

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Научный журнал

**ВЕСТНИК**  
**Сибирского государственного**  
**индустриального университета**

**№ 4 (50), 2024**

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. 4 (50), 2024**

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. 433 М, тел. 8-3843-74-86-28  
[http: www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)  
e-mail: [vestnicsibgiu@sibsiu.ru](mailto: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](mailto: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 433 M, tel. 8-3843-74-86-28  
[http: www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)  
e-mail: [vestnicsibgiu@sibsiu.ru](mailto: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](mailto: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

25.12.2024 г.

Выход в свет

25.12.2024 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл. печ. л. 4,6.

Уч.-изд. л. 4,9.

Тираж 300 экз.

Заказ № 184.

Цена свободная

Signed to the press

25.12.2024

Coming out

25.12.2024

The paper size is 60×88 1/8.

Writing paper.

Offset printing.

Usl. pech. l. 4,6.

Uch.-ed. l. 4,9.

The circulation is 300 copies.

Order no. 184.

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**, 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

**Бурков Владимир Николаевич**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия

**Буркова Ирина Владимировна**, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, 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

**Захарова Александра Александровна**, д.т.н., доцент, профессор кафедры автоматизированных систем управления, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

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

**Зеркаль Сергей Михайлович**, д.т.н., профессор, профессор кафедры вычислительной техники, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

**Зимин Алексей Валерьевич**, д.т.н., заведующий кафедрой автоматизации и информационных систем, 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 Курмара 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

**Рыбенко Инна Анатольевна**, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

**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 Джамя Миллия Исламия, Центральный университет, г. Нью-Дели, Индия

**Смагин Валерий Иванович**, д.т.н., профессор, профессор кафедры прикладной математики института прикладной математики и компьютерных наук, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

**Стрижак Павел Александрович**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией теплообмена, 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 Уджа, Марокко

**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  
**Чехонадских Александр Васильевич**, д.т.н., доцент, профессор кафедры алгебры и математической логики, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, 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**, 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

**Burkov Vladimir Nikolaevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, V.A. Trapeznikov RAS, Moscow, Russia

**Burkova Irina Vladimirovna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov RAS, Moscow, 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

**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

**Zimin Aleksey Valerievich**, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Automation and Information Systems, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

**Zakharova Alexandra Alexandrovna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of ACS, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

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

**Panteleev 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

**Rybenko Inna Anatolyevna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

**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

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

**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

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

**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

- Кузьмин А.Д., Латухина Н.В., Полуэктова Н.А., Тишин П.Д., Услин Д.А., Шишкин И.А., Шишкина Д.А.** Влияние облучения на фотоэлектрические свойства структур с пористым кремнием.....10
- Саломов У.Р., Юлдашев Н.Х., Юлчиев И.И.** Особенности фотолюминесценции полупроводников типа GaAs, связанных с мелкими акцепторами в магнитном поле.....17
- Пашин А.В., Кудинов И.В., Кудинов В.А., Дубас Е.В., Ненашев М.В.** Математическая модель локально-неравновесной связанной динамической термоупругости....28
- Юницкий А.Э., Цырлин М.И.** Математическое моделирование процесса плазменного напыления покрытий на основе порошковых полимерных материалов.....37
- Шлярова Ю.А., Серебрякова А.А., Шляров В.В., Прудников А.Н., Загуляев Д.В.** Изменение микротвердости и фазового состава сплава АК15, подвергнутого электровзрывному легированию и обработке электронным пучком.....46

### МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Абабков Н.В.** Эффект равенства временных интервалов от устойчивой локализации деформации до разрушения образцов из конструкционных и теплоустойчивых сталей.....55
- Кудряшова М.О., Петров С.С., Юдин П.Е., Ежов А.Ю., Бондарева О.С., Мельников А.А.** Исследование влияния наводороживания на разрушения и механические характеристики титанового сплава.....63
- Комаров Д.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А.** Модификация поверхностного сплава ХН65ВМТЮ методом импульсной электронно-пучковой обработки.....72
- Запольский А.С., Темлянцев М.В.** Способы повышения стойкости футеровок разливочных ковшей ферросплавного производства.....83
- Строкина И.В., Маринич В.С., Трофимова А.Д.** Оценка перспектив развития металлургических мини-заводов.....92
- Протопопов Е.В., Уманский А.А., Беле-**

## CONTENTS

### CONDENSED MATTER PHYSICS

- Latukhina N.V., Poluektova N.A., Tishin P.D., Uslin D.A., Shishkin I.A., Shishkina D.A.** Influence of radiation on photovoltaic properties of structures with porous silicon.....10
- Salomov U.R., Yuldashev N.Kh., Yulchiev I.I.** Features of photoluminescence of GaAs-type semiconductors associated with shallow acceptors in a magnetic field.....17
- Pashin A.V., Kudinov I.V., Kudinov V.A., Dubas E.V., Nenashev M.V.** Mathematical model of locally nonequilibrium coupled dynamic thermoelasticity.....28
- Unitsky A.E., Tsyrlin M.I.** Math modeling of process of plasma spraying of coatings based on powder polymer materials.....37
- Shliarova Yu.A., Serebryakova A.A., Shlyarov V.B., Prudnikov A.N., Zaguliaev D.V.** Changes in microhardness and phase composition of AK15 alloy subjected to electroexplosive alloying and electron beam processing.....46

### METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

- Ababkov N.V.** Effect of equality of time intervals from sustainable localization of deformation to fracture of samples from structural and heat-resistant steel.....55
- Kudryashova M.O., Petrov S.S., Yudin P.E., Ezhov A.Yu., Bondareva O.S., Mel'nikov A.A.** Influence of hydrogen absorption on destruction and mechanical characteristics of titanium alloy.....63
- Komarov D.V., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A.** Modification of the surface layer of the ХН65ВМТЮ alloy by the method of pulse electron beam treatment.....72
- Zapol'skii A.S., Temlyantsev M.V.** Approaches to increase the durability of lining ladles of ferroalloy production.....83
- Strokina I.V., Marinich V.S., Trofimova A.D.** Assessment of the prospects for the development of metallurgical mini-factories...92
- Protopopov E.V., Umansky A.A., Bele-**

<b>нецкий Е.А., Фатьянов С.С.</b> Высокотемпературное моделирование процессов тепло-массообмена при комбинированной продувке конверторной ванны.....100	<b>netsky E.A., Fatyanov S.S.</b> High-temperature modeling of heat and mass transfer processes in combined purging.....100
<b>Уманский А.А., Протопопов Е.В., Полежаев С.А.</b> Перспективы использования минерально-сырьевой базы Кузбасса при производстве магнезиальных флюсов для конвертерной плавки.....110	<b>Umanskii A.A., Protopopov E.V., Polezhaev S.A.</b> Prospects for the use of the Kuzbass mineral resource base in the production of magnesia fluxes for converter melting.....110
<b>Бондарева О.С.</b> Исследование структуры поверхностных дефектов цинкового покрытия, образующихся в расплаве Технигальва...120	<b>Bondareva O.S.</b> Study of the structure of zinc coating surface defects formed in the Technigalva melt.....120
<b>Башенко Л.П., Ефимов М.О., Шлярова Ю.А., Громов В.Е., Коновалов С.В.</b> Структура, фазовый состав и свойства высокоэнтропийного сплава AlCrFeCoNi, облученного импульсным электронным пучком.....129	<b>Bashchenko L.P., Efimov M.O., Shlyarova Yu.A., Gromov V.E., Kononov S.V.</b> Structure, phase composition and properties of high-entropy AlCrFeCoNi alloy irradiated with a pulsed electron beam.....129

## РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

<b>Горлатова Т.О., Петрова Т.В.</b> Отличительные особенности персонала угледобывающих предприятий Кузбасса.....137
<b>Иванова Е.В., Касацкая А.А.</b> Совершенствование системы управления оборотным капиталом и ликвидностью малых предприятий отрасли научных исследований и разработок.....147
<b>К 70-летию Владимира Дмитриевича Сарычева</b> .....160
<b>Памяти В.Я. Целлермаера</b> .....161
<b>К сведению авторов</b> .....162

## REGIONAL AND SECTORAL ECONOMY

<b>Gorlatova T.O., Petrova T.V.</b> Distinctive features of the personnel of Kuzbass coal mining enterprises.....137
<b>Ivanova E.V., Kasatskaya A.A.</b> Improvement of the working capital and liquidity management system of small enterprises in the field of scientific research and development.....147
<b>On the 70th anniversary of Vladimir Dmitrievich Sarychev</b> .....160
<b>In memory of V.J. Tsellermaera</b> .....161
<b>To the authors attention</b> .....163

*Оригинальная статья*

УДК 537.87

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-10-16

## ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР С ПОРИСТЫМ КРЕМНИЕМ

© 2024 г. А. Д. Кузьмин, **Н. В. Латухина**, Н. А. Полуэктова, П. Д. Тишин, Д. А. Услин, И. А. Шишкин, Д. А. Шишкина

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

**Аннотация.** Актуальность работы обоснована стремительным ростом развития космической отрасли в последние годы, в частности, развитием технологии солнечных элементов, предназначенных для питания летательных аппаратов на околоземной орбите или за ее пределами. Важным является изучение вопроса деградации солнечных элементов на основе пористого кремния. Он зарекомендовал себя как более стойкая к облучению структура. Приведен сравнительный анализ вольтамперных характеристик фоточувствительных структур на базе пористого кремния с *p-n* переходом с покрытием фторида эрбия и без него до и после облучения электронами с энергией 6 МэВ, а также спустя три месяца нахождения на хранении для фиксации изменений, которые могут происходить с течением времени. Структуры получены методом электрохимического травления в спиртовом растворе плавиковой кислоты методом двухступенчатого металл-стимулированного химического травления. Полученные результаты показывают, что итог воздействия излучения электронами на фоточувствительные структуры зависит как от параметров самой структуры, так и от параметров излучения. Облучение электронами инициирует в структурах процессы образования легирующих центров и центров рекомбинации. Показано, что облучение структур приводит к конкурирующим процессам в пористых структурах (увеличение носителей заряда, образование радиационных дефектов типа пар Френкеля). Нанесенная тонкая пленка фторида эрбия на пористый слой оказывает заметное положительное влияние на характеристики и параметры структур благодаря пассивирующим свойствам этого материала.

**Ключевые слова:** солнечные элементы, фоточувствительный преобразователь, радиационная стойкость, радиационные дефекты, пористый кремний

**Для цитирования:** Кузьмин А.Д., Латухина Н.В., Полуэктова Н.А., Тишин П.Д., Услин Д.А., Шишкин И.А., Шишкина Д.А. Влияние облучения на фотоэлектрические свойства структур с пористым кремнием. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):10–16. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-10-16](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-10-16)

*Original article*

## INFLUENCE OF RADIATION ON PHOTOVOLTAIC PROPERTIES OF STRUCTURES WITH POROUS SILICON

© 2024 A. D. Kuzmin, **N. V. Latukhina**, N. A. Poluektova, P. D. Tishin, D. A. Uslyn, I. A. Shishkin, D. A. Shishkina

Samara National Research University (34 Moskovskoe shosse str., Samara, 443086, Russian Federation)

**Abstract.** The relevance of the work is justified by the rapid growth in the development of the space industry in recent years, in particular, the development of solar cell technology designed to power aircraft in near-Earth orbit or beyond. It is important to study the degradation of porous silicon-based solar cells. It has proven itself to be a

more radiation-resistant structure. A comparative analysis of the current-voltage characteristics of photosensitive structures based on porous silicon with a p-n junction coated with and without erbium fluoride is presented before and after irradiation with electrons with an energy of 6 MeV, as well as after three months of storage to record changes that may occur over time. The structures were obtained by electrochemical etching in an alcoholic solution of hydrofluoric acid by two-stage metal-stimulated chemical etching. The results obtained show that the result of the effect of electron radiation on photosensitive structures depends both on the parameters of the structure itself and on the radiation parameters. Electron irradiation initiates the formation of alloying centers and recombination centers in structures. It is shown that irradiation of structures leads to competing processes in porous structures (an increase in charge carriers, the formation of radiation defects such as Frenkel pairs). The applied thin film of erbium fluoride on the porous layer has a noticeable positive effect on the characteristics and parameters of structures due to the passivating properties of this material.

**Keywords:** solar cells, photosensitive transducer, radiation resistance, radiation defects, porous silicon

**For citation:** Latukhina N.V., Poluektova N.A., Tishin P.D., Uslin D.A., Shishkin I.A., Shishkina D.A. Influence of radiation on photovoltaic properties of structures with porous silicon. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):10–16. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-10-16](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-10-16)

### Введение

Пористый кремний (ПК) показал себя как перспективный материал для различных областей оптоэлектроники [1; 2]. Изучение деградации структур на основе пористого кремния под действием ионизирующего излучения является крайне актуальной задачей, так как эти структуры имеют большую перспективу для применения в солнечных элементах [3; 4], в том числе они предназначены для работы в условиях космического пространства [5]. Пористая поверхность имеет низкий коэффициент отражения, поэтому слой пористого кремния используется как антиотражающее покрытие для солнечных элементов [7; 8], а наличие нанокристаллов на стенках пор расширяет спектральный диапазон fotocувствительности структур в коротковолновую область [9]. Высокая пористость обуславливает уникальные свойства ПК, к которым относится значительная радиационная стойкость [10]. Проведены исследования влияния на свойства пористого кремния рентгеновского излучения [11], гамма-излучения [12], облучения электронами [13], ионами ксенона и аргона [14], которые показывают более высокую устойчивость ПК к этим воздействиям по сравнению с монокристаллическим кремнием. Поскольку на эти процессы могут накладываться процессы естественного старения, их исследование представляет практический интерес [15 – 17]. Модифицирование поверхности ПК [18], а также использование специальных покрытий позволяют увеличить его устойчивость к деградационным процессам [19; 20].

В настоящей работе проводили исследования деградации fotocувствительных структур двух

типов: с пористым слоем, изготовленным различными методами; с пористым слоем и покрытием из фторида эрбия ( $\text{ErF}_3$ ).

### Методы и принципы исследования

Структуру с пористым слоем получали на пластинах монокристаллического кремния *p*-типа проводимости с полированной или текстурированной поверхностями.

Для получения пористого кремния применяли два метода. Первую группу изготавливали методом электрохимического травления в спиртовом растворе плавиковой кислоты при плотности тока  $10 \text{ mA/cm}^2$  и времени травления 10 мин. При этом способе травления поры образуются преимущественно в углублениях рельефа на стыках пирамид (рис. 1, *a*) [21]. Вторую группу образцов получали двухступенчатым металл-стимулированным химическим травлением (МСХТ), в котором катализатором служили наночастицы серебра. Удаление частиц металла с поверхности осуществляли с помощью азотной кислоты. При таком травлении растворению подвергаются и стенки пирамид (рис. 1, *b*).

Для получения fotocувствительных структур на образцах формировался *p-n*-переход диффузией фосфора из пленки фосфорного диффузанта для *n*-типа на пористом слое и борного диффузанта с тыльной стороны для *p*-типа. Контакты из алюминия и покрытия из фторида эрбия изготавливали методом термического испарения в вакууме. Фторид эрбия наносили на часть поверхности пористого слоя методом термического испарения в вакууме. Схематичное изображение образца с контактами и покрытием приведено на рис. 1, *в*.

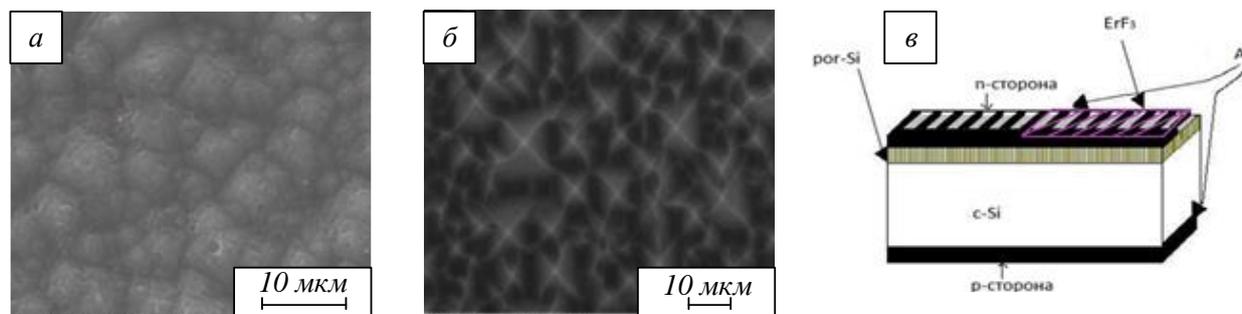


Рис. 1. РЭМ-изображение текстурированной поверхности с пористым слоем, изготовленным методом МСХТ (а) и электрохимическим травлением (б); схематичное изображение структуры с *p-n*-переходом, контактами и покрытием (в)  
 Fig. 1. SEM image of a textured surface with a porous layer produced by MSCE (a) and electrochemical etching (b); schematic representation of a structure with a *p-n* junction, contacts and coating (c)

Облучение электронами с энергией 6 МэВ проводили на линейном ускорителе TrueBeam STX. Образцы получили дозу облучения от 60 до 120 Гр. Измеряли вольтамперные характеристики (ВАХ) до и после облучения при освещенности имитатором солнечного излучения, мощность излучения на поверхности образца составляла 300 Вт/м<sup>2</sup>.

Облучение структур с пористым слоем или кремниевыми нанонитями проводили с помощью линейного ускорителя фирмы Varian. На экспериментальные образцы, расположенные на расстоянии 5 – 7 см от крайней кромки выравнивающего аппликатора из сплава Вуда, попадали электроны, энергия которых составляла 6 МэВ, скорость дозы выдачи составляла 1000 МЕ/мин (мониторные единицы/мин), время облучения – 20 мин. Размер статического терапевтического поля, формируемого многолепестковым коллиматором, составлял от 0,5 × 0,5 см до 30 × 30 см.

Измерения вольтамперных характеристик проводили с помощью стенда KEITHLEY 2450 и повторили через три и шесть месяцев после облучения.

