также включает в себя аспекты социальной справедливости и экологической устойчивости, направленные на повышение качества жизни населения и предотвращение экологической деградации. Поэтому индикаторы, разработанные для оценки устойчивого развития, должны объединять показатели, которые демонстрируют текущее состояние и изменения в экономической, социальной и экологической областях.

Для повышения устойчивости и конкурентоспособности промышленного сектора экономики Российской Федерации могут быть реализованы следующие ключевые шаги: глубокая интеграция энергоэффективных технологий, активное продвижение циркулярной экономики, образование и развитие кадров, тесное взаимодействие с государственными и некоммерческими организациями, повышение прозрачности и открытости действий в области устойчивого развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитический центр при правительстве Российской Федерации. Экология и экономика: тенденция к декарбонизации. *Бюллетень о текущих тенденциях российской экономики*. 2020;66:18. URL: <https://ac.gov.ru/publications> (дата обращения: 13.01.2025)
2. The Rio Declaration on Environment and Development. In: *Report of the United Nations Conference on Environment and Development*. 1992.151/26(I):3–7.
3. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН от 25 сентября 2015 г. № 70/1 «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года». URL: <https://base.garant.ru/407358666> (дата обращения: 13.01.2025)
4. Гераськина А.А., Серая Д.Ф. Перспективы устойчивого развития российской промышленности: анализ и рекомендации. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2023;13(9A):63–70.
5. Kuo T.C., Smith S. A systematic review of technologies involving eco-innovation for enterprises moving towards sustainability. *Journal of Cleaner Production*. 2018;192:207–220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.212>
6. Jabbour C.J.C. et al. Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: A review and a research agenda. *The Science of The Total Environment*. 2020;725:138177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138177>
7. Rosa P. et al. Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*. 2019;58(6). <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1680896>
8. Machado C.G. et al. Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*. 2019;58(2). <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652777>
9. Ribeiro I. et al. Framework for Life Cycle Sustainability Assessment of Additive Manufacturing. *Sustainability*. 2020;12(3). <https://doi.org/10.3390/su12030929>
10. Asiimwe M.M., Kock I.H. An Analysis of the Extent to Which Industry 4.0 has been Considered in Sustainability or Socio-technical Transitions. *South African Journal of Industrial Engineering*. 2019;30(3):41–51. <https://doi.org/10.7166/30-3-2245>
11. Tirabeni L. et al. How Can Organisations and Business Models Lead to a More Sustainable Society? A Framework from a Systematic Review of the Industry 4.0. *Sustainability*. 2019;11(22). <https://doi.org/10.3390/su11226363>
12. Тумин В.М., Костромин П.А., Вихрова А.С. Зарубежная и отечественная практика управления устойчивым развитием промышленных предприятий на основе повышения информационной прозрачности ведения. *Российский технологический журнал*. 2016;1:71–85.
13. Национальный Регистр корпоративных нефинансовых отчетов. URL: https://rspp.ru/sustainable_development/registr (дата обращения: 24.01.2025)
14. ESG-рэнкинг Российских компаний промышленного сектора. *Национальное рейтинговое агентство*. URL: <https://www.ranational.ru/rankings?jsf=jet-engine&tax=metka-renkingi:1532> (дата обращения: 25.01.2025)
15. Опыт применения ИИ в промышленности в 2023 году. Национальный центр развития искусственного интеллекта при Правительстве Российской Федерации. URL: https://ai.gov.ru/knowledgebase/vnedrenie-ii/2023_opyt_primeneniya_ii_v_promyshlennosti_v_2023_godu_ncrri (дата обращения: 27.01.2025)
16. Нейронные сети в промышленном производстве. URL: <https://upperator.ru/industry> (дата обращения: 27.01.2025)

REFERENCES

1. Analytical Center under the Government of the Russian Federation. Ecology and economics: the trend towards decarbonization. *Byulleten' o*