### Основные результаты

Измерения ВАХ показали, что облучение электронами оказывает на образцы разнонаправленное влияние; прослеживается зависимость изменений от пористости структуры (чем больше пористость, тем заметнее изменения как в худшую, так и в лучшую сторону). На структуры с пористым слоем без покрытия облучение электронами оказывает незначительное отрицательное влияние. Для структур с покрытием действие облучения может приводить как к увеличению (на 40 – 50 %) тока короткого замыкания, так и к его уменьшению примерно на ту же величину. На рис. 2 приведены ВАХ одного из образцов с пористым слоем, полученным электрохимическим травлением. На рассматриваемые структуры облучение оказало положительное влияние. Измерены ВАХ до и после облучения, и спустя три месяца после облучения. При-

ведены ВАХ для образцов с покрытием из фторида эрбия и без него.

Разнонаправленное влияние облучения можно объяснить конкурирующими процессами в пористом слое. С одной стороны, облучение электронами увеличивает количество свободных носителей заряда, что приводит к увеличению тока. С другой стороны, под воздействием электронов в кремнии возможно образование радиационных дефектов типа пар Френкеля (вакансия и междоузельный ион), которые служат рекомбинационными центрами для носителей заряда и приводят к уменьшению тока короткого замыкания. Суммарное действие этих противоположных факторов проявляется по-разному для образцов с разным типом исходной поверхности и пористостью.

Подтверждением наличия этих эффектов могут служить ВАХ образцов, полученных МСХТ, демонстрирующие зависимость тока от полученной дозы облучения (рис. 3). У образца, который облучался в течение 10 мин, ток вдвое уменьшился, а у образца со временем облучения 20 мин – увеличился почти в пять раз, это можно объяснить накоплением свободных носителей заряда.

В образцах с покрытием большее влияние на ВАХ оказывают процессы, протекающие в самом покрытии и на границе раздела пористого слоя с пленкой фторида эрбия. Нанесение покрытия из фторида эрбия на пористый слой оказывает заметное положительное влияние на характеристики и параметры образцов благодаря пассивирующим свойствам этих материалов. Ток короткого замыкания и фактор заполнения ВАХ возрастают в несколько раз. Уменьшение тока короткого замыкания после облучения электронами у образцов с покрытием можно объяснить депассивацией границы раздела и увеличением количества рекомбинационных центров.

Благодаря чрезвычайно развитой поверхности (до 1000 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>) пористого кремния с течением времени происходит уменьшение концентрации как легирующих, так и рекомбинацион-

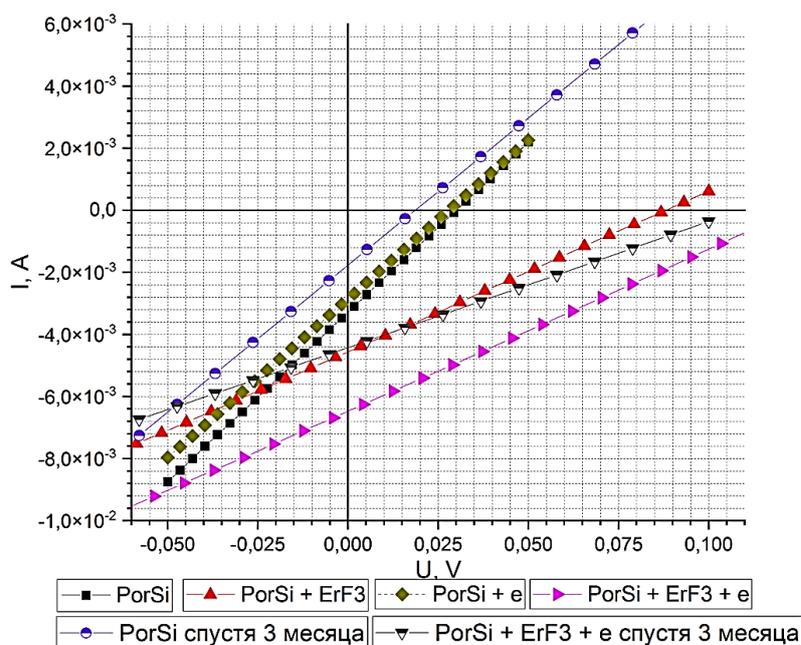


Рис. 2. ВАХ образца с пористым кремнием и покрытием  $\text{ErF}_3$  до и после облучения электронами, спустя три месяца после воздействия электронами

Fig. 2. Current-voltage characteristics of a sample with porous silicon and  $\text{ErF}_3$  coating before and after electron irradiation; 3 months after exposure to electrons

ных центров за счет присутствия на стенках пор нанокристаллов, границы которых могут выступать как область эффективного стока с последующей аннигиляцией радиационных дефектов. Для многих структур характеристики с течением времени возвращаются к исходным значениям. На эти процессы накладывается процесс естественного старения кремния, связанный с образованием оксидов кремния в порах. Его эффект менее заметен для структур с покрытием, так как в этом случае поверхность пористого слоя пассивирована фторидом эрбия.

### Выводы

Результат воздействия излучения на фоточувствительные структуры зависит как от структуры, так и от излучения. Облучение электронами инициирует в структурах процессы образования легирующих центров и центров рекомбинации. Суммарное действие этих факторов определяет результат воздействия облучения на структуру, который может выражаться как в увеличении, так и в уменьшении фототока в зависимости от преобладания того или иного фактора. При увеличении времени облучения эффект радиационного леги-

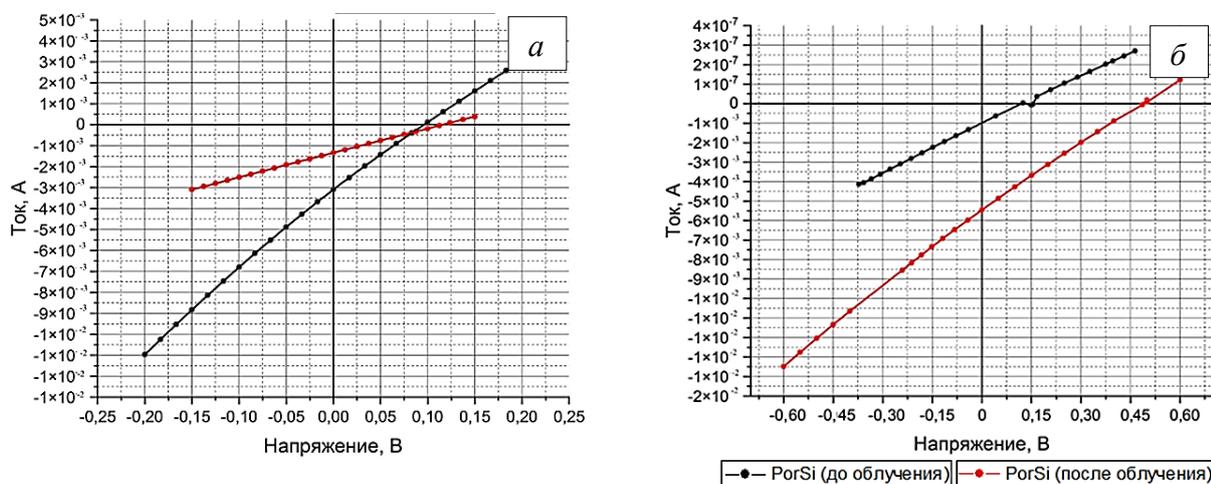


Рис. 3. ВАХ образцов, изготовленных МСХТ до и после облучения в течение 10 (а) и 20 мин (б)

Fig. 3. Current-voltage characteristics of samples prepared by MSCE before and after irradiation for 10 (a) and 20 minutes (б)

рования оказывается преобладающим. Чем больше пористость структуры, тем заметнее результат воздействия, так как развитая свободная поверхность пористого кремния обеспечивает ускоренную рекомбинацию радиационных эффектов. Покрытие из фторида эрбия на пористом слое оказывает заметное положительное влияние на характеристики и параметры структур благодаря пассивирующим свойствам этого материала. Преобладающим в структурах становится эффект радиационного легирования, поскольку рекомбинационные центры на поверхности пассивированы ионами эрбия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Latukhina N.V., Lizunkova D.A., Rogozhina G.A., Zhiltsov I.M., Stepykhova M.V., Cherpunov V.I. Multilayer nanostructures based on porous silicon for optoelectronics. *Photonics*. 2018;12 (5(73)):508–511.
- Хамзин Э.Х., Нестеров Д.А., Латухина Н.В. и др. Пористый кремний допированный эрбием для оптоэлектрических приложений. В кн.: *Международная конференция. Физика*. Санкт-Петербург, 2023:160–161.
- Latukhina N.V., Shishkina D.A., Rogozhina G.A. etc. Multilayer structure based porous silicon for solar cells. *AIP Conference Proceedings*. 2020;2276.
- Latukhina N.V., Lizunkova D.A., Rogozhina G.A., Shishkin I.A. Multilayer structure based on porous silicon for solar cells. In: *Proceedings of International Conference on Advanced Materials 6th and 7th March*, 2019. 2019:169–172.
- Latukhina N., Rogozin A., G. Puzyrnaya, Lizunkova D., Gurtov A., Ivkov S. Efficient Silicon Solar Cells for Space and Ground-Based Aircraft. *Procedia Engineering*. 2015;104 (31):157–161.
- Shishkin I.A., Lizunkova D.A., Latukhina N.V. Simulation of current-voltage and power-voltage characteristics of «space» porous silicon solar cells. In: *6th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures*, 2019:299–300.
- Диханбаев К.К., Икрамова С.Б., Мырзалы Е.Б., Жайлыбаев И.Т., Тереахмет С. Солнечный элемент с покрытием из мультикристаллического пористого кремния. *Новости науки Казахстана*. 2022;1(152):71–77. <http://doi.org/10.53939/1560-5655.2022-1-71>
- Hyukyong Kwon, Jaedoo Lee, Minjeong Kim, and Soohong Lee. Investigation of Antireflective Porous Silicon Coating for Solar Cells. In: *International Scholarly Research Network ISRN Nanotechnology*. 2011;716409. <http://doi.org/10.5402/2011/716409>
- Кирсанов Н.Ю., Латухина Н.В., Лизункова Д.А., Рогожина Г.А., Степихова М.В. Многослойные фоточувствительные структуры на основе пористого кремния и соединений редкоземельных элементов: исследования спектральных характеристик. *ФТП*. 2017;51 (3):367–371.
- Ушаков В.В. и др. Радиационная стойкость пористого кремния. *ФТП*. 1997;31(9): 1126–1129. <http://doi.org/10.1134/1.1187143>
- Ерофеев А.С. Латухина Н.В. Деградиционные процессы в пористом кремнии. *Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета*. 2020;(16):267–272.
- Белобровая О.Я., Галушка В.В., Исмаилова В.С., Полянская В.П., Сидоров В.И., Терин Д.В., Машков А.А. Влияние малых доз гамма-излучения на оптические свойства наноструктурированного кремния, полученного методом металл-стимулированного химического травления in situ. *Известия Саратовского университета. Нов. сер. Сер. Физика*. 2020;20(4):288–298. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-4-288-298>
- Алиев Б.А. Влияние электронного облучения на спектр фотолюминесценции пористого кремния. *Вестник Карагандинского государственного университета. Серия Физика*. 2010;59(3):4–7.
- Балакшин Ю.В., Кожемяко А.В., Евсеев А.П., Миннебаев Д.К., Емад М.Е. Влияние параметров облучения ионами ксенона и аргона на дефектообразование в кремнии. *ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2020;3:23–29.
- Леньшин А.С., Кашкаров В.М., Туришев С.Ю., Смирнов М.С., Домашевская Э.П. Влияние естественного старения на фотолюминесценцию пористого кремния. *Письма в ЖТФ*. 2011;37(17):1–8.
- Tishin P.D., Shishkina D.A., Shishkin I.A. etc. Investigation of degradation characteristics of photosensitive structures with porous silicon. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2022;15(3.3):82–85. <https://doi.org/10.18721/JPM.153.315>
- Услин Д.А., Латухина Н.В. Анализ процессов деградации солнечных элементов на основе пористого кремния. *Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета*. 2021;(1(18)):174–176.
- Smerdov R.S., Spivak Yu.M., Moshnikov V.A. Nanostructures based on functionalized porous silicon for promising solar energy systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1400:055014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/5/055014>

19. Латухина Н.В. и др. Влияние покрытий, содержащих ионы РЗЭ, на фотоэлектрические характеристики структур на основе пористого кремния. *Автоматрия*. 2022;58(6):90–97. <http://dx.doi.org/10.15372/AUT20220611>
20. Latukhina N.V., Nesterov D.A., Poluektova N.A. etc. Effect of Rare Earth Coatings on Photoelectric Characteristics of Porous Silicon Structures. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2022;58(6(6)):626–632.
21. Shishkin I.A., Shishkina D.A., Latukhina N.V. The process of pore formation on a textured silicon substrate during electrochemical etching: 3D model. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1745(1).
9. Kirsanov N.Yu., Latukhina N.V., Lizunkova D.A., Rogozhina G.A., Ste-pikhova M.V. Multilayer photosensitive structures based on porous silicon and compounds of rare earth elements: studies of spectral characteristics. *FTP*. 2017;51(3):367–371. (In Russ.).
10. Ushakov V.V. etc. Radiation resistance of porous silicon. *FTP*. 1997;31(9):1126–1129. (In Russ.). <http://doi.org/10.1134/1.1187143>
11. Erofeev A.S. Latukhina N.V. Degradation processes in porous silicon. *Vestnik molodykh uchenykh i spetsialistov Samarskogo universiteta*. 2020;(16):267–272. (In Russ.).
12. Belobrovaya O.Ya., Galushka V.V., Ismailova V.S., Polyanskaya V.P., Sidorov V.I., Terin D.V., Mashkov A.A. The effect of low doses of gamma radiation on the optical properties of nanostructured silicon obtained by metal-stimulated chemical etching in situ. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Nov. ser. Ser. Fizika*. 2020;20(4):288–298. (In Russ.). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-4-288-298>

## REFERENCES

1. Latukhina N.V., Lizunkova D.A., Rogozhina G.A., Zhiltsov I.M., Stepykhova M.V., Chepurnov V.I. Multilayer nanostructures based on porous silicon for optoelectronics. *Photonics*. 2018; 12(5(73)):508–511.
2. Khamzin E.Kh., Nesterov D.A., Latukhina N.V. etc. Porous silicon doped with erbium for optoelectric applications. In: *International Conference of Physics*. St. Petersburg, 2023:160–161. (In Russ.).
3. Latukhina N.V., Shishkina D.A., Rogozhina G.A. etc. Multilayer structure based porous silicon for solar cells. *AIP Conference Proceedings*. 2020;2276.
4. Latukhina N.V., Lizunkova D.A., Rogozhina G.A., Shishkin I.A. Multilayer structure based on porous silicon for solar cells. In: *Proceedings of International Conference on Advanced Materials 6th and 7th March, 2019*. 2019:169–172.
5. Latukhina N., Rogozin A., G. Puzymaya, Lizunkova D., Gurtov A., Ivkov S. Efficient Silicon Solar Cells for Space and Ground-Based Aircraft. *Procedia Engineering*. 2015;104(31):157–161.
6. Shishkin I.A., Lizunkova D.A., Latukhina N.V. Simulation of current-voltage and power-voltage characteristics of «space» porous silicon solar cells. In: *6th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, 2019*:299–300
7. Dikhanbaev K.K., Ikramova S.B., Myrzaly E.B., Zhailybaev I.T., Te-reakhmet S. A solar cell coated with multicrystalline porous silicon. *Novosti nauki Kazakhstana*. 2022;1(152): 71–77. (In Russ.). <http://doi.org/10.53939/1560-5655-2022-1-71>
8. Hyukyong Kwon, Jaedoo Lee, Minjeong Kim, and Soohong Lee. Investigation of Antireflective Porous Silicon Coating for Solar Cells. In: *International Scholarly Research Network ISRN Nanotechnology*. 2011;716409. <http://doi.org/10.5402/2011/716409>
13. Aliev B.A. The effect of electron irradiation on the photoluminescence spectrum of porous silicon. *Vestnik Karagandinskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Fizika*. 2010;59(3):4–7. (In Russ.).
14. Balakshin Yu.V., Kozhemyako A.V., Evseev A.P., Minnebaev D.K., Emad M.E. Influence of parameters of irradiation with xenon and argon ions on defect formation in silicon. *VMU. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*. 2020;3:23–29. (In Russ.).
15. Len'shin A.S., Kashkarov V.M., Turishchev S.Yu., Smirnov M.S., Domashevskaya E.P. The effect of natural aging on photoluminescence of porous silicon. *Pis'ma v ZhTF*. 2011;37(17):1–8. (In Russ.).
16. Tishin P.D., Shishkina D.A., Shishkin I.A. etc. Investigation of degradation characteristics of photosensitive structures with porous silicon. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2022; 15(3.3):82–85. <https://doi.org/10.18721/JPM.153.315>
17. Uslyn D.A., Latukhina N.V. Analysis of the degradation processes of solar cells based on porous silicon. *Vestnik molodykh uchenykh i spetsialistov Samarskogo universiteta*. 2021; (1(18)):174–176. (In Russ.).
18. Smerdov R.S., Spivak Yu.M, Moshnikov V.A. Nanostructures based on functionalized porous silicon for promising solar energy systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1400:055014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/5/055014>

19. Latukhina N.V. etc. The effect of coatings containing REE ions on the photovoltaic characteristics of structures based on porous silicon. *Avtometriya*. 2022;58(6):90–97. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.15372/AUT20220611>
20. Latukhina N.V., Nesterov D.A., Poluektova N.A. etc. Effect of Rare Earth Coatings on Photoelectric Characteristics of Porous Silicon Structures. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2022;58(6(6)):626–632.
21. Shishkin I.A., Shishkina D.A., Latukhina N.V. The process of pore formation on a textured silicon substrate during electrochemical etching: 3D model. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1745(1):

**Сведения об авторах**

**Андрей Дмитриевич Кузьмин**, студент, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
*E-mail*: gucul99@gmail.com

**Наталья Виленовна Латухина**, к.т.н., доцент кафедры физики твердого тела и неравновесных систем, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
*E-mail*: natalat@yandex.ru  
*ORCID*: 0000-0003-2651-0562  
*SPIN-код*: 8643-8020

**Наталья Алексеевна Полуэктова**, аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
*E-mail*: natapolivekt37@gmail.com  
*ORCID*: 0000-0003-4189-6192  
*SPIN-код*: 5791-7785

**Павел Дмитриевич Тишин**, аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
*E-mail*: tishin.pavel1999@gmail.com  
*ORCID*: 0000-0002-9420-1852  
*SPIN-код*: 7729-7454

**Дмитрий Андреевич Услин**, студент, учебный мастер кафедры физики твердого тела и неравновесных систем, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
*E-mail*: uslin720@gmail.com  
*ORCID*: 0009-0000-7430-7265  
*SPIN-код*: 6350-0740

**Дарья Александровна Шишкина**, к.ф.-м.н., доцент кафедры нанотехнологий, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
*E-mail*: daria.lizunkova@yandex.ru  
*ORCID*: 0000-0003-4118-1429  
*SPIN-код*: 5722-5240

**Иван Александрович Шишкин**, аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
*E-mail*: shishkinivan9@gmail.com  
*ORCID*: 0000-0002-8413-9661  
*SPIN-код*: 2233-8550

**Information about the authors**

**Andrey D. Kuzmin**, student, Samara National Research University  
*E-mail*: gucul99@gmail.com

**Natalia V. Latukhina**, candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Solid State Physics and Nonequilibrium Systems, Samara National Research University  
*E-mail*: natalat@yandex.ru,  
*ORCID*: 0000-0003-2651-0562  
*SPIN-код*: 8643-8020

**Natalia A. Poluektova**, graduate student, Samara National Research University  
*E-mail*: natapolivekt37@gmail.com  
*ORCID*: 0000-0003-4189-6192  
*SPIN-код*: 5791-7785

**Pavel D. Tishin**, graduate student, Samara National Research University  
*E-mail*: tishin.pavel1999@gmail.com  
*ORCID*: 0000-0002-9420-1852  
*SPIN-код*: 7729-7454

**Dmitry A. Uslyn**, student, teaching master of the Department of Solid State Physics and Nonequilibrium Systems, Samara National Research University  
*E-mail*: uslin720@gmail.com,  
*ORCID*: 0009-0000-7430-7265  
*SPIN-код*: 6350-0740

**Daria A. Shishkina**, candidate of technical sciences, associate professor of the Department of nanoengineering, Samara National Research University  
*E-mail*: daria.lizunkova@yandex.ru  
*ORCID*: 0000-0003-4118-1429  
*SPIN-код*: 5722-5240

**Ivan A. Shishkin**, graduate student, Samara National Research University  
*E-mail*: shishkinivan9@gmail.com  
*ORCID*: 0000-0002-8413-9661  
*SPIN-код*: 2233-8550

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

Поступила в редакцию 13.05.2024  
После доработки 11.06.2024  
Принята к публикации 24.06.2024

Received 13.05.2024  
Revised 11.06.2024  
Accepted 24.06.2024

**Оригинальная статья**

УДК 538;958;975

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-17-27

**ОСОБЕННОСТИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ТИПА GaAs, СВЯЗАННЫХ С МЕЛКИМИ АКЦЕПТОРАМИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

© 2024 г. У. Р. Саломов, Н. Х. Юлдашев, И. И. Юлчиев

Ферганский политехнический институт (Республика Узбекистан, 150107, Фергана, ул. Фергана, 86)

**Аннотация.** Методом инвариантов Пикуса и Бира получены общие выражения для полной интенсивности  $I$  и степени циркулярной поляризации  $P_{\text{цирк}}$  фотолюминесценции полупроводников типа GaAs в продольном магнитном поле  $H$  с участием мелких акцепторных уровней. Проанализированы частные случаи в зависимости от значения и направления напряженности магнитного поля, а также от знака зеемановских констант  $g$ -фактора акцептора  $g_1$ ,  $g_2$  и электрона зоны проводимости  $g_e$ . В случае сильного магнитного поля  $H // [100]$ ,  $[111]$ ,  $[110]$  выполнен численный расчет угловой зависимости величин  $I$  и  $P_{\text{цирк}}$  для некоторых критических значений отношения  $g_2/g_1$ , при которых  $P_{\text{цирк}}$  обнаруживает резкую анизотропию в пределах от  $-100$  до  $+100$  %, а интенсивность излучения кристалла вдоль магнитного поля стремится к минимальному значению. Показано, что при слабом магнитном поле существует угловая зависимость для полной интенсивности, однако она не проявляется в степени поляризации излучения. В случае сильного магнитного поля характер угловых зависимостей  $I(\theta)$ ,  $P_{\text{цирк}}(\theta)$  определяется знаком отношения  $g$ -факторов  $g_e/g_1$  и  $g_2/g_1$ . Экспериментальное изучение зависимостей интенсивности и степени поляризации люминесценции в магнитном поле, обусловленной оптическим переходом свободных электронов на уровень мелкого акцептора, от ориентации вектора  $H$  в кристалле позволяет найти значения констант  $g_1$  и  $g_2$ , а также установить некоторые характерные особенности излучения.

**Ключевые слова:** полупроводник, рекомбинационное излучение, мелкий акцепторный центр, магнитное поле, зеемановское расщепление,  $g$ -факторы, анизотропия, циркулярная поляризация, интенсивность

**Для цитирования:** Саломов У.Р., Юлдашев Н.Х., Юлчиев И.И. Особенности фотолюминесценции полупроводников типа GaAs, связанных с мелкими акцепторами в магнитном поле. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):17–27. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-17-27](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-17-27)

**Original article**

**FEATURES OF PHOTOLUMINESCENCE OF GAAS-TYPE SEMICONDUCTORS ASSOCIATED WITH SHALLOW ACCEPTORS IN A MAGNETIC FIELD**

© 2024 U. R. Salomov, N. Kh. Yuldashev, I. I. Yulchiev

Fergana Polytechnic Institute (86, Fergana str., Fergana, 150107, Republic of Uzbekistan)

**Abstract.** By the method of Picus and Beer invariants, general expressions were obtained for the full intensity  $I$  and the degree of circular polarization of the  $P_{\text{circ}}$  photoluminescence of GaAs-type semi-conductors in a longitudinal magnetic field  $H$  with the participation of small acceptor levels. Special cases are analyzed depending on the value and direction of the magnetic field strength, as well as on the sign of the Zeeman constants of the  $g$ -factor of the acceptor  $g_1$ ,  $g_2$  and the electron of the  $g_e$  conduction band. In the case of a strong magnetic field  $H // [100]$ ,  $[111]$ ,  $[110]$  the numerical calculation of the angular dependence of the values  $I$  and  $P_{\text{circ}}$  is performed for some critical values of the  $g_2/g_1$  ratio, at which  $P_{\text{circ}}$  reveals a sharp anisotropy in the range from  $-100$  to  $+100$  %, and the intensity of the crystal radiation along the magnetic field, it tends to a minimum value. It is shown that with a weak magnetic field, there is an angular dependence for the total intensity, but it does not manifest itself in the

degree of polarization of the radiation. In the case of a strong magnetic field, the character of the angular dependencies  $I(\theta)$ ,  $P_{\text{circ}}(\theta)$  is determined by the sign of the ratio of the  $g$ -factors  $g_e/g_1$  and  $g_h/g_1$ . An experimental study of the dependences of the intensity and degree of polarization of luminescence in a magnetic field caused by the optical transition of free electrons to the level of a small acceptor on the orientation of the vector  $H$  in the crystal allows us to find the values of the constants  $g_1$  and  $g_2$ , as well as to establish some characteristic features of radiation.

**Keywords:** semiconductor, recombination radiation, shallow acceptor center, magnetic field, Zeeman splitting,  $g$ -factors, anisotropy, circular polarization, intensity

**For citation:** Salomov U.R., Yuldashev N.Kh., Yulchiev I.I. Features of photoluminescence of GaAs-type semiconductors associated with shallow acceptors in a magnetic field. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):17–27. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-17-27](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-17-27)

## Введение

Исследование поляризации рекомбинационного излучения полупроводников в магнитном поле представляет большой теоретический [1 – 5] и экспериментальный [6 – 10] интерес с целью получения новой информации об их оптических свойствах и о динамике кристаллических структур в области фотоники и спинтроники. В пионерской работе [2] сделан теоретический анализ случая слабого магнитного поля ( $\mu_0 H/kT \ll 1$ ) в полупроводниках типа GaAs, когда рекомбинационное излучение происходит при электронном переходе зона проводимости – мелкий акцептор. Для степени циркулярной поляризации излучения получено простое выражение

$$P_{\text{цирк}} = (g_e + 5g_h) \frac{\mu_0 H}{4kT}, \quad (1)$$

где  $g_e, g_h$  –  $g$ -факторы свободного электрона и связанной дырки в акцепторе;  $\mu_0 = \frac{e\hbar}{2m_0c}$  – магнетон Бора;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура по шкале Кельвина;  $H$  – напряженность магнитного поля.

Поляризация рекомбинационного излучения с участием мелких акцепторов определяется средними моментами свободных электронов и связанных дырок, линейно и изотропно зависит от магнитного поля, а также обратно пропорциональна температуре. Эти выводы теории [2] получили свое экспериментальное подтверждение в работах [6 – 8].

Авторы работы [7] при изучении поляризации спектральной линии 0,709 эВ излучения германия в широких пределах значений магнитного поля (от 0 до 5 Тл) показали, что степень циркулярной поляризации зависит от направления магнитного поля. Теория зеемановского расщепления мелких акцепторов в кубических полупроводниках, учитывающая кубические

вклады от зонной структуры и сильных магнитных полей, была развита в работе [8].

Методом сканирующей туннельной микроскопии исследовано влияние магнитного поля на физические свойства дырочных состояний акцептора марганца, расположенного вблизи поверхности (110) GaAs. Показано, что сильная анизотропная волновая функция дырки существенно не меняется под действием магнитного поля до 6 Тл [9]. Изучение магнитосопротивления в эпитаксиальном слое  $\text{Ga}_{0,972}\text{Mn}_{0,028}\text{As}$  показало [10], что легирование бериллия приводит к переориентации как легких, так и жестких магнитных осей в GaMnAs.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию энергетического спектра и волновых функций дырок в валентной зоне полупроводниковых таких наноструктур, как квантовые ямы, квантовые проволоки и квантовые точки во внешнем магнитном поле [11 – 18]. В работе [11] выполнен теоретический расчет мелкопримесных состояний в полупроводниковых квантовых ямах и сверхрешетках GaAs – (Ga, Al)As в магнитном поле вдоль направления роста, согласующийся с экспериментальными результатами. Обнаружена индуцированная магнитным полем циркулярно поляризованная фотолюминесценция A(+)-центров в квантовых ямах GaAs/AlGaAs [12], что позволяет определить их тонкую, спиновую, энергетическую структуру. Исследована анизотропия электронного  $g$ -фактора для гетероструктур GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As при температуре жидкого гелия, определены линейные по магнитному полю поправки к компонентам  $g$ -фактора и установлена сильная их анизотропия [13]. В работе [14] изучали зависимость зеемановского расщепления основного состояния дырки от изменения параметров размерного квантования с учетом сложной структуры валентной зоны и индуцированного магнитным полем перемешивания дырочных состояний. Показано, что  $g$ -фактор дырки чрезвычайно чувствителен к составу со-

стояний дырки и геометрии потенциала размерного квантования. В работе [15] теоретически исследована кубическая анизотропия зеемановского расщепления дырки в полупроводниковом нанокристалле, возникающая из-за кристаллографических кубически-симметричных членов по спину и кинетической энергии в объемном гамильтониане Латтинджера. Авторами предложены возможные экспериментальные проявления и потенциальные методы измерения кубической анизотропии дырочного зеемановского расщепления.

Целью настоящей работы является получение методом инвариантов Пикуса и Бира общих выражений для полной интенсивности и степени циркулярной поляризации фотолюминесценции на мелких акцепторных центрах полупроводников типа GaAs в произвольной кристаллографической ориентации и произвольном значении магнитного поля.

Будем считать, что в течение времени жизни  $\tau$  свободные электроны успевают прийти к равновесному распределению по спину, то есть  $\tau \gg \tau_s$  (где  $\tau_s$  – время спиновой релаксации). Проанализируем роль анизотропного зеемановского расщепления уровня акцептора и особенностей магнитоиндуцированного перемешивания подуровней при критических значениях  $g_2/g_1$  отношения параметров  $g$ -фактора связанной дырки в формировании интенсивности и магнитной циркулярной поляризации фотолюминесценции на мелких акцепторах.

### Метод исследования и теоретический расчет

Рассмотрим, как и в работе [19], помещенный в однородное магнитное поле полупроводник типа GaAs, в котором создаются неравновесные носители, а их излучательная рекомбинация идет через уровни мелких акцепторов. Предполагаем, что направления излучения и магнитного поля совпадают (геометрия Фарадея). Тогда из-за ориентации спинов электронов в зоне проводимости и дырок на акцепторных уровнях под действием магнитного поля люминесценция кристалла оказывается циркулярно поляризованной. Для теоретического описания такого рекомбинационного излучения сначала заметим, что исходные состояния электронов и дырок с учетом спина двух- и четырехкратно вырождены и в представлениях Латтинджера-Кона описываются волновыми функциями, преобразующимися по представлениям  $G_6$ ,  $G_8$ , а Гамильтонианы взаимодействия свободных электронов и связанных дырок с магнитным полем напряженностью  $\vec{H}$  в первом приближении описываются матрицами [1]

$$\hat{H}^{(c)} = \frac{1}{2} g_e \mu_0 \sum_i \hat{\sigma}_i H_i, \quad (2, a)$$

$$\hat{H}^{(a)} = \mu_0 \sum_i (g_1 \hat{J}_i + g_2 \hat{J}_i^3) H_i \quad (i = x, y, z); \quad (2, б)$$

здесь  $\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_z$  – матрицы Паули;  $\hat{J}_x, \hat{J}_y, \hat{J}_z$  – матрицы размерности  $4 \times 4$  проекций оператора момента импульса в базисе состояний  $Y_n^{3/2}$ ;  $g_1, g_2$  – константы зеемановского расщепления акцепторного уровня, определяющие  $g_h - g$ -фактор дырки.

Возмущения (2, a) и (2, б) считаем как малые величины первого порядка по отношению к внутрикристаллическому взаимодействию ( $E_0^{(a)} \ll \frac{m_0^2 e^4}{2 \epsilon^2 h^2} \frac{m^{*2}}{m_0^2}$ ), которые снимают спиновые

вырождения состояния электрона зоны проводимости и дырки в акцепторе. Правильные волновые функции этих состояний в нулевом приближении определяются, соответственно, следующими соотношениями:

$$\Psi_M^{(c)} = \sum_m C_m^{(M)} \Psi_m^{1/2} \quad (m = \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}; M = 1; -1); \quad (3, a)$$

$$\Psi_N^{(a)} = \sum_n C_n^{(N)} \Psi_n^{3/2} \quad (n = \frac{3}{2}; \frac{1}{2}; -\frac{1}{2}; -\frac{3}{2},$$

$$N = 1; 2; 3; 4). \quad (3, б)$$

Коэффициенты разложения  $C_m^{(M)}, C_n^{(N)}$  по полным наборам ортонормированных функций  $\Psi_m^{1/2}$ ,  $\Psi_n^{3/2}$  и значения расщепленных энергетических уровней  $E_M^{(c)}, E_N^{(a)}$  можно определить из следующих матричных уравнений:

$$\|\hat{H}^{(c)} - E_M^{(c)} \hat{I}_M\| \cdot \|\hat{C}^{(M)}\| = 0; \quad (4, a)$$

$$\|\hat{H}^{(a)} - E_N^{(a)} \hat{I}_N\| \cdot \|\hat{C}^{(N)}\| = 0, \quad (4, б)$$

где  $\hat{I}_M$  и  $\hat{I}_N$  – единичные матрицы  $2 \times 2$  и  $4 \times 4$ , а  $\hat{C}^{(M)}, \hat{C}^{(N)}$  являются матрицами столбцами  $2 \times 1$  и  $4 \times 1$ .

Уравнение (4, a) позволит найти энергии зеемановского расщепления в зоне проводимости

$$E_M^{(c)} \equiv E_m^{(c)} = m g_e \mu_0 H, \quad (5, a)$$

а уравнение (4, б) дает для акцепторных уровней  $E_N^{(a)} \equiv E_n^{(a)}$  выражения

$$E_{(1,4)}^{(a)} = \pm \mu_0 H \left\{ \frac{1}{8} \left[ 9(g_1 + \frac{9}{4}g_2)^2 + (g_1 + \frac{g_2}{4})^2 \right] + (g_1 + \frac{7}{4}g_2) \sqrt{(g_1 + \frac{13}{4}g_2)^2 - \frac{9}{4}g_2(g_1 + \frac{5}{2}g_2)\gamma'} \right\}^{\frac{1}{2}}; \quad (5, б)$$

$$E_{(2,3)}^{(a)} = \pm \mu_0 H \left\{ \frac{1}{8} \left[ 9(g_1 + \frac{9}{4}g_2)^2 + (g_1 + \frac{g_2}{4})^2 \right] - (g_1 + \frac{7}{4}g_2) \sqrt{(g_1 + \frac{13}{4}g_2)^2 - \frac{9}{4}g_2(g_1 + \frac{5}{2}g_2)\gamma'} \right\}^{\frac{1}{2}};$$

где  $\gamma' = h_x^2 h_y^2 + h_y^2 h_z^2 + h_z^2 h_x^2 = \sin^4 2\theta + \sin^4 \theta \sin^2 2\varphi$  (обозначения см. на рис. 1).

Вообще говоря, зеемановское расщепление для акцептора (как видно из зависимости 5, б) имеет сложный анизотропный характер, анализу которого и была посвящена работа [19]. При  $g_2 = 0$  и  $g_2/g_1 = -2/5, -4/7$  величина расщепления уровня акцептора  $E_n^{(a)}$  не зависит от направления вектора  $\vec{H}$  в кристалле.