- tekushchikh tendentsiyakh rossiiskoi ekonomiki*. 2020;66:18. (In Russ.). (accessed: 13.01.2025)
2. The Rio Declaration on Environment and Development. In: *Report of the United Nations Conference on Environment and Development*. 1992.151/26(I):3–7.
 3. UN General Assembly Resolution No. 70/1 dated September 25, 2015, "Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development". URL: <https://base.garant.ru/407358666> (accessed: 13.01.2025) (In Russ.).
 4. Geras'kina A.A., Seraya D.F. Prospects of sustainable development of the Russian industry: analysis and recommendations. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2023;13(9A):63–70. (In Russ.).
 5. Kuo T.C., Smith S. A systematic review of technologies involving eco-innovation for enterprises moving towards sustainability. *Journal of Cleaner Production*. 2018;192:207–220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.212>
 6. Jabbour C.J.C. et al. Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: A review and a research agenda. *The Science of The Total Environment*. 2020;725:138177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138177>
 7. Rosa P. et al. Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*. 2019;58(6). <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1680896>
 8. Machado C.G. et al. Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*. 2019;58(2). <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652777>
 9. Ribeiro I. et al. Framework for Life Cycle Sustainability Assessment of Additive Manufacturing. *Sustainability*. 2020;12(3). <https://doi.org/10.3390/su12030929>
 10. Asiimwe M.M., Kock I.H. An Analysis of the Extent to Which Industry 4.0 has been Considered in Sustainability or Socio-technical Transitions. *South African Journal of Industrial Engineering*. 2019;30(3):41–51. <https://doi.org/10.7166/30-3-2245>
 11. Tirabeni L. et al. How Can Organisations and Business Models Lead to a More Sustainable Society? A Framework from a Systematic Review of the Industry 4.0. *Sustainability*. 2019;11(22). <https://doi.org/10.3390/su11226363>
 12. Tumin V.M., Kostromin P.A., Vikhrova A.S. Foreign and domestic practice of managing the sustainable development of industrial enterprises based on increasing information transparency. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*. 2016;1:71–85. (In Russ.).
 13. National Register of Corporate Non-Financial Reports. URL: https://rspp.ru/sustainable_development/registr (accessed: 24.01.2025) (In Russ.).
 14. ESG-ranking of Russian companies in the industrial sector. *Natsional'noe reitingovoe agentstvo*. URL: <https://www.ra-national.ru/rankings?jsf=jet-engine&tax=metka-renkingi:1532> (accessed: 25.01.2025) (In Russ.).
 15. Experience of AI application in industry in 2023. National Center for the Development of Artificial Intelligence under the Government of the Russian Federation. URL: https://ai.gov.ru/knowledgebase/vnedrenie-ii/2023_opyt_prime-neniya_ii_v_promyshlennosti_v_2023_godu_ncrrii (accessed: 27.01.2025) (In Russ.).
 16. Neural networks in industrial production. URL: <https://upperator.ru/industry> (accessed: 27.01.2025) (In Russ.).
- Сведения об авторах**
Наталья Геннадьевна Жданова, старший преподаватель кафедры экономики и устойчивого развития бизнеса, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: NZhdanova-82@mail.ru
ORCID: 0009-0001-4722-2511
SPIN-код: 8545-8887
- Раиса Андреевна Садыкина**, преподаватель кафедры экономики и устойчивого развития бизнеса, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: sadykina_sibsiu@mail.ru
ORCID: 0009-0008-8846-8076
SPIN-код: 5254-5636
- Information about the authors:**
Natalia G. Zhdanova, Senior Lecturer at the Department of Economics and Sustainable Business Development, Siberian State Industrial University
E-mail: NZhdanova-82@mail.ru
ORCID: 0009-0001-4722-2511
SPIN-код: 8545-8887
- Raisa A. Sadykina**, Lecturer at the Department of Economics and Sustainable Business Development, Siberian State Industrial University
E-mail: sadykina_sibsiu@mail.ru
ORCID: 0009-0008-8846-8076
SPIN-код: 5254-5636
- Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare that there is no conflict of interest.*
- Поступила в редакцию 17.02.2025
 После доработки 25.02.2025
 Принята к публикации 03.03.2025
- Received 17.02.2025
 Revised 25.02.2025
 Accepted 03.03.2025