Далее нас интересует вывод общих формул для расчета параметров поляризованной люминесценции. Интенсивность рекомбинационного излучения, связанного с квантовым переходом, зона проводимости – акцептор и поляризованного по правому или левому кругу, в направлении магнитного поля можно определить из следующего общего выражения:

$$I_{\sigma_{\pm}}(\vec{e}_{\pm}, \vec{H}) = \sum_{n,m} f_n^{(a)} f_m^{(c)} \left| \langle \Psi_n^{(a)} | \vec{P} \cdot \vec{e}_{\pm}^* | \Psi_m^{(c)} \rangle \right|^2 = C_0 \sum_{n,m} f_n^{(a)} f_m^{(c)} Sp \hat{\mathcal{M}}_{\sigma_{\pm}}(n, m), \quad (5)$$

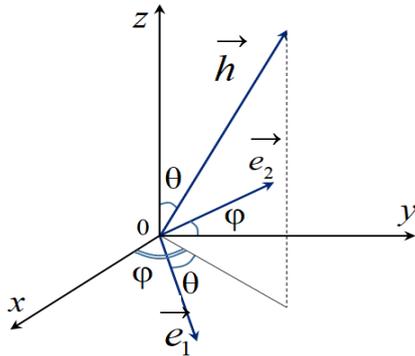


Рис. 1. Выбор направлений кристаллографических осей  $x \parallel [100]$ ,  $y \parallel [010]$ ,  $z \parallel [001]$  и единичных векторов напряженности магнитного поля  $\vec{h} = \vec{H}/H$ , поляризации излучения  $\vec{e}_1 \perp \vec{e}_2 \perp \vec{h}$

Fig. 1. Selection of the directions of crystallographic axes  $x \parallel [100]$ ,  $y \parallel [010]$ ,  $z \parallel [001]$  and unit vectors of magnetic field strength  $\vec{h} = \vec{H}/H$ , radiation polarization  $\vec{e}_1 \perp \vec{e}_2 \perp \vec{h}$

где  $\vec{e}$  – вектор поляризации ( $\vec{e}_{\pm} = (\vec{e}_1 \pm i\vec{e}_2)/\sqrt{2}$ , см. рис. 1);  $\vec{P}$  – оператор квазиимпульса;  $C_0 = \text{const}$ ;  $f_m^{(c)}$ ,  $f_n^{(a)}$  – функции распределения по энергиям для электронов зоны проводимости и для дырок в акцепторах.

Будем предполагать, что имеет место распределение Максвелла-Больцмана электрона и дырки по спиновым уровням

$$f_m^{(c)} = \frac{\exp(-\beta E_m^{(c)})}{\sum_{m'} \exp(-\beta E_{m'}^{(c)})}; \quad f_n^{(a)} = \frac{\exp[-\beta E_n^{(a)}]}{\sum_{n'} \exp[-\beta E_{n'}^{(a)}]}; \quad \beta = 1/kT. \quad (6)$$

В выражении (5) через  $\hat{\mathcal{M}}_{\sigma_{\pm}}(n, m)$  обозначена матрица размерности  $4 \times 4$

$$\hat{\mathcal{M}}_{\sigma_{\pm}}(n, m) = \hat{B}^{(a)}(n) \hat{R}_{\sigma_{\pm}} \hat{B}^{(c)*}(m) \hat{R}_{\sigma_{\pm}}^{\dagger}. \quad (7)$$

Здесь  $B_{jj'}^{(a)}(n) = C_j^{(n)} C_{j'}^{(n)+}$  и  $B_{ii'}^{(c)}(m) = C_i^{(m)} C_{i'}^{(m)+}$ ;  $C_j^{(n)}$  – матрицы;  $C_i^{(m)}$  – коэффициенты разложения волновой функции дырки в состоянии  $n$  и электрона в состоянии  $m$  соответственно по базисным функциям представлений  $\Gamma_8$  и  $\Gamma_6$  (выражения (3, а) и (3, б));  $(R_{\sigma_{\pm}})_{ij}$  – матричный элемент рекомбинации электрона и дырки в состоянии  $i = 1, 2$  и  $j = 1, 2, 3, 4$ , не зависящий от  $\vec{H}$  (то есть  $\hat{R}_{\sigma_{\pm}}$  – матрица порядка  $4 \times 2$  определяет правило отбора для рекомбинационного излучения зона проводимости – акцептор в отсутствии магнитного поля:

$j=1/2; m$	1/2	-1/2
$j=3/2; n$	$e_{\pm}^* R$	0
3/2	$i \frac{2}{\sqrt{3}} e_z^* R$	$-i \frac{1}{\sqrt{3}} e_{\pm}^* R$
1/2	$\frac{1}{\sqrt{3}} e_{\pm}^* R$	$\frac{2}{\sqrt{3}} e_z^* R$
-1/2	0	$-i e_{\pm}^* R$
-3/2		

$$\hat{R}_{\sigma_{\pm}} = R_0 \begin{pmatrix} e_{\pm}^* & 0 \\ i \frac{2}{\sqrt{3}} e_z^* & -i \frac{1}{\sqrt{3}} e_{\pm}^* \\ \frac{1}{\sqrt{3}} e_{\mp}^* & \frac{2}{\sqrt{3}} e_z^* \\ 0 & -i e_{\mp}^* \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где  $e_{\pm} = (e_x \pm i e_y)/\sqrt{2}$ ;  $R_0 = \text{const} = \langle X | \hat{P}_x | S \rangle = \langle Y | \hat{P}_y | S \rangle = \langle Z | \hat{P}_z | S \rangle$ .

Можно показать [20], что, например,

$$B_{jj'}^{(a)}(n) = \prod_{v=1}^3 \frac{H_{jj'}^{(a)} - E_{n_v}^{(a)} \delta_{jj'}}{E_n^{(a)} - E_{n_v}^{(a)}}, \quad (9)$$

где  $E_{n_v}^{(a)}$  ( $v = 1, 2, 3$ ) – энергия дырки в трех других состояниях, отличных от состояния  $n$ ;  $\delta_{jj'}$  –  $\delta$  символ Дирака.

Подставляя выражения (8) и (9) в уравнение (7), а затем выражения (6) и (7) – в уравнение (5), после простых, но громоздких преобразований получаем для излучения вдоль вектора  $\vec{H}$

$$I = I_{\sigma_+} + I_{\sigma_-} = r_0 F; \quad (10)$$

$$P_{\text{цирк}} = \frac{I_{\sigma_+} - I_{\sigma_-}}{I_{\sigma_+} + I_{\sigma_-}} = F^{-1} \left\{ (2A_0 + f_1 A_2) f_0 + (5 + \frac{41}{4} \frac{g_2}{g_1}) A_1 + A_3 f_2 - \right. \\ \left. - \frac{9}{2} \frac{g_2}{g_1} (1 + \frac{7}{4} \frac{g_2}{g_1}) \left[ A_2 f_0 + \frac{3}{2} (1 + \frac{9}{4} \frac{g_2}{g_1}) A_3 \right] \gamma \right\}, \quad (11)$$

где

$$F = 4A_0 + A_2 f_3 + \left[ 4(1 + \frac{5}{2} \frac{g_2}{g_1}) A_1 + A_3 f_4 \right] f_0 - \\ - \frac{9}{4} \frac{g_2}{g_1} \left\{ \left[ (A_1 + A_3 f_3) f_0 + (1 + \frac{7}{4} \frac{g_2}{g_1}) A_2 \right] \gamma + \frac{27}{16} \frac{g_2}{g_1} (1 + \frac{7}{4} \frac{g_2}{g_1}) A_3 f_0 \chi \right\}. \quad (12)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$f_0 = th \left( \frac{1}{2} \beta g_e \mu_0 H \right);$$

$$f_1 = 6 \left( 1 + \frac{7}{4} \frac{g_2}{g_1} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{4} \frac{g_2}{g_1} \right)^2 + 9 \frac{g_2}{g_1} \left( 1 + \frac{7}{4} \frac{g_2}{g_1} \right);$$

$$f_2 = f_4 + \frac{1}{4} \left( 1 + \frac{1}{4} \frac{g_2}{g_1} \right)^3;$$

$$f_3 = 7 \left( 1 + \frac{9}{4} \frac{g_2}{g_1} \right)^2 - \frac{g_2}{g_1} \left( 1 + \frac{5}{4} \frac{g_2}{g_1} \right);$$

$$f_4 = 9 \left( 1 + \frac{7}{4} \frac{g_2}{g_1} \right) \left( 1 + \frac{9}{4} \frac{g_2}{g_1} \right) \left( 1 + \frac{13}{4} \frac{g_2}{g_1} \right) + \left( 1 + \frac{1}{4} \frac{g_2}{g_1} \right)^2 \left( 1 + \frac{5}{2} \frac{g_2}{g_1} \right);$$

$$f_5 = \frac{3}{8} \left[ 10 + 37 \frac{g_2}{g_1} + \frac{285}{8} \left( \frac{g_2}{g_1} \right)^2 \right];$$

$$A_l = - \frac{\sum_{n=1}^4 a_l^{(n)} \exp(-\beta E_n^{(a)})}{\sum_{n=1}^4 \exp(-\beta E_n^{(a)})};$$

$$a_0^{(n)} = \frac{E_{n_1}^{(a)} E_{n_2}^{(a)} E_{n_3}^{(a)}}{(g_1 \mu_0 H)^3} a_3^{(n)};$$

$$a_1^{(n)} = \frac{E_{n_1}^{(a)} E_{n_2}^{(a)} + E_{n_1}^{(a)} E_{n_3}^{(a)} + E_{n_2}^{(a)} E_{n_3}^{(a)}}{(g_1 \mu_0 H)^2} a_3^{(n)};$$

$$a_2^{(n)} = \frac{E_{n_1}^{(a)} + E_{n_2}^{(a)} + E_{n_3}^{(a)}}{g_1 \mu_0 H} a_3^{(n)};$$

$$a_3^{(n)} = \frac{(g_1 \mu_0 H)^3}{(E_{n_1}^{(a)} - E_{n_1}^{(a)})(E_{n_2}^{(a)} - E_{n_2}^{(a)})(E_{n_3}^{(a)} - E_{n_3}^{(a)})};$$

$$\gamma = 4(h_x^2 h_y^2 + h_x^2 h_z^2 + h_y^2 h_z^2); \quad \chi = 16 h_x^2 h_y^2 h_z^2;$$

$r_0 = \text{const}$ ;  $h_i$  ( $i = x, y, z$ ) – проекции единичного

вектора  $\vec{h}$  на главные оси симметрии кристалла.

## Обсуждение полученных результатов

### А. Анализ общих формул

Как видно из выражений (10) – (12), интенсивность  $I$  и степень поляризации  $P_{\text{цирк}}$  имеют сложную угловую зависимость, обусловленную как анизотропией зеэмановского расщепления уровня акцептора (5, б) через величины  $A_l$  ( $l = 0, 1, 2, 3$ ), так и анизотропией правил отбора (8) через величины  $\gamma$  и  $\chi$ . Интересно заметить, что при  $g_2 = 0$  полностью исчезает угловая зависимость в формулах (5, б) и (10) – (12), то есть при допущенных выше условиях зеэмановское расщепление мелкого акцептора и связанная с ним люминесценция полупроводников типа GaAs не обнаруживают анизотропии. В этом случае выражения для  $I$  и  $P_{\text{цирк}}$  сильно упрощаются:

$$I(g_2 = 0) = \frac{1}{3} |R_0|^2 (1 + \omega) \exp \left[ \frac{1}{2} (g_1 - g_e) \beta \mu_0 H \right] \left[ 1 + \right. \\ \left. + 3 \exp((g_1 + g_e) \beta \mu_0 H) \right]; \quad (13)$$

$$P_{\text{цирк}}(g_2 = 0) = \frac{1 - \omega}{1 + \omega};$$

$$\omega = \frac{1 + 3 \exp(-(g_e + |g_1|) \beta \mu_0 H)}{3 \exp(2|g_1| \beta \mu_0 H) + \exp((|g_1| - g_e) \beta \mu_0 H)}. \quad (14)$$

При отсутствии магнитного поля  $\omega = 1$  и из выражений (13), (14), как и следовало ожидать, получим:  $I = 8|R_0|^2/3 = \text{const}$ ,  $P_{\text{цирк}} = 0$ .

Общие выражения (10) – (12) также существенно упрощаются при некоторых характерных значениях  $g_2/g_1$ . Так, например, при  $g_2/g_1 = -4/7$  анизотропия отсутствует для расщепленных уровней  $E_N^{(a)}$ , причем они попарно сливаются, образуя два дублетных состояния  $E_{1,2}^{(a)} = -E_{3,4}^{(a)} = 3g_1 \mu_0 H/7$  (см. зависимость (5, б)), тогда как для  $I$  и  $P_{\text{цирк}}$  анизотропия сохраняется в следующем упрощенном виде:

$$I(g_2/g_1 = -\frac{4}{7}) = \frac{2}{3} |R_0|^2 \exp\left(\left(\frac{g_e}{2} + \frac{3}{7} g_1\right) \beta \mu_0 H\right) (1 + \exp(-g_e \beta \mu_0 H)) \times (15) \\ \times (1 + \exp(-\frac{6}{7} g_1 \beta \mu_0 H)) (1 + (1 - \frac{3}{4} \gamma) f_0 f_0') ; \\ P_{\text{цирк}}(g_2/g_1 = -\frac{4}{7}) = \frac{1}{2} \frac{f_0 + f_0'}{1 + (1 - \frac{3}{4} \gamma) f_0 f_0'} ; \\ f_0' = th\left(\frac{3}{7} \beta g_e \mu_0 H\right) . \quad (16)$$

В общем случае  $g_2/g_1 \neq 0, -4/13, -2/5, -4/7$ , зависимости  $I$  и  $P_{\text{цирк}}$  от констант  $g_1, g_2$  (или от  $g_2/g_1$ ) и от направления магнитного поля ведут себя весьма сложно.

Представляет интерес анализ общих выражений для интенсивности (10) и циркулярной поляризации (11) в предельных случаях слабого и сильного магнитных полей.

1. При слабом магнитном поле ( $\beta \mu_0 H < 1$ ) из выражений (10) и (11) находим

$$I = \frac{4}{3} |R_0|^2 \left[ \left( 1 + \frac{g_e \beta \mu_0 H}{2} \right) \right]^2 \left[ 2 + g_e \left( g_1 + \frac{5}{2} g_2 \gamma \right) (\beta \mu_0 H)^2 \right] ; \quad (17)$$

$$P_{\text{цирк}} = \frac{1}{4} \left( g_e + 5g_1 + \frac{41}{4} g_2 \right) \frac{\mu_0 H}{kT} . \quad (18)$$

Здесь сразу же заметим, что для индуцированной слабым магнитном полем степени циркулярной поляризации из выражения (18) в предельном случае  $g_2 \rightarrow 0$  получим результат Дьяконова и Переля (1), причем  $g$ -фактор дырки в акцепторе совпадает с константой  $g_1$ . В формуле (18) третье слагаемое  $\frac{41}{4} g_2$  в скобке учитывает более тонкое парамагнитное взаимодействие акцептора с внешним магнитном полем (см. зависимость (2, б)) и описывает добавочный дырочный вклад в поляризацию. Видно, что константа зеемановского расщепления  $g_2$  внесет заметный вклад в поляризацию даже при таких скромных значениях, как  $g_2 \approx 0,1g_1$  (для кристаллов со структурой алмаза известны следующие экспериментальные значения:  $g_1 = -1,15 \pm 0,05$ ,  $g_2 = 0,45 \pm 0,05$ ,  $g_e = 1,58$  [4; 7]) и необходимо его учитывать для аккуратной интерпретации соответствующих результатов исследования рекомбинационного излучения через мелкие акцепторы.

В рассматриваемом случае формально существует угловая зависимость для зеемановских

уровней  $E_i^{(a)}$  (5, б) и интенсивности (17), но она не проявляется в поляризации излучения (18). Это объясняется тем, что при условии  $\mu_0 H < kT$  интервал между зеемановскими подуровнями акцептора покрывается тепловым разбросом фононов ( $\Delta E_{ij}^{(a)} \sim g_1 \mu_0 H < kT$ ), и вследствие этого индуцированные ориентации спинов дырок в акцепторе в среднем практически не зависят от направления магнитного поля. Следовательно естественно ожидать, что поляризация рекомбинационного излучения в данном случае не чувствительна к сливанию магнитных подуровней акцептора.

При условии  $(|g_1|, |g_e|) \frac{\mu_0 H}{kT} \ll 1$ , как видно из выражения (17), полная интенсивность излучения практически не зависит от магнитного поля и  $I \approx 8|R_0|^2/3 = \text{const}$ .

2. Условие сильного магнитного поля  $(|g_1|, |g_e|) \frac{\mu_0 H}{kT} > 1$  практически легко выполнить при низких температурах с умеренными значениями напряженности  $H$ . Так, для температуры жидкого гелия получим  $H > 3$  кЭ. С другой стороны развитая здесь теория справедлива при выполнении условия  $\mu_0 H \ll E_0^{(a)}$  (где  $E_0^{(a)}$  – энергия активации основного состояния акцептора) и при  $E_0^{(a)} \approx 0,05$  эВ имеем  $H \ll 500$  эВ, что дает основание считать сильными магнитные поля с  $H \geq 50$  эВ уже при температуре жидкого азота.

В сильном магнитном поле заселенность частиц на расщепленных подуровнях сильно различается, что приводит к существенному различию в интенсивностях спектральных линий, связанных квантовыми переходами между различными магнитными уровнями зоны проводимости и акцептора. Так, вероятность разрешенного перехода между нижним электронным и верхним дырочным уровнями гораздо больше, чем остальных. Считая, что рассматриваемая люминесценция происходит только вследствие перехода электронов из нижнего магнитного подуровня зоны проводимости ( $m = -1/2$ ) на верхний подуровень акцептора ( $n = -3/2$ ) с  $g_1 < 0$ , из выражений (10) – (12) получим:

$$I = \frac{1}{6} |R_0|^2 \frac{(g_1 \mu_0 H)^3}{E_1^{(a)} (E_1^{(a)2} - E_2^{(a)2})} \exp\left((|g_e| \mu_0 H + E_1^{(a)}) / 2kT\right) \times F' ; \quad (19)$$

$$P_{\text{цирк}} = \left\{ \begin{aligned} &\pm \frac{E_1^{(a)}}{g_1 \mu_0 H} \left[ f_1 - 2 \frac{E_2^{(a)^2}}{(g_1 \mu_0 H)^2} \right] + f_2 - \left( 5 + \frac{41 g_2}{4 g_1} \right) \frac{E_1^{(a)^2}}{(g_1 \mu_0 H)^2} - \\ &\left[ -\frac{9 g_2}{2 g_1} \left( 1 + \frac{7 g_2}{4 g_1} \right) \left[ \frac{3}{2} \left( 1 + \frac{9 g_2}{4 g_1} \right) \pm \frac{E_1^{(a)}}{g_1 \mu_0 H} \right] \gamma \right] \end{aligned} \right\} / F'; \quad (20)$$

$$F' = \frac{E_1^{(a)}}{g_1 \mu_0 H} \left( f_3 - 4 \frac{E_2^{(a)^2}}{(g_1 \mu_0 H)^2} \right) \pm \left[ f_4 - 4 \left( 1 + \frac{5 g_2}{2 g_1} \right) \frac{E_1^{(a)^2}}{(g_1 \mu_0 H)^2} \right] - \frac{9 g_2}{4 g_1} \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{7 g_2}{4 g_1} \right) \frac{E_1^{(a)}}{g_1 \mu_0 H} \pm \left( f_5 - \frac{E_1^{(a)^2}}{(g_1 \mu_0 H)^2} \right) \right] \gamma \pm \frac{27 g_1}{16 g_2} \left( 1 + \frac{7 g_1}{4 g_2} \right) \chi \right\}, \quad (21)$$

где верхний знак (+) относится к случаю  $g_e > 0$ , а нижний (–) – к  $g_e < 0$ ;  $E_1^{(a)}$  и  $E_2^{(a)}$  – энергии зеемановского расщепления двух верхних уровней акцептора (из них  $E_1^{(a)}$  выше, чем  $E_2^{(a)}$ ).