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

С 22 июня 2023 г. журнал «Вестник Сибирского государственного индустриального университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальностям:

1.3.8. *Физика конденсированного состояния (физико-математические, технические);*

2.6.1. *Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические);*

2.6.2. *Металлургия черных, цветных и редких металлов (технические);*

2.6.17. *Материаловедение (технические).*

В журнале публикуются оригинальные, ранее не публиковавшиеся статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера по следующим направлениям:

1. *Физика конденсированного состояния.*

2. *Металлургия и материаловедение.*

3. *Экономика. Управление. Финансы.*

К рукописи следует приложить рекомендацию соответствующей кафедры высшего учебного заведения, экспертное заключение, разрешение ректора или проректора высшего учебного заведения (для неучебного предприятия – руководителя или его заместителя) на опубликование результатов работ, выполненных в данном вузе (предприятии), авторское согласие.

В редакцию следует направлять материалы статьи в электронном виде и два экземпляра текста статьи на бумажном носителе. Для ускорения процесса рецензирования статей электронный вариант статьи и скан-копии сопроводительных документов рекомендуется направлять по электронной почте по адресу e-mail: vestnicsibgu@sibsiu.ru. При направлении материалов в редакцию необходимо указывать раздел, в котором статья будет опубликована.

Таблицы, библиографический список и подписуемый текст следует представлять на отдельных страницах. В рукописи необходимо сделать ссылки на таблицы, рисунки и литературные источники, приведенные в статье.

Иллюстрации нужно представлять отдельно от текста на носителе информации. Пояснительные надписи в иллюстрациях должны быть выполнены шрифтом Times New Roman Italic (греческие буквы – шрифтом Symbol Regular) размером 9. Тоновые изображения, размер которых не должен превышать 75 × 75 мм (фотографии и другие изображения, содержащие оттенки черного цвета), следует направлять в виде растровых графических файлов (форматов *.bmp, *.jpg, *.gif, *.tif) в цветовой шкале «оттенки серого» с разрешением не менее 300 dpi (точек на дюйм). Штриховые рисунки (графики, блок-схемы и т.д.) следует представлять в «черно-белой» шкале с разрешением не менее 600 dpi. На графиках не нужно наносить линии сетки, а экспериментальные или расчетные точки (маркеры) без крайней необходимости не «заливать» черным. Штриховые рисунки, созданные при помощи распространенных программ MS Excel, MS Visio и др., следует представлять в формате исходного приложения (*.xls, *.vsd и др.).

Шрифтовое оформление физических величин: латинские буквы в светлом курсивном начертании, русские и греческие – в светлом прямом. Числа и единицы измерения – в светлом прямом начертании. Особое внимание следует обратить на правильное изображение индексов и показателей степеней. Формулы набираются с помощью редакторов формул Equatn или Math Type, масштаб формул должен быть 100 %. Масштаб устанавливается в диалоговом окне «Формат объекта». В редакторе формул для латинских и греческих букв использовать стиль «Математический» («Math»), для русских – стиль

«Текст» («Text»). Размер задается стилем «Обычный» («Full»), для степеней и индексов – «Крупный индекс / Мелкий индекс» («Subscript / Sub-Subscript»). Недопустимо использовать стиль «Другой» («Other»).

Необходимо избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, графиках и тексте статьи. Объем статьи не должен превышать 18 – 20 страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала.

Рукопись должна быть тщательно выверена, подписана автором (при наличии нескольких авторов, число которых не должно превышать пяти, – всеми авторами); в конце рукописи указывают полное название высшего учебного заведения (предприятия) и кафедры, дату отправки рукописи, а также полные сведения о каждом авторе (Ф.И.О., место работы, должность, ученая степень, звание, служебный и домашний адреса с почтовыми индексами, телефон, e-mail, ORCID). Необходимо указать, с кем вести переписку.