Согласно выражению (5, б)  $E_i^{(a)} \sim H$ , то, как видно из зависимостей (20) и (21), при  $\mu_0 H/kT \gg 1$  степень индуцированной циркулярной поляризации не зависит от значения напряженности магнитного поля, в то же время такая зависимость для полной интенсивности сохраняется благодаря экспоненциальному множителю  $\exp((|g_e| \mu_0 H + E_1^{(a)})/2kT)$ . При этом  $I$  и  $P_{\text{цирк}}$  обнаруживают сложные анизотропию и зависимость от  $g_2/g_1$  со всеми вышеуказанными в начале пункта А особенностями.

**Б. Результаты численного расчета.** В дальнейшем при «сильном» магнитном поле выполнен численный расчет  $I(\theta, g_2/g_1)$ ,  $P_{\text{цирк}}(\theta, g_2/g_1)$  при  $g_1 < 0$ , результаты которого представлены на рис. 2 – 4. Для этих функций независимо от знака  $g_e$ -фактора можно указать три характерные области значений отношения  $g_2/g_1$ :  $g_2/g_1 < -4/7$ ;  $g_2/g_1 > -4/13$  и  $-4/7 \leq g_2/g_1 \leq -4/13$ , в которых они проявляют специфические особенности.

Так, когда  $g_e > 0$  при  $g_2/g_1 > -4/13$  (область I), в произвольных направлениях кристалла наиболее вероятным квантовым переходом является  $-\frac{1}{2} \rightarrow -\frac{3}{2}$  и он разрешен по правилу отбора. В этой области полная интенсивность излучения практически не имеет анизотропии и циркулярно поляризована по правому кругу (кривые I – 3 на рис. 2). А при  $g_2/g_1 < -4/7$  (область II) наиболее вероятный переход запрещен и можно считать, что в кристаллах типа GaAs с такими значениями  $g_2/g_1$  в произвольном направлении магнитного поля практически не происходит рекомбинационного излучения через мелкие акцепторы. В переходной области III при  $-4/7$

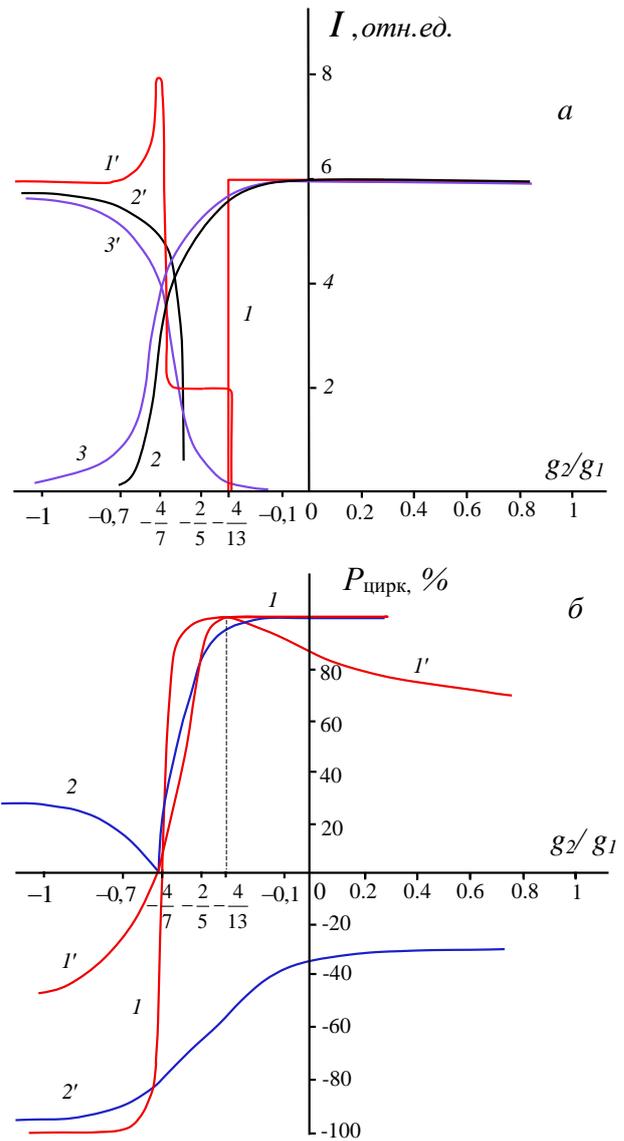


Рис. 2. Зависимость интенсивности (а) и степени циркулярной поляризации (б) излучения от  $g_2/g_1$  в области критических значений  $-4/7$ ,  $-2/5$  и  $-4/13$  для направлений  $\vec{n} // [001]$  (кривые I, I'), [110] (2, 2') и [111] (3, 3') при  $g_e > 0$  (I – 3) и  $g_e < 0$  (I' – 3')

Fig. 2. Dependence of the intensity (a) and degree of circular polarization (б) of radiation  $g_2/g_1$  on the critical values of  $-4/7$ ,  $-2/5$  and  $-4/13$  for the directions  $\vec{n} // [001]$  (curves I, I'), [110] (2, 2') and [111] (3, 3') for  $g_e > 0$  (I – 3) and  $g_e < 0$  (I' – 3')

$\leq g_2/g_1 \leq -4/13$  обнаруживаются существенные угловые зависимости  $I$  и  $P_{\text{цирк}}$  люминесценции в магнитном поле, обусловленные анизотропией зеемановского расщепления уровня акцептора и непосредственной анизотропией волновых функций энергетических зон кристалла.

В случае  $g_e < 0$  ( $g_1 < 0$ ), как видно из кривых I' – 3' (рис. 2), рекомбинация через мелкие акцепторы в кристаллах типа GaAs совершенно противоположно ведет себя в областях I и II значений  $g_2/g_1$  по сравнению со случаем  $g_e > 0$  ( $g_1 < 0$ ).

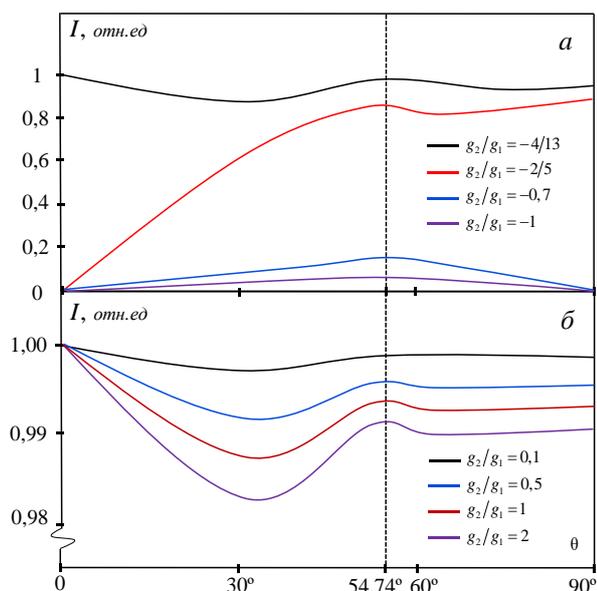


Рис. 3. Угловая зависимость интенсивности излучения для значений  $g_2/g_1$ :  $-4/13$ ,  $-2/5$ ,  $-0,7$ ,  $-1,0$  при  $g_e/g_1 < 0$  (а) и  $g_2/g_1$ :  $0,1$ ,  $0,5$ ,  $1,0$ ,  $2,0$  при  $g_e/g_1 > 0$  (б). Вектор  $\vec{H}$  лежит в плоскости (110),  $\theta$  – угол между  $\vec{H}$  и осью [001]. Значение  $\mu_0 H/kT$  фиксировано

Fig. 3. Angular dependence of the radiation intensity for the values  $g_2/g_1$ :  $-4/13$ ,  $-2/5$ ,  $-0,7$ ,  $-1,0$  at (a) and  $g_2/g_1$ :  $0,1$ ,  $0,5$ ,  $1,0$ ,  $2,0$  at  $g_e/g_1 > 0$ . The vector  $\vec{H}$  lies in the plane (110),  $\theta$  is the angle between and the axis [001]. The value  $\mu_0 H/kT$  is fixed

Так, в области I отсутствует излучение в указанном выше смысле, а в области II наблюдается излучение, циркулярно поляризованное по левому кругу. А существенное различие переходной области в случаях, когда  $g_e > 0$  и  $g_e < 0$ , заключается в том, что в первом случае в направлениях [001] и [110] наблюдается излучение только соответственно при  $g_2/g_1 \geq -4/13$  и  $g_2/g_1 \geq -4/7$ , а во втором – при  $g_2/g_1 \leq -4/13$  и  $g_2/g_1 \leq -4/7$ . Эти результаты в принципе легко можно объяснить, фиксируя положение и ход магнитных подуровней свободных электронов и мелкого акцептора в зависимости от  $g_1$ ,  $g_e$  и  $g_2/g_1$ .

На рис. 2 представлены качественные зависимости I и  $P_{\text{цирк}}$  от  $g_2/g_1$  в окрестности критических значений  $-4/7$ ,  $-2/5$  и  $-4/13$  для направлений  $\vec{H} \parallel [001]$ ,  $[110]$ ,  $[111]$  при  $g_e > 0$  и  $g_e < 0$  с обнаруженными особенностями при численном расчете. Заметим, что случаи  $g_e > 0$  и  $g_e < 0$  ( $g_1 < 0$ ) отличаются еще тем, что для них значения матричных элементов разрешенных переходов полностью не совпадают. Следует также отметить, что при  $g_1 > 0$  характеры функций  $P_{\text{цирк}}(\theta, g_2/g_1, H)$  и

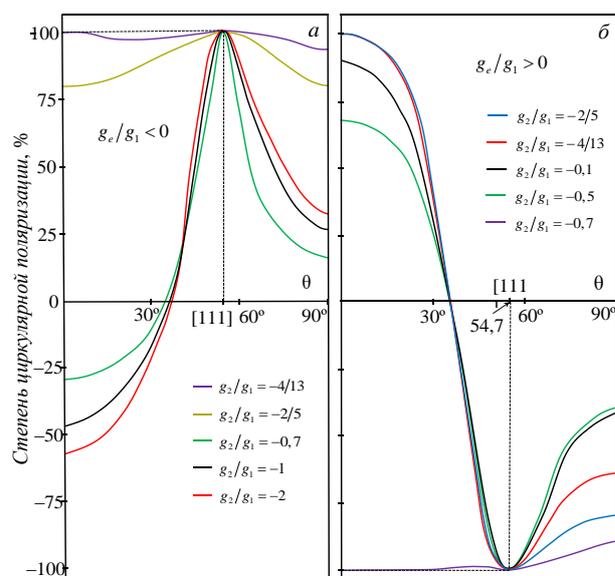


Рис. 4. Угловая зависимость степени циркулярной поляризации для значений  $g_2/g_1$ :  $-4/13$ ,  $-2/5$ ,  $-0,7$ ,  $-1,0$ ,  $-2,0$  при  $g_e/g_1 < 0$  (а) и  $g_2/g_1$ :  $-2/5$ ,  $-4/13$ ,  $-0,1$ ,  $-0,5$ ,  $-0,7$  при  $g_e/g_1 > 0$  (б). Значения  $\vec{H}$  и  $\theta$  выбраны также, как и на рис. 3

Fig. 4. Angular dependence of the degree of circular polarization for the values  $g_2/g_1$ :  $-4/13$ ,  $-2/5$ ,  $-0,7$ ,  $-1,0$ ,  $-2,0$  at  $g_e/g_1 < 0$  (a) and  $g_2/g_1$ :  $-2/5$ ,  $-4/13$ ,  $-0,1$ ,  $-0,5$ ,  $-0,7$  at  $g_e/g_1 > 0$  (b). The values  $\vec{H}$  and  $\theta$  are selected in the same way as in Fig. 3

$I(\theta, g_2/g_1, H)$  качественно не отличаются от случая  $g_1 < 0$ , в частности, исследуемые графики при  $g_1 > 0$  ( $g_e > 0$ ) и  $g_1 < 0$  ( $g_e < 0$ ) полностью совпадают.

На рис. 3 и 4 показаны угловые зависимости полной интенсивности и степени циркулярной поляризации излучения в «сильном» магнитном поле, рассчитанные для некоторых значений  $g_2/g_1$  при  $g_e/g_1 < 0$  (рис. 3, а, 4, а) и  $g_e/g_1 > 0$  (рис. 3, б, 4, б). Характер зависимостей  $I(\theta)$ ,  $P_{\text{цирк}}(\theta)$  определяется знаком отношения  $g$ -факторов  $g_e/g_1$  и  $g_2/g_1$ . Видно, что при  $g_e/g_1 < 0$ ,  $g_2/g_1 < -4/13$  или  $g_e/g_1 > 0$ ,  $g_2/g_1 > -4/7$  величины I и  $P_{\text{цирк}}$  существенно зависят от угла  $\theta$ , а интенсивность люминесценции значительно уменьшается. В случае, когда  $g_e/g_1 < 0$ ,  $g_2/g_1 > -4/13$  или  $g_e/g_1 > 0$ ,  $g_2/g_1 < -4/7$ , в сильном магнитном поле  $\beta\mu_0 H \gg 1$  излучение в направлении  $\vec{H}$  вне зависимости от угла  $\theta$  почти полностью циркулярно поляризовано (с точностью до 2 % (рис. 4)), то есть анизотропия зеемановского расщепления в этом случае не проявляется в поляризации люминесценции.

**Выводы**

Методом инвариантов Пикуса и Бира получены общие выражения для полной интенсивности и степени циркулярной поляризации фотолюминесценции на мелких акцепторных центрах полупроводников типа GaAs в продольном магнитном поле.

При слабом магнитном поле формально существует угловая зависимость для зеемановских уровней  $E_i^{(a)}$  акцептора и полной интенсивности, однако она не проявляется в поляризации излучения. В случае  $\mu_0 H \ll kT$  интенсивность излучения практически не зависит от магнитного поля.

При сильном магнитном поле  $\beta\mu_0 H \gg 1$  характер угловых зависимостей  $I(\theta)$ ,  $P_{\text{цирк}}(\theta)$  определяется знаком отношения  $g$ -факторов  $g_e/g_1$  и  $g_2/g_1$ . В случае, когда  $g_e/g_1 < 0$ ,  $g_2/g_1 > -4/13$  или  $g_e/g_1 > 0$ ,  $g_2/g_1 < -4/7$ , излучение в направлении вектора  $H$  почти полностью циркулярно поляризовано вне зависимости от угла  $\theta$ . При  $g_e/g_1 < 0$ ,  $g_2/g_1 < -4/13$  или  $g_e/g_1 > 0$ ,  $g_2/g_1 > -4/7$ , в сильном магнитном поле интенсивность люминесценции значительно уменьшается, а величины  $I$  и  $P_{\text{цирк}}$  существенно зависят от угла  $\theta$ .

Изучение зависимости интенсивности и степени поляризации люминесценции в магнитном поле, обусловленной оптическим переходом свободных электронов на уровень мелкого акцептора, от ориентации вектора  $\vec{H}$  в кристалле позволяет, в принципе, найти значения констант  $g_1$  и  $g_2$ , а также установить некоторые характерные особенности функций  $I(\theta, g_2/g_1, H)$ ,  $P_{\text{цирк}}(\theta, g_2/g_1, H)$ .