Цитируемую в статье литературу следует давать общим списком в порядке упоминания в статье с обозначением ссылки в тексте порядковой цифрой. Перечень литературных источников рекомендуется не менее 20.

Библиографический список оформляют в соответствии с ГОСТ 7.0.100 – 2018: а) для книг – фамилии и инициалы авторов, полное название книги, номер тома, место издания, издательство и год издания, общее количество страниц; б) для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, полное название журнала, название статьи, год издания, номер тома, номер выпуска, страницы, занятые статьей; в) для статей из сборников – фамилии и инициалы авторов, название сборника, название статьи, место издания, издательство, год издания, кому принадлежит, номер или выпуск, страницы, занятые статьей.

Иностранные фамилии и термины следует давать в тексте в русской транскрипции, в библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводят в оригинальной транскрипции.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

К статье должны быть приложены аннотация объемом 200 – 250 слов, ключевые слова.

В статье необходимо привести на английском языке: название статьи, Ф.И.О. авторов, место их работы, аннотацию и ключевые слова.

Краткие сообщения должны иметь самостоятельное научное значение и характеризоваться новизной и оригинальностью. Они предназначены для публикации в основном аспирантских работ. Объем кратких сообщений не должен превышать двух страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, включая таблицы и библиографический список. Под заголовком в скобках следует указать, что это краткое сообщение. Допускается включение в краткое сообщение одного несложного рисунка, в этом случае текст должен быть уменьшен. Приводить в одном сообщении одновременно таблицу и рисунок не рекомендуется.

Количество авторов в кратком сообщении должно быть не более трех. Требования к оформлению рукописей и необходимой документации те же, что к оформлению статей.

Корректуры статей авторам, как правило, не посылают.

В случае возвращения статьи автору для исправления (или при сокращении) датой представления считается день получения окончательного текста.

Статьи, поступающие в редакцию, проходят гласную рецензию.

Статьи журнала индексируются в РИНЦ, представлены на сайтах <https://vestnik.sibsiu.ru/> и <https://www.sibsiu.ru> в разделе Наука и инновации (Периодические научные издания).

TO THE AUTHORS ATTENTION

On June 22, 2023 the journal, "Bulletin of Siberian State Industrial University" was included in the List of peer-reviewed scientific editions. The journal should publish the main scientific results of dissertations for the degrees of Candidates and Doctors of Sciences in following specialties:

1.3.8. *Condensed matter physics (physical and mathematical, engineering);*

2.6.1. *Metallurgy and heat treatment of metals and alloys (engineering);*

2.6.2. *Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals (engineering);*

2.6.17. *Materials science (engineering).*

The journal "Bulletin of the Siberian State Industrial University" received K2 category.

The journal publishes original, previously unpublished articles containing the most significant results of scientific and technical experimental research, as well as the results of problematic work in the following areas:

1. *Condensed matter physics;*
2. *Metallurgy and materials science;*
3. *Economics. Management. Finance.*

The paper should be accompanied by the recommendation of the relevant department of the higher education institution, expert opinion, permission of the rector or vice-rector of the higher education institution (for a non-academic enterprise – the head or his deputy) to publish the results of the work performed in this university (enterprise), author's consent.

The editorial office should receive the materials of the article in electronic form and two copies of the text of the article in hard copy. To speed up the review process, it is recommended to send the electronic version of the article and scanned copies of accompanying documents by e-mail to vestnicsibgiu@sibsiu.ru. You should indicate the section in which the article will be published before sending materials to the editorial office.

Tables, reference list, and captions should be presented on separate pages. You need to make references to tables, figures and references cited in the article.

Illustrations should be presented separately from the text. Explanatory inscriptions in illustrations should be made in Times New Roman Italic font size 9 (Greek letters – in Symbol Regular font). Gray-scale images, the size of which should not exceed 75 × 75 mm (photographs and other images containing shades of black), should be sent as raster graphic files (formats *.bmr, *.jpg, *.gif, *.tif) in the color scale "shades of gray" with a resolution of at least 300 dpi. Stroke drawings (graphs, flowcharts, etc.) should be presented in "black and white" scale with a resolution of at least 600 dpi. You do not need to draw grid lines on the graphs, and to "fill" black experimental or calculation points (markers) without absolute necessity. Stroke drawings created using common programs MS Excel, MS Visio, etc., should be presented in the format of the original application (*.xls, *.vsd, etc.).

Typography of physical quantities: Latin letters in light italic, Russian and Greek letters in light straight type. Numbers and units of measurement are in light-colored straight type. Particular attention should be paid to the correct representation of indexes and degree indicators. Formulas are typed with the help of formula editors' Equatn or Math Ture, the scale of formulas should be 100 %. The scale is set in the Format Object dialog box. In the formula editor, use the "Math" style for Latin and Greek letters, and the "Text" style for Russian letters. The size should be "Full", for degrees and indexes – "Subscript / Sub-Subscript". Do not use the "Other" style.

It is necessary to avoid repetition of the same data in tables, graphs and the text of the article. The volume of the article should not exceed 18 – 20 pages of text, printed in font 14 at one and a half intervals.

The manuscript should be carefully checked, signed by the author (if there are several authors, the number of which should not exceed five – by all authors). At the end of the manuscript indicate the full name of the higher education institution (enterprise) and department, the date of submission of the manuscript, as well as complete information about each author (full name, place of work, position, academic degree, title, office and home addresses with postal codes, telephone, e-mail, ORCID). It is necessary to indicate with whom to correspond.

References cited in the article should be given in a general list in the order of mentioning in the article, with the reference in the text indicated by a serial number. The list of literature sources is recommended no less than 20.

The references shall be arranged in accordance with GOST 7.0. 100 – 2018: a) for books – surnames and initials of authors, full title of the book, volume number, place of publication, publisher and year of publication, total number of pages; b) for journal articles - surnames and initials of authors, full title of the journal, title of the article, year of publication, volume number, issue number, pages covered by the article; c) for articles from collections – surnames and initials of authors, title of the collection, title of the article, place of publication, publisher, year of publication, to whom it belongs, number or issue, pages covered by the article.

Foreign names and terms should be given in the text in Russian transcription. In the references, the names of authors, full names of books and journals should be given in their original transcription.

References to unpublished works are not allowed.

The article should be accompanied by an abstract of 200 – 250 words and key words.

The title of the article, full name of the authors, place of their work, abstract and key words should be given in English at the of the article.

Short reports should have independent scientific value and be characterized by novelty and originality. These are mainly meant for the publication of postgraduate papers. Short reports should not exceed two pages of text, typed in 14-point font at one and a half intervals, including tables and bibliography. It should be indicated in brackets under the title that it is a short paper. You can include one simple figure in a brief message; in this case, the text should be reduced. We do not recommend including both a table and a figure in the same paper.

The number of authors in a short report should not exceed three. The requirements for the submission of manuscripts and required documentation are identical to those for the submission of articles. As a rule, corrections of articles are not forwarded to the authors.

If the article is returned to the author for correction (or in case of reduction), the date of submission is considered to be the day of receiving the final text.

Articles submitted to the editorial office are subject to public review.

The articles of the journal are indexed in the Russian Science and Technology Center (RSCI), presented on the websites <https://vestnik.sibsiu.ru/> and <https://www.sibsiu.ru> in the section Science and Innovations (Periodical Scientific Editions).

Над номером работали

Коновалов С.В., главный редактор

Запольская Е.М., ответственный секретарь

Темлянцева Е.Н., верстка

Олендаренко Е.В., менеджер по работе с клиентами

Безродная Е.А., администратор сайта