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бир Г.Л., Пикус Г.Е. *Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках*. Москва: Наука, 1972:584.
2. Дьяконов М.И., Перель В.И. О циркулярной поляризации рекомбинационного излучения полупроводников в слабом магнитном поле. *ФТТ*. 1972;14(5):1452.
3. Ivchenko E.L., Grigory Pikus. *Superlattices and Other Heterostructures: Symmetry and Optical Phenomena: 110 Springer; 2nd ed. Hardcover; 1997:395*.
4. Димитриев Г.С., Крайнов И.В., Сапега В.Ф., Аверкиев Н.С., Debus J., Lahderanta E. Энергетическая структура одиночного акцептора Mn в GaAs:Mn. *ФТТ*. 2018; 60(8):1556-1565.
5. Ивченко Е.Л. Магнитная циркулярная поляризация фотолюминесценции экситонов. *ФТТ*. 2018;60(8):1503–1514.
6. Akimov I.A., Godde T., Kavokin K.V., Yakovlev D.R., Reshina I.I., Sedova I.V., Sorokin S.V., Ivanov S.V., Kusrayev Yu.G., Bayer M. Dynamics of exciton magnetic polarons in CdMnSe/CdMgSe quantum wells: Effect of self-localization. *Phys. Rev. B*. 2017; 95:155303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.155303>
7. Shamirzaev T.S., Debus J., Yakovlev D.R., Glazov M.M., Ivchenko E.L., Bayer M. Dynamics of exciton recombination in strong magnetic fields in ultra-thin GaAs/AlAs quantum well with in direct band gap and type-II band alignment, *Phys. Rev. B*. 2016;94:045411. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.045411>
8. Dietl T., Ohno H. Dilute ferromagnetic semiconductors: Physics and spintronic structures. *Reviews of Modern Physics*. 2014;86(1):187–251. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.86.187>
9. Bozkurt M., Mahani M.R., Studer P., Tang J.-M., Schofield S.R., Curson N.J., Flatte M.E., Silov A.Yu., Hirjibehedin C.F., Canali C.M., Koenraad P.M. Magnetic anisotropy of single Mn acceptors in GaAs in an external magnetic field. *Physical Review B*. 2013;88(20):205203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.205203>
10. Parchinskiy P., Gazizulina A.S., Nasirov A.A., Yuldashev S.U. Anisotropic Magnetoresistance of Gammas: Be. Available at SSRN. 2023;4548055. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4548055>
11. Reyes-Gómez E., Perdomo-Leiva C.A., Oliveira L.E., de Dios-Leyva M. Magnetic-field effects on shallow impurities in semiconductor GaAs-(Ga, Al) As quantum wells and superlattices within a fractional-dimensional space approach. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2000;8(3):239–247. [https://doi.org/10.1016/S1386-9477\(00\)00154-5](https://doi.org/10.1016/S1386-9477(00)00154-5)
12. Петров П.В., Иванов Ю.Л., Романов К.С., Тонких А.А., Аверкиев Н.С. Циркулярно поляризованная фотолюминесценция, связанная с А(+)-центрами в квантовых ямах GaAs/AlGaAs. *ФТП*. 2006;40(9):1099–1102.
13. Nefyodov Yu.A., Shchepetilnikov A.V., Kukushkin I.V., Dietsche W., Schmult S. g-factor anisotropy in a GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As quantum well probed by electron spin resonance. *Phys. Rev.* 2011;B 83:041307(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.83.041307/>
14. Semina M.A., Suris R.A. Holes localized in nanostructures in an external magnetic field: g-factor and mixing of states. *Semiconductors*.

- 2015;49(6):797–806.  
<https://doi.org/10.1134/S1063782615060214>
15. Semina M.A., Golovatenko A.A., Rodina A.V. Cubic anisotropy of hole Zeeman splitting in semiconductor nanocrystals. *Physical Review B*. 2023;B108(23):235310.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.108.235310>
  16. Yesilgul U., Ungan F., Sakiroğlu S., Duque C., Mora-Ramos M., Kasapoglu E., Sari H., Sökmen I. The effect of magnetic field on the impurity binding energy of shallow donor impurities in a  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$  quantum well. *Nanoscale research letters*. 2012;7(1):586.  
<https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-586>
  17. Abramov A. Magnetic-field effects on donor impurity states in a quantum well. *World Journal of Condensed Matter Physics*. 2012;(2):188–191.  
<https://doi.org/10.4236/wjcmp.2012.24031>
  18. López Aristizábal A.M., Mora Rey F., Morales Á.L., Vinasco J.A., Duque C.A. Electric and magnetic fields effects in vertically coupled  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  conical quantum dots. *Condens. Matter*. 2023;8(3):71.  
<https://doi.org/10.3390/condmat8030071>
  19. Yulchiev I.I. (2023). The analysis of the numerical calculation of shallow acceptor levels of AIII BV crystals in a magnetic field. *ISJ Theoretical & Applied Science*. 2023;06(122):309–315.  
<https://doi.org/10.15863/tas.2023.06.122.50>
  20. Ивченко Е.Л., Бакалейников Л.А., Афанасьев М.М., Калевич В.К. Спин-зависимая рекомбинация в твердых растворах  $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$  в наклонном магнитном поле. *Физика твердого тела*. 2016;58(8):1490–1498.
- REFERENCES**
1. Bir G.L., Pikus G.E. *Symmetry and deformation effects in semiconductors*. Moscow: Nauka, 1972:584. (In Russ.).
  2. Diakonov M.I., Perel V.I. On the circular polarization of recombination radiation of semiconductors in a weak magnetic field. *FTT*. 1972;14(5):1452. (In Russ.).
  3. Ivchenko E.L., Grigory Pikus. *Superlattices and Other Heterostructures: Symmetry and Optical Phenomena: 110 Springer; 2nd ed. Hardcover; 1997:395*.
  4. Dimitriev G.S., Kraynov I.V., Sapieha V.F., Averkiev N.S., Debus J., Lahderanta E. *Energy structure of a single Mn acceptor in GaAs:Mn*. *FTT*. 2018;60(8):1556–1565 (In Russ.).
  5. Ivchenko E.L. Magnetic circular polarization of exciton photoluminescence. *FTT*. 2018; 60(8):1503–1514. (In Russ.).
  6. Akimov I.A., Godde T., Kavokin K.V., Yakovlev D.R., Reshina I.I., Sedova I.V., Sorokin S.V., Ivanov S.V., Kusrayev Yu.G., Bayer M. Dynamics of exciton magnetic polarons in  $\text{CdMnSe}/\text{CdMgSe}$  quantum wells: Effect of self-localization. *Phys. Rev. B*. 2017;B 95:155303.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.95.155303>
  7. Shamirzaev T.S., Debus J., Yakovlev D.R., Glazov M.M., Ivchenko E.L., Bayer M. Dynamics of exciton recombination in strong magnetic fields in ultra-thin  $\text{GaAs}/\text{AlAs}$  quantum well with in direct band gap and type-II band alignment, *Phys. Rev. B*. 2016;94:045411.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.045411>
  8. Dietl T., Ohno H. Dilute ferromagnetic semiconductors: Physics and spintronic structures. *Reviews of Modern Physics*. 2014;86(1):187–251.  
<https://doi.org/10.1103/revmodphys.86.187>
  9. Bozkurt M., Mahani M.R., Studer P., Tang J.-M., Schofield S.R., Curson N.J., Flatte M.E., Silov A.Yu., Hirjibehedin C.F., Canali C.M., Koenraad P.M. Magnetic anisotropy of single Mn acceptors in GaAs in an external magnetic field. *Physical Review B*. 2013;88(20):205203.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.205203>
  10. Parchinskiy P., Gazizulina A.S., Nasirov A.A., Yuldashev S.U. Anisotropic Magnetoresistance of Gammas: Be. Available at SSRN. 2023;4548055.  
<https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4548055>
  11. Reyes-Gómez E., Perdomo-Leiva C.A., Oliveira L.E., de Dios-Leyva M. Magnetic-field effects on shallow impurities in semiconductor  $\text{GaAs}-(\text{Ga}, \text{Al}) \text{As}$  quantum wells and superlattices within a fractional-dimensional space approach. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2000;8(3):239–247.  
[https://doi.org/10.1016/S1386-9477\(00\)00154-5](https://doi.org/10.1016/S1386-9477(00)00154-5)
  12. Petrov P.V., Ivanov Yu.L., Romanov K.S., Tonkikh A.A., Averkiev N.S. Circularly polarized photoluminescence associated with A(+) centers in  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  quantum wells. *FTP*. 2006;40(9):1099–1102. (In Russ.).
  13. Nefyodov Yu.A., Shchepetilnikov A.V., Kukushkin I.V., Dietsche W., Schmult S. g-factor anisotropy in a  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  quantum well probed by electron spin resonance. *Phys. Rev.* 2011;B 83:041307(R).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.83.041307/>
  14. Semina M.A., Suris R.A. Holes localized in nanostructures in an external magnetic field: g-factor and mixing of states. *Semiconductors*. 2015;49(6):797–806.  
<https://doi.org/10.1134/S1063782615060214>
  15. Semina M.A., Golovatenko A.A., Rodina A.V. Cubic anisotropy of hole Zeeman splitting in

- semiconductor nanocrystals. *Physical Review B*. 2023;B108(23):235310.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.108.235310>
16. Yesilgul U., Urgan F., Sakiroğlu S., Duque C., Mora-Ramos M., Kasapoglu E., Sari H., Sökmen I. The effect of magnetic field on the impurity binding energy of shallow donor impurities in a  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}$ /GaAs quantum well. *Nanoscale research letters*. 2012;7(1):586.  
<https://doi.org/10.1186/1556-276X-7-586>
  17. Abramov A. Magnetic-field effects on donor impurity states in a quantum well. *World Journal of Condensed Matter Physics*. 2012;(2):188–191.  
<https://doi.org/10.4236/wjcmp.2012.24031>
  18. López Aristizábal A.M., Mora Rey F., Morales Á.L., Vinasco J.A., Duque C.A. Electric and magnetic fields effects in vertically coupled GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As conical quantum dots. *Condens. Matter*. 2023;8(3):71.  
<https://doi.org/10.3390/condmat8030071>
  19. Yulchiev I.I. (2023). The analysis of the numerical calculation of shallow acceptor levels of AIII BV crystals in a magnetic field. *ISJ Theoretical & Applied Science*. 2023; 06(122):309–315.  
<https://doi.org/10.15863/tas.2023.06.122.50>
  20. Ivchenko E.L., Bakaleynikov L.A., Afanasyev M.M., Kalevich V.K. Spin-dependent recombination in GaAs<sub>1-x</sub>N<sub>x</sub> solid solutions in an inclined magnetic field. *Solid State Physics*. 2016;58(8):1490-1498. (In Russ.).

**Сведения об авторах**

**Уктам Рахимович Саломов**, д.ф.-м.н., профессор, Ферганский политехнический институт  
*E-mail*: uktam.salomov@polito.it  
*ORCID*: 0000-0001-9350-9284

**Носиржон Хайдарович Юлдашев**, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики, Ферганский политехнический институт  
*E-mail*: uzferfizika@mail.ru  
*ORCID*: 0000-0003-0226-3528  
*SPIN-код*: 6884-1461

**Ифтихоржон Исакович Юлчиев**, ассистент кафедры физики, Ферганский политехнический институт  
*E-mail*: iftixorjon.yulchiyev@gmail.com  
*ORCID*: 0000-0001-9346-0441  
*SPIN-код*: 1822-4708

**Information about authors**

**Uktam R. Salomov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor, Fergana Polytechnic Institute  
*E-mail*: uktam.salomov@polito.it  
*ORCID*: 0000-0001-9350-9284

**Nosirjon Kh. Yuldashev**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Professor of the Department of Physics, Fergana Polytechnic Institute  
*E-mail*: uzferfizika@mail.ru  
*ORCID*: 0000-0003-0226-3528  
*SPIN-код*: 6884-1461

**Iftikhorjon I. Yulchiev**, assistant of the department of physics, Fergana Polytechnic Institute  
*E-mail*: iftixorjon.yulchiyev@gmail.com  
*ORCID*: 0000-0001-9346-0441  
*SPIN-код*: 1822-4708

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

Поступила в редакцию 28.05.2024  
 После доработки 19.06.2024  
 Принята к публикации 21.06.2024

Received 28.05.2024  
 Revised 19.06.2024  
 Accepted 21.06.2024

**Оригинальная статья**

УДК 536.2(075)

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-28-36

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНОЙ СВЯЗАННОЙ  
ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРМОУПРУГОСТИ**

© 2024 г. А. В. Пашин, И. В. Кудинов, В. А. Кудинов, Е. В. Дубас, М. В. Ненашев

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

**Аннотация.** При постановке классической задачи связанной динамической термоупругости пользуются, как правило, квазистационарной или локально равновесной моделью, в которой изменения температуры по всему объему тела малы, деформация физически малого объема линейно зависит от перемещения. Связь переноса тепла с перемещением осуществляется добавлением в уравнение теплопроводности слагаемого, пропорционального скорости изменения деформации тела, а в волновое уравнение – слагаемого, пропорционального градиенту температуры. Один из основных недостатков этой модели – бесконечная скорость распространения температуры и деформации и не возможность описания быстрых процессов с большими амплитудами изменения температуры и перемещения. Используя модифицированные формулы эмпирических законов Фурье и Гука, в которых учитываются скорости изменения движущихся сил – причин (градиентов температур и перемещений) и их следствий (теплового потока и напряжения), получена математическая модель связанной динамической термоупругости в условиях теплового удара. Модель включает взаимосвязанную систему нелокальных уравнений теплопроводности и динамической термоупругости, в которой учитывается двухфазное запаздывание в тепловой и термоупругой задачах, а также сопротивление среды процессу изменения ее формы в результате температурной деформации. Анализ полученного аналитического решения модели показал, что деформация и температура распространяются в среде с близкими по величине скоростями.

**Ключевые слова:** связанная динамическая термоупругость, математическая модель, аналитическое решение, двухфазное запаздывание, модифицированные формулы Фурье и Гука, тепловой удар, волны температур и перемещений

**Для цитирования:** Пашин А.В., Кудинов И.В., Кудинов В.А., Дубас Е.В., Ненашев М.В. Математическая модель локально-неравновесной связанной динамической термоупругости. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):28–36. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-28-36](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-28-36)

**Original article**

**MATHEMATICAL MODEL OF LOCALLY NONEQUILIBRIUM COUPLED DYNAMIC  
THERMOELASTICITY**

© 2024 A. V. Pashin, I. V. Kudinov, V. A. Kudinov, E. V. Dubas, M. V. Nenashev

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

**Abstract.** When setting the classical problem of coupled dynamic thermoelasticity, as a rule, a quasi-stationary or locally equilibrium model is used, in which temperature changes throughout the entire volume of the body are small, the deformation of a physically small volume linearly depends on displacement. The connection of heat transfer with displacement is carried out by adding a term proportional to the rate of change of deformation of the body to the equation of thermal conductivity, and a term proportional to the temperature gradient to the wave equation. One of the main disadvantages of this model is the infinite velocity of temperature propagation and deformation and the inability to describe fast processes with large amplitudes of temperature change and displacement. Using modified formulas of empirical Fourier and Hooke laws, which take into account the rates

of change of moving forces – causes (temperature gradients and displacements) and their consequences (heat flux and stress), a mathematical model of coupled dynamic thermoelasticity under heat shock conditions is obtained. The model includes an interconnected system of nonlocal equations of thermal conductivity and dynamic thermoelasticity, which takes into account the dual-phase delay in thermal and thermoelastic problems, as well as the resistance of the medium to the process of changing its shape as a result of temperature deformation. The analysis of the obtained analytical solution of the model showed that deformation and temperature propagate in a medium with similar velocities.

**Keywords:** coupled dynamic thermoelasticity, mathematical model, analytical solution, two-phase delay, modified Fourier and Hooke formulas, heat stroke, temperature and displacement waves

**For citation:** Pashin A.V., Kudinov I.V., Kudinov V.A., Dubas E.V., Nenashev M.V. Mathematical model of locally nonequilibrium coupled dynamic thermoelasticity. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):28–36. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-28-36](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-28-36)

## Введение

Интенсивное развитие термоупругости связано с появлением в 1956 г. работы Био [1], в которой на основе законов термодинамики необратимых процессов были получены основные уравнения и сформулированы вариационные проблемы термоупругости.

В случае изменения температуры с достаточно малой скоростью задача термоупругости рассматривается как квазистатическая, то есть напряжения определяются в каждый отдельный момент времени нестационарного процесса без его связи с предшествующим изменением температуры и напряжений. Однако в работах В.И. Даниловской [2], Б. Боли и Дж. Уэйнера [3], Т. Мура [4], Е. Штернберга и И. Чакраворти [5], И. Игначака [6], В. Новацкого [7], А.Д. Коваленко [8] и др. было отмечено, что при высокоскоростных нагревах в упругих средах возникают кратковременные температурные (динамические) напряжения, зависящие от физических свойств среды и условий теплообмена. Так, в работе [2] было показано, что при тепловом ударе возникает термоупругая волна, распространяющаяся со скоростью звука в данной среде. На фронте волны имеет место скачок (разрыв) напряжений, быстро затухающий в данной точке пространства с течением времени.

В настоящее время существует много так называемых модифицированных или обобщенных моделей связанной и несвязанной задач термоупругости. В обзоре [9] перечислены наиболее часто встречающиеся в литературе модели и содержатся теории, формулировки, реальные ограничения и используемые методы решения уравнений для различных геометрий и нагрузок. В последнее время развивается теория Грина-Линдсея, в которой используются скорость распространения температуры и два времени релаксации, при этом классический закон Фурье теплопроводности принимается неизменным, а классическое уравнение энергии и связь

между напряжениями и деформациями с учетом температуры модифицируются. В рамках этой теории в работах [10; 11] представлены результаты анализа численного моделирования двух задач связанной термоупругости: сходимости, устойчивости и погрешности метода конечных элементов. В работе [12] показано, что теория Грина-Линдсея более эффективна для определения явления распространения волн, чем классическая теория. Работа [13] содержит решение уравнения, описывающего термоупругость в пластине на основе модели Грина-Линдсея. Исследована экспоненциальная устойчивость двух различных систем для задачи Коши. В рамках классической теории в работе [14] решена задача о температурном воздействии на толстостенную двухслойную цилиндрическую оболочку с шарнирно закрепленным и свободным торцами. Приведен сравнительный анализ расчетов с учетом и без учета неоднородности и нелинейного характера деформации бетона. Подобная задача решена численно в работе [15], где в качестве граничных условий были выбраны условия Дирихле и Коши. Задача решена численно. В работе [16] построено замкнутое решение связанной нестационарной задачи термоэлектроупругости для длинного пьезокерамического цилиндра с радиальной поляризацией, когда на его торцевых поверхностях выполняются граничные условия теплопроводности 1-го рода. В работе [17] учитывается связь более высокого порядка между градиентами температурных полей и градиентами полей деформации. В ряде работ [18 – 20] отмечается существенное отличие решений динамических задач термоупругости с учетом связанности полей деформации и температуры и без ее учета. Необходимо отметить, что в несвязанных задачах скачок напряжений остается неизменным, тогда как в связанных – быстро уменьшается во времени. Вопрос влияния времени установления граничных условий на величину динамических температурных напряжений

исследован в работе Э.М. Карташова и В.А. Кудинова [18].

В настоящей работе найдено аналитическое решение связанной задачи динамической термоупругости с использованием уравнений, полученных с учетом двухфазной релаксации в формулах законов Фурье и Гука. Цель работы состояла в получении аналитических соотношений, позволяющих выполнять оценку взаимного влияния, а также в определении скоростей движения тепловой и звуковой волн в условиях их связанности.

### Математическая постановка задачи

Рассмотрим вывод основных уравнений связанной динамической термоупругости с учетом релаксационных явлений в тепловой и упругой задачах. Уравнение теплового баланса в данном случае будет иметь вид [19]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} - A \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура, К;  $x$  – координата, м;  $t$  – время, с;  $q$  – внутренний источник теплоты, Вт/м<sup>3</sup>;  $u$  – перемещение, м;  $c$  – теплоемкость, кДж/(кг·К);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $A = (3\lambda_n + 2\mu_n)\alpha T_0$ ;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения, 1/К;  $T_0$  – начальная температура, К;

$\lambda_n = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$  и  $\mu_n = G = \frac{E}{2\nu+1}$  – постоянные Ламе, Н/м<sup>2</sup>;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль нормальной упругости, Н/м<sup>2</sup>;  $G$  – модуль сдвига, Н/м<sup>2</sup>.

Второе слагаемое правой части уравнения (1) характеризует внутренний источник теплоты, возникающий в результате деформации тела  $\varepsilon = \partial u / \partial x$  вследствие изменения его температуры. По сути, это слагаемое характеризует скорость изменения деформации тела, так как  $A \partial^2 u / (\partial x \partial t) = A \partial \varepsilon / \partial t$ .

Уравнение равновесия (движения) с учетом силы сопротивления среды имеет вид

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} - \rho \gamma \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – коэффициент сопротивления, 1/с.

Последнее слагаемое уравнения (2) характеризует сопротивление среды процессу изменения ее формы.

Уравнения эмпирических законов Фурье и Гука с учетом двухфазной релаксации будут иметь вид:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} - \tau_1 \frac{\partial q}{\partial t}; \quad (3)$$

$$\sigma = B \frac{\partial u}{\partial x} + Br_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} - \tau_2 \frac{\partial \sigma}{\partial t} - D \alpha T, \quad (4)$$

где  $B = \lambda_n + 2\mu_n$ ;  $D = 3\lambda_n + 2\mu_n$ ;  $\tau_1, \tau_2, r_1$  – времена релаксации, с.

Подставляя выражения (3) и (4) в зависимости (1), (2), находим:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \tau_1 \frac{\partial^2 q}{\partial x \partial t} - A \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t}; \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = B \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + Br_1 \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} - \tau_2 \frac{\partial^2 \sigma}{\partial x \partial t} - D \alpha \frac{\partial T}{\partial x} - \rho \gamma \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (6)$$

Выразим  $\partial q / \partial x$  и  $\partial \sigma / \partial x$  из уравнений (1) и (2) и подставим в зависимости (5), (6):

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \tau_1 c\rho \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - A \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} - \tau_1 A \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial t^2}; \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \rho \tau_2 \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} = B \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + Br_1 \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} - \rho \gamma \tau_2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - D \alpha \frac{\partial T}{\partial x} - \rho \gamma \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (8)$$

Краевые условия к уравнениям (7), (8) имеют вид

$$T(x, 0) = T_0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial T(x, 0)}{\partial t} = 0; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0; \quad (11)$$

$$T(\delta, t) = T_{ct}; \quad (12)$$

$$u(x, 0) = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial u(x, 0)}{\partial t} = 0; \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 u(x, 0)}{\partial t^2} = 0; \quad (15)$$

$$u(0, t) = 0; \quad (16)$$

$$\frac{\partial u(\delta, t)}{\partial x} = 0, \quad (17)$$

где  $\delta$  – толщина пластины;  $T_{ct}$  – температура пластины при  $x = \delta$ .

Соотношения (7) – (17) представляют математическую постановку задачи связанной динамической термоупругости для бесконечной пластины с симметричными граничными условиями первого рода (тепловой удар).

Обозначим:

$$\Theta = \frac{T - T_0}{T_{cr} - T_0}; \quad Fo = \frac{at}{\delta^2}; \quad \xi = \frac{x}{\delta}; \quad H = \frac{u}{\delta}, \quad (18)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности.

Задача (7) – (17) с учетом принятых обозначений будет иметь вид:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial Fo} + F_1 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Fo^2} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} - A_1 \frac{\partial^2 H}{\partial \xi \partial Fo} - F_1 A_1 \frac{\partial^3 H}{\partial \xi \partial Fo^2}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H}{\partial Fo^2} + F_2 \frac{\partial^3 H}{\partial Fo^3} = B_1 \frac{\partial^2 H}{\partial \xi^2} - B_1 F_3 \frac{\partial^3 H}{\partial \xi^2 \partial Fo} - \\ - F_2 F_4 \frac{\partial^2 H}{\partial Fo^2} - F_4 \frac{\partial H}{\partial Fo} - D_1 \frac{\partial \Theta}{\partial \xi}; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\Theta(\xi, 0) = 0; \quad (21)$$

$$\frac{\partial \Theta(\xi, 0)}{\partial Fo} = 0; \quad (22)$$

$$\frac{\partial \Theta(0, Fo)}{\partial \xi} = 0; \quad (23)$$

$$\Theta(1, Fo) = 1; \quad (24)$$

$$H(\xi, 0) = 0; \quad (25)$$

$$\frac{\partial H(\xi, 0)}{\partial Fo} = 0; \quad (26)$$

$$\frac{\partial^2 H(\xi, 0)}{\partial Fo^2} = 0; \quad (27)$$

$$H(0, Fo) = 0; \quad (28)$$

$$\frac{\partial H(1, Fo)}{\partial \xi} = 0; \quad (29)$$

где

$$F_1 = \frac{a\tau_1}{\delta^2}; \quad F_2 = \frac{a\tau_2}{\delta^2}; \quad F_3 = \frac{ar_1}{\delta^2}; \quad F_4 = \frac{\gamma\delta^2}{a}; \quad (30)$$

$$B_1 = \frac{B\delta^2}{a^2\rho}; \quad D_1 = \frac{Da\Delta T\delta^2}{a^2\rho}; \quad A_1 = \frac{A}{c\rho\Delta T};$$

$$\Delta T = T_{cr} - T_0.$$

### Точное аналитическое решение

Решение задачи (19) – (29) имеет вид

$$\Theta(\xi, Fo) = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{i=1}^5 G_n^i \exp(\omega_n^i Fo) \cos(\lambda_n \xi); \quad (31)$$

$$H(\xi, Fo) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{i=1}^5 C_n^i \exp(\omega_n^i Fo) \sin(\lambda_n \xi), \quad (32)$$

где  $\lambda_n = \frac{2n+1}{2}\pi$  – собственные числа краевой

задачи Штурма-Лиувилля;  $\omega_n^i$  – корни характеристического уравнения

$$b_1 \omega_n^5 + b_2 \omega_n^4 + b_3 \omega_n^3 + b_4 \omega_n^2 + b_5 \omega_n + b_6 = 0,$$

где  $b_1 = F_1 F_2$ ;  $b_2 = F_1 + F_2 + F_1 F_2 F_4$ ;

$$b_3 = 1 + (F_1 + F_2) F_4 + \lambda_n^2 (F_1 F_3 B_1 + F_2);$$

$$b_4 = \lambda_n^2 (1 + B_1 F_3 + B_1 F_1 + F_2 F_4 + D_1 A_1 F_1) + F_4;$$

$$b_5 = \lambda_n^2 B_1 + \lambda_n^4 B_1 F_3 + \lambda_n^2 F_4 + \lambda_n^2 D_1 A_1; \quad b_6 = \lambda_n^4 B_1;$$

$C_n^i$  и  $G_n^i$  – постоянные интегрирования, которые находятся из решения системы линейных уравнений:

$$\sum_{i=1}^5 C_n^i = 0; \quad (33)$$

$$\sum_{i=1}^5 C_n^i \omega_n^i = 0; \quad (34)$$

$$\sum_{i=1}^5 C_n^i \omega_n^{i^2} = 0; \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^5 G_n^i = (-1)^n \frac{2}{\lambda_n}; \quad (36)$$

$$\sum_{i=1}^5 G_n^i \omega_n^i = 0; \quad (37)$$

$$G_n^i = - \frac{F_2 \omega_n^{i^3} + (1 + F_2 F_4) \omega_n^{i^2} + (F_3 B_1 \lambda_n^2 + F_5) \omega_n^i + B_1 \lambda_n^2}{D_1 \lambda_n} C_n^i. \quad (38)$$

При решении системы уравнений (7) – (17) принимались следующие исходные данные:

$$\begin{aligned} T_{cr} = 600 \text{ К}; \quad c = 500 \text{ Дж/(кг·К)}; \quad \nu = 0,25; \\ E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}; \quad \rho = 7800 \text{ кг/м}^3; \quad \alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}; \\ \delta = 10^{-6} \text{ м}; \quad \gamma = 10^3 \text{ с}^{-1}; \quad a = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \tau_1 = 3,33 \cdot 10^{-14} \text{ с}; \\ \tau_2 = 2,00 \cdot 10^{-14} \text{ с}; \quad r_1 = 2,05 \cdot 10^{-14} \text{ с}. \end{aligned} \quad (39)$$

### Обсуждение результатов

Результаты расчетов перемещений и температур по формулам (31), (32) приведены на рис. 1 – 3. За характерный масштаб времени возьмем безразмерное время прохождения волны от точки с координатой  $\xi = 0$  до точки с координатой  $\xi = 1$ , определяемое графическим способом (рис. 1):  $t_u = 1,494 \cdot 10^{-4}$ .

Динамика изменения температуры и перемещения рассматривалась на двух временных масштабах: наносекундном  $Fo = 0 \div 4 \cdot t_u$  (от 0 до 0,60 нс); микросекундном  $Fo = 4900 \cdot t_u \div 5000 \cdot t_u$  (от 0,73 мкс до 0,75 мкс) На наносекундном временном отрезке анализ рис. 1 – 3 позволяет заключить, что после температурного удара (граничные условия первого рода (24)) между точками с координатами  $\xi = 1$  и  $\xi = 0$  движется скачок температуры с безразмерной скоростью  $v_\phi = \frac{1}{t_u} = 6993$ , а также с этой же скоростью движется скачок градиента переме-

щения  $\frac{\partial H}{\partial \xi}$  (рис. 3). Время прохождения скачков температуры через любую точку тела с координатой  $\xi$  (рис. 1) можно вычислить по следующим формулам:

$$Fo_1 = (4n+1-\xi)t_u; \quad Fo_2 = (4n+1+\xi)t_u;$$

$$Fo_3 = (4n+3-\xi)t_u; \quad Fo_4 = (4n+3+\xi)t_u, \quad (40)$$

где  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$  номер периода колебания.

При временах  $Fo \gg t_u$  решение (31) в среднем совпадает с классическим решением уравнения теплопроводности (рис. 4). При этом температура колеблется относительно решения классического параболического уравнения теплопроводности.

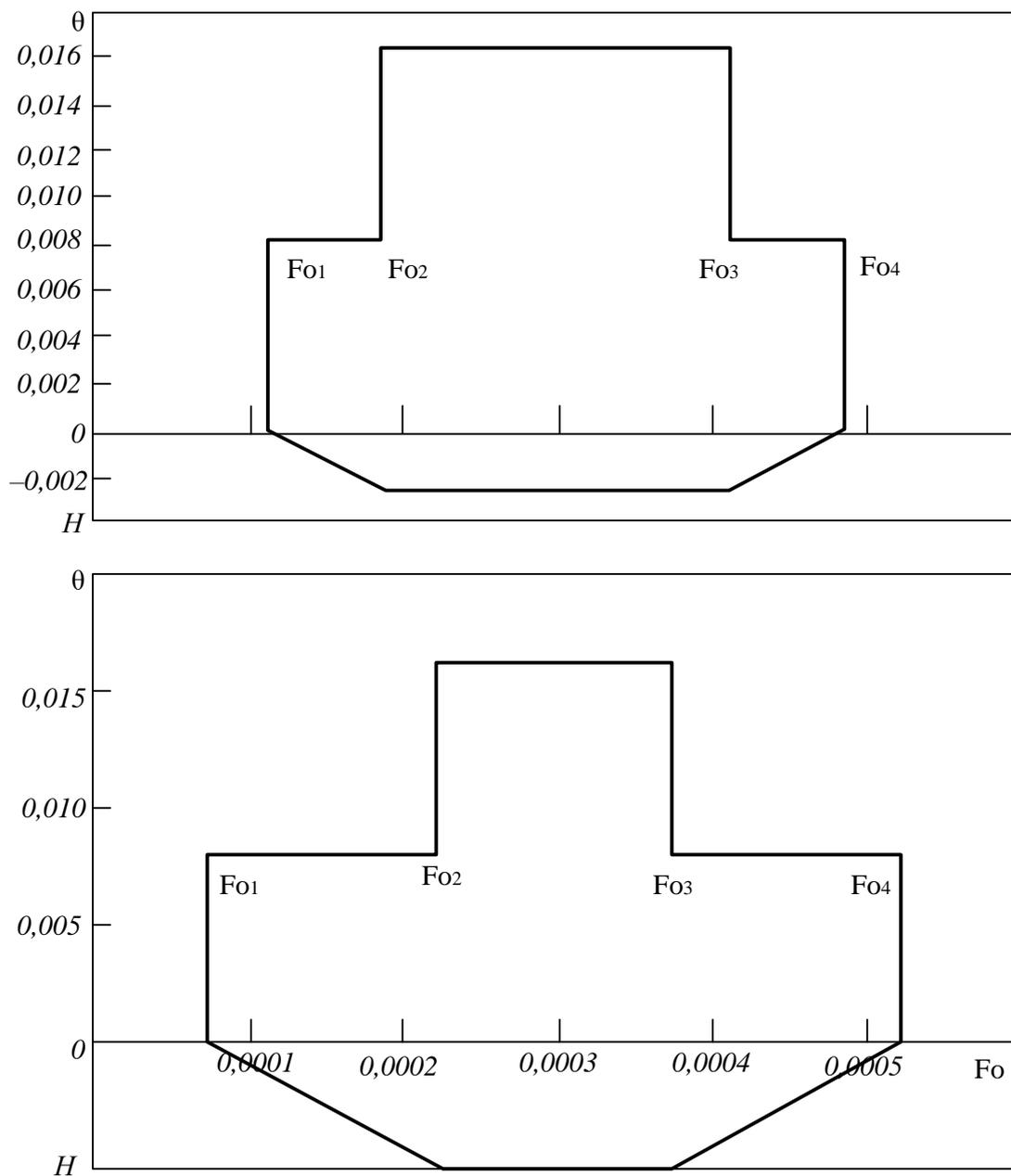


Рис. 1 Зависимость температуры (1) и перемещения (2) от времени в точках  $\xi = 0,25$  (а) и  $\xi = 0,5$  (б)  
 Fig. 1. Dependence of temperature (1) and displacement (2) from time to time at various points:  $\xi = 0,25$  (a) и  $\xi = 0,5$  (b)

**Выводы**

Предложена математическая модель связанной динамической термоупругости в условиях теплового удара с учетом пространственно-временной нелокальности в законах Фурье и Гука, а также сопротивления среды деформациям. Модель описывает физические процессы переноса тепла и распространения перемещений в пластине на нановременных масштабах с учетом их скачкообразного изменения. Для больших временных диапазонов полученное решение тепловой задачи в среднем

совпадает с решением классического параболического уравнения теплопроводности.

Анализ полученных решений показал, что скорости распространения перемещений и температурного фронта равны между собой и практически совпадают со скоростью распространения классической звуковой волны. Действительно, скорость звука равна  $v_{зв} = \sqrt{B_1} = 6667$ , а скорость, найденная из решения задачи связанной термоупругости, составляет  $v_{\phi} = 6693$ .

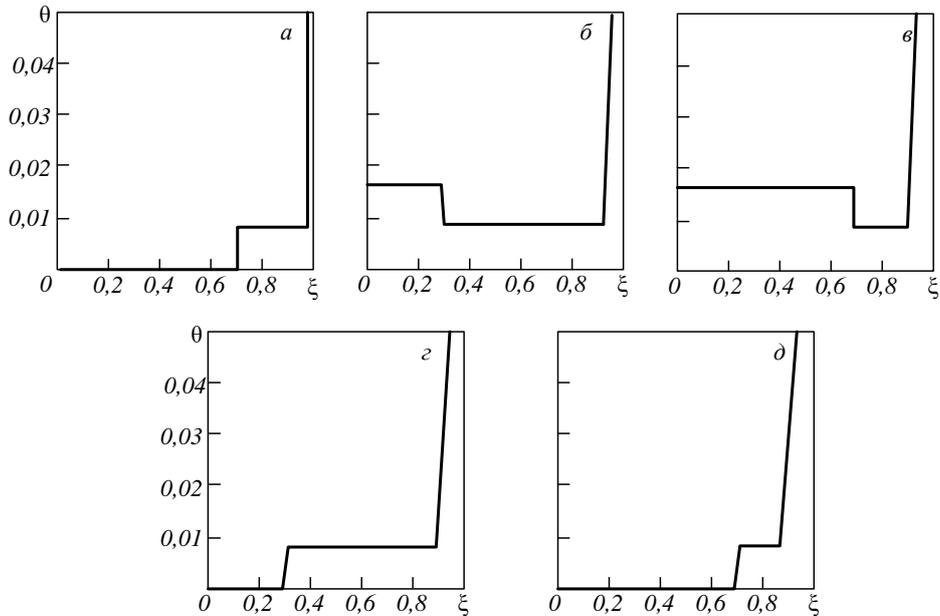


Рис. 2. Зависимость температуры от координаты в различные моменты времени:

$a - Fo = 0,3tu$ ;  $b - Fo = 1,3tu$ ;  $в - Fo = 2,3tu$ ;  $г - Fo = 3,3tu$ ;  $д - Fo = 4,3tu$

Fig. 2. Temperature dependence on the coordinate at different points in time:

$a - Fo = 0,3tu$ ;  $b - Fo = 1,3tu$ ;  $в - Fo = 2,3tu$ ;  $г - Fo = 3,3tu$ ;  $д - Fo = 4,3tu$

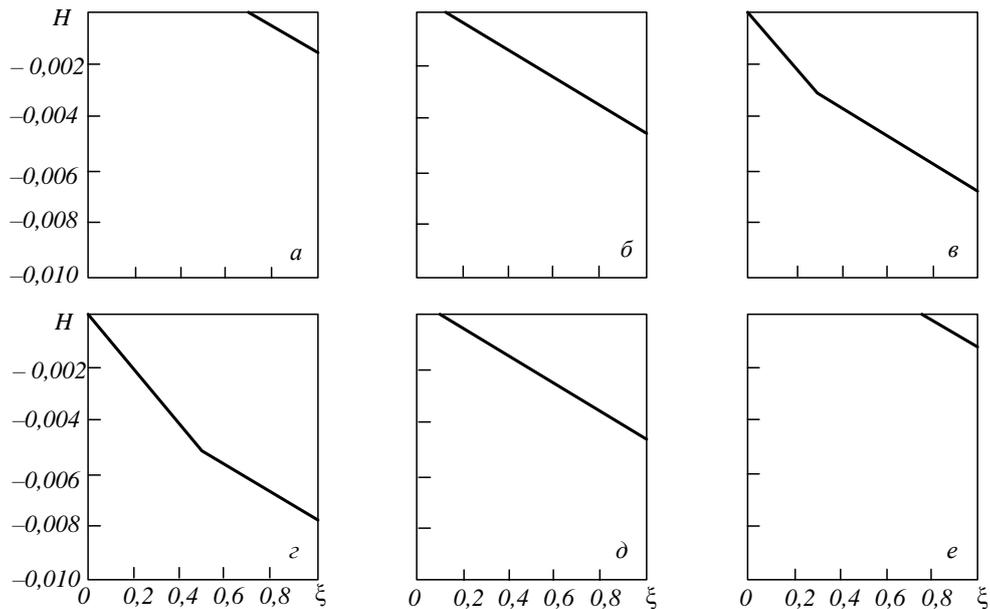


Рис. 3. Зависимость перемещения от координаты в различные моменты времени:

$a - Fo = 0,3tu$ ;  $b - Fo = 0,9tu$ ;  $в - Fo = 1,3tu$ ;  $г - Fo = 2,5tu$ ;  $д - Fo = 3,1tu$ ;  $е - Fo = 3,75tu$

Рис. 3. The dependence of the movement on the coordinate at different points in time:

$a - Fo = 0,3tu$ ;  $b - Fo = 0,9tu$ ;  $в - Fo = 1,3tu$ ;  $г - Fo = 2,5tu$ ;  $д - Fo = 3,1tu$ ;  $е - Fo = 3,75tu$

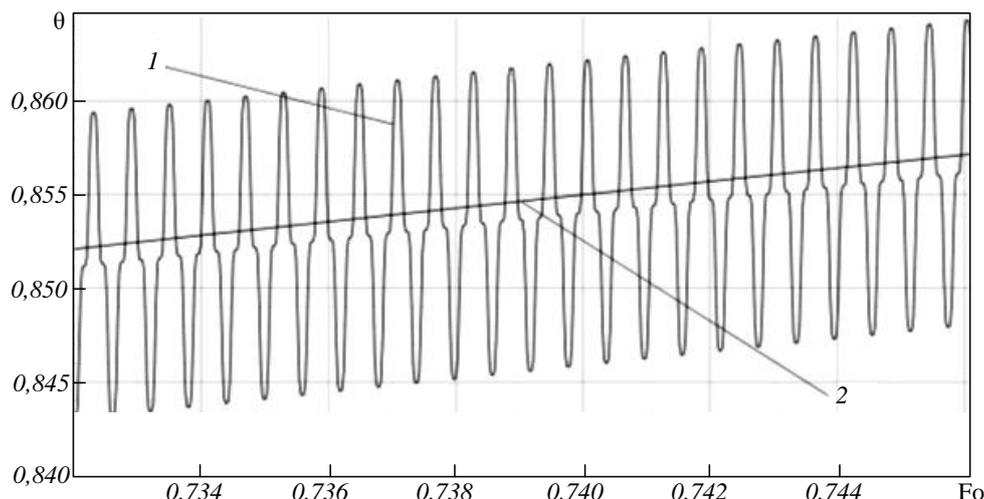


Рис. 4. Зависимость температуры от времени в точке  $\xi = 0,5$  в интервале  $Fo = 4900 \cdot t_u - 5000 \cdot t_u$   
 1 – решение задачи (19) – (29); 2 – решение классической задачи теплопроводности

Fig. 4. Temperature dependence on time at a point  $\xi = 0,5$  in the interval  $Fo = 4900 \cdot t_u - 5000 \cdot t_u$ . In the figure: graph 1 corresponds to the solution of the problem (19) – (29); graph 2 corresponds to the solution of the classical problem of thermal conductivity

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Biot M.A. Thermoelasticity and irreversible thermodynamics. *Journ. Appl. Phys.* 1956; 27(3):240–254.
2. Даниловская В.И. Температурные напряжения в упругом полупространстве, возникающие вследствие внезапного нагрева его границы. *Прикладная математика и механика.* 1950;14(3):317–318.
3. Боли Б., Уэйнер Дж. *Теория температурных напряжений.* Москва: Мир. 1964:517.
4. Mura T. Dynamical thermal stresses due to thermal shocks. *Res. Rept Meiji Univ. Fac. Eng.* 1956;(8):64–73.
5. Sternberg E., Chakravorti J.G. Thermal shock in an elastic body with a spherical cavity. *Quart. Appl. Math.* 1959;17(2):205–218.
6. Jgnaczak J. Thermal stresses in a long cylinder heated in a discontinuous manner over the lateral surface. *Arch. mech. stosow.* 1958;(10):25–32.
7. Новацкий В. *Динамические задачи термоупругости.* Москва: Мир, 1970:256.
8. Коваленко А.Д. *Введение в термоупругость.* Киев: Наукова Думка. 1965:202.
9. Shakeriaski F., Ghodrati M., Escobedo-Diaz J., Behnia M. Recent advances in generalized thermoelasticity theory and the modified models: a review. *Journal of Computational Design and Engineering.* 2021;8(1):15–35. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa082>
10. Bazzara N., Fernández J.R., Quintanilla R. Analysis of a strain-gradient problem arising in MGT thermoelasticity. *Journal of Thermal Stresses.* 2023;46(8):706–727. <https://doi.org/10.1080/01495739.2023.2211632>
11. Bazzara N., Fernández J.R., Quintanilla R. Analysis of two thermoelastic problems with the Green–Lindsay model. *Comp. Appl. Math.* 2023;42:196. <https://doi.org/10.1007/s40314-023-02335-5>
12. Shakeriaski F., Ghodrati M., Escobedo-Diaz J., Behnia M. Modified Green–Lindsay thermoelasticity wave propagation in elastic materials under thermal shocks. *Journal of Computational Design and Engineering.* 2021;8(1):36–54. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa061>
13. Ramón Quintanilla, Reinhard Racke, Yoshihiro Ueda. Decay for thermoelastic Green–Lindsay plates in bounded and unbounded domains. *Communications on Pure and Applied Analysis.* 2023;22(1):167–191. <https://doi.org/10.3934/cpaa.2022149>
14. Polyakova L., Andreev V. Solution of the problem of thermoelasticity for nonlinear elastic inhomogeneous thick-wall cylindrical shell. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2019;15(4):133–142. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2019-15-4-133-142>
15. Sharifi Torki H., Shahani A.R. Analytical Solution of the Coupled Dynamic Thermoelasticity Problem in a Hollow Cylinder. *Journal of Stress Analysis.* 2020; 5(1):121–134. <https://doi.org/10.22084/jrstan.2020.22464.1155>
16. Shlyakhin D.A., Kalmova M.A. Related thermoelastic elastomeric task for long cylinder. *AIP Conference Proceedings.* 2023; 2497:030009 <https://doi.org/10.1063/5.0103490>

17. Lurie S.A., Volkov-Bogorodskii D.B., Belov P.A. Analytical solution of stationary coupled thermoelasticity. *Problem for Inhomogeneous Structures. Mathematics.* 2022;10(1):90. <https://doi.org/10.3390/math10010090>
18. Карташов Э.М., Кудинов В.А. *Аналитические методы теории теплопроводности и ее приложений.* Москва: ЛЕНАНД, 2018:1072.
19. Kudinov I.V., Kudinov V.A., Gavrilova T.E. Mathematical modelling of thermal dynamic stresses on the basis of a dual-phase lag model. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2019;138:326–334. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.011>
20. Кудинов И.В., Кудинов В.А. Задачи динамической термоупругости на основе аналитического решения гиперболического уравнения теплопроводности. *Теплофизика высоких температур.* 2015;53(4):551–555. <https://doi.org/10.7868/S0040364415030102>. EDN: UDEVNN

#### REFERENCES

1. Biot M.A. Thermoelasticity and irreversible thermodynamics. *Journ. Appl. Phys.* 1956;27(3):240–254.
2. Danilovskaya V.I. Temperature stresses in an elastic half-space arising from sudden heating of its boundary. *Applied mathematics and mechanics.* 1950;14(3):317–318. (In Russ.).
3. Boli B., Weiner J. *Theory of temperature stresses.* Moscow: Mir, 1964;517. (In Russ.).
4. Mura T. Dynamical thermal stresses due to thermal shocks. *Res. Rept Meiji Univ. Fac. Eng.* 1956;(8):64–73.
5. Sternberg E., Chakravorti J.G. Thermal shock in an elastic body with a spherical cavity. *Quart. Appl. Math.* 1959;17(2):205–218.
6. Jgnaczak J. Thermal stresses in a long cylinder heated in a discontinuous manner over the lateral surface. *Arch. mech. stosow.* 1958;(10):25–32.
7. Novatsky V. *Dynamic problems of thermoelasticity.* Moscow: Mir, 1970;256. (In Russ.).
8. Kovalenko A.D. *Introduction to thermoelasticity.* Kiev: Naukova Dumka. 1965:202. (In Russ.).
9. Shakeriaski F., Ghodrati M., Escobedo-Diaz J., Behnia M. Recent advances in generalized thermoelasticity theory and the modified models: a review. *Journal of Computational Design and Engineering.* 2021;8(1):15–35. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa082>
10. Bazzarra N., Fernández J.R., Quintanilla R. Analysis of a strain-gradient problem arising in MGT thermoelasticity. *Journal of Thermal Stresses.* 2023;46(8):706–727. <https://doi.org/10.1080/01495739.2023.2211632>
11. Bazzarra N., Fernández J.R., Quintanilla R. Analysis of two thermoelastic problems with the Green–Lindsay model. *Comp. Appl. Math.* 2023;42:196. <https://doi.org/10.1007/s40314-023-02335-5>
12. Shakeriaski F., Ghodrati M., Escobedo-Diaz J., Behnia M. Modified Green–Lindsay thermoelasticity wave propagation in elastic materials under thermal shocks. *Journal of Computational Design and Engineering.* 2021;8(1):36–54. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa061>
13. Ramón Quintanilla, Reinhard Racke, Yoshihiro Ueda. Decay for thermoelastic Green–Lindsay plates in bounded and unbounded domains. *Communications on Pure and Applied Analysis.* 2023;22(1):167–191. <https://doi.org/10.3934/cpaa.2022149>
14. Polyakova L., Andreev V. Solution of the problem of thermoelasticity for nonlinear elastic inhomogeneous thick-wall cylindrical shell. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2019;15(4):133–142. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2019-15-4-133-142>
15. Sharifi Torki H., Shahani A.R. Analytical Solution of the Coupled Dynamic Thermoelasticity Problem in a Hollow Cylinder. *Journal of Stress Analysis.* 2020; 5(1):121–134. <https://doi.org/10.22084/jrstan.2020.22464.1155>
16. Shlyakhin D.A., Kalmova M.A. Related thermoelastic elastomeric task for long cylinder. *AIP Conference Proceedings.* 2023; 2497:030009 <https://doi.org/10.1063/5.0103490>
17. Lurie S.A., Volkov-Bogorodskii D.B., Belov P.A. Analytical solution of stationary coupled thermoelasticity. *Problem for Inhomogeneous Structures. Mathematics.* 2022;10(1):90. <https://doi.org/10.3390/math10010090>
18. Kartashov E.M., Kudinov V.A. Analytical methods of the theory of thermal conductivity and its applications. Moscow: LENAND, 2018:1072. (In Russ.).
19. Kudinov I.V., Kudinov V.A., Gavrilova T.E. Mathematical modelling of thermal dynamic stresses on the basis of a dual-phase lag model. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2019;138:326–334. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.011>
20. Kudinov I.V., Kudinov V.A. Problems of dynamic thermoelasticity based on the analytical solution of the hyperbolic thermal conductivity

equation. *Thermophysics of high temperatures*. 2015;53(4):551–555.  
<https://doi.org/10.7868/S0040364415030102>.

**Сведения об авторах**

**Алексей Владимирович Пашин**, старший преподаватель кафедры «Физика», Самарский государственный технический университет  
*E-mail*: pashinalexey@yandex.ru  
*ORCID*: 0000-0001-5084-0241  
*SPIN-код*: 3066-7711

**Игорь Васильевич Кудинов**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Физика», Самарский государственный технический университет  
*E-mail*: igor-kudinov@bk.ru  
*ORCID*: 0000-0002-9422-0367  
*SPIN-код*: 4122-0072

**Василий Александрович Кудинов**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой "Теоретические основы теплотехники и гидромеханика", Самарский государственный технический университет  
*E-mail*: totig@samgtu.ru  
*ORCID*: 0000-0002-3071-5168  
*SPIN-код*: 1534-6882

**Елена Владимировна Дубас**, старший преподаватель кафедры «Физика», Самарский государственный технический университет  
*E-mail*: dev575@mail.ru  
*SPIN-код*: 4784-2119

**Максим Владимирович Ненашев**, д.т.н., первый проректор – проректор по научной работе, Самарский государственный технический университет  
*E-mail*: nenashev.mv@samgtu.ru  
*ORCID*: 0000-0003-3918-5340

**Information about the authors**

**Alexey V. Pashin**, Senior lecturer at the Department of Physics, Samara State Technical University

*E-mail*: pashinalexey@yandex.ru  
*ORCID*: 0000-0001-5084-0241  
*SPIN-код*: 3066-7711

**Igor V. Kudinov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Physics, Samara State Technical University  
*E-mail*: igor-kudinov@bk.ru  
*ORCID*: 0000-0002-9422-0367  
*SPIN-код*: 4122-0072

**Vasily A. Kudinov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department "Theoretical Foundations of Thermal Engineering and Hydromechanics", Samara State Technical University  
*E-mail*: totig@samgtu.ru  
*ORCID*: 0000-0002-3071-5168  
*SPIN-код*: 1534-6882

**Elena V. Dubas**, Senior lecturer at the Department of Physics, Samara State Technical University  
*E-mail*: dev575@mail.ru  
*SPIN-код*: 4784-2119

**Maxim V. Nenashev**, Dr. Sci. (Eng.), First Vice-Rector-Vice-Rector for Scientific Work, Samara State Technical University  
*E-mail*: nenashev.mv@samgtu.ru  
*ORCID*: 0000-0003-3918-5340

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 04.06.2024  
После доработки 08.07.2024  
Принята к публикации 11.07.2024

Received 04.06.2024  
Revised 08.07.2024  
Accepted 11.07.2024

**Оригинальная статья**

УДК 691.175:533.9

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-37-45

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО  
НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

© 2024 г. А. Э. Юницкий, М. И. Цырлин

ЗАО «Струнные технологии» (Республика Беларусь, 220089, Минск, ул. Железнодорожная, 33)

**Аннотация.** В работе предложена концепция комплексного моделирования плазменного напыления покрытий на основе порошковых полимерных материалов. Представлено физико-математическое описание процесса путем разбивки его на несколько основных стадий, комплексного моделирования всех стадий плазменного напыления со сквозной передачей данных с одной стадии на другую. Процесс плазменного напыления был разбит на следующие стадии: генерация плазменной струи; ввод распыляемого порошка в плазменную струю, его нагрев и ускорение; взаимодействие плазменной струи и расплавленных частиц порошка с основанием. Температурное распределение открытой плазменной струи получено аппроксимацией экспериментальных данных для различных типов плазменных установок, конструкций плазмотронов и режимов их работы. Скорость частиц порошка определялась с учетом закона Ньютона. Прогрев, плавление полимерных частиц при движении в высокотемпературной газовой струе было сведено к решению дифференциального уравнения теплопроводности Фурье-Кирхгофа в сферических координатах. Формирование полимерного слоя при плазменном осаждении представлено с помощью выражения Мадежски. Результатом моделирования плазменного процесса является информация о характере деформирования расплавленных частиц порошка при соударении с основанием, толщине осажденного покрытия, его пористости, прочности адгезионного соединения и др. Разработанная компьютерная модель позволяет проводить оптимизацию технологических режимов нанесения плазменных полимерных покрытий. Программно-математический комплекс применен для исследования и оптимизации процесса напыления эпоксидных покрытий. При сравнении расчетных и экспериментальных данных сделан вывод об адекватности разработанной математической модели. Технология плазменного напыления порошковых полимерных покрытий предлагается для окраски крупногабаритных транспортных средств, в том числе струнного транспорта (юнимобилей), что невозможно традиционными методами порошкового напыления.

**Ключевые слова:** порошковые полимерные материалы, плазменные покрытия, математическое моделирование, стадии плазменного процесса, компьютерная модель

**Для цитирования:** Юницкий А.Э., Цырлин М.И. Математическое моделирование процесса плазменного напыления покрытий на основе порошковых полимерных материалов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;(4(50)):37–45. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-37-45](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-37-45)

**Original article**

**MATH MODELING OF PROCESS OF PLASMA SPRAYING OF COATINGS BASED ON  
POWDER POLYMER MATERIALS**

© 2024 A. E. Unitsky, M. I. Tsyrlin

Unitsky String Technologies, Inc. (33 Zheleznodorozhnaya St., Minsk, 220089, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper proposes the concept of complex modeling of plasma spraying of coatings based on powdered polymer materials. A physical and mathematical description of the process is presented by dividing it into several main stages, complex modeling of all stages of plasma spraying with end-to-end data transmission from one stage to another. The plasma spraying process was divided into the following stages: generation of a plasma jet; introduction of the sprayed powder into the plasma jet, its heating and acceleration; interaction of the plasma jet and molten powder particles with the base. The temperature distribution of the open plasma jet is obtained by approximating experimental data for various types of plasma installations, plasma torch designs and their operating modes. The velocity of the powder particles was determined taking into account Newton's law. The heating and melting of polymer particles during movement in a high-temperature gas jet was reduced to solving the Fourier-Kirchhoff differential equation of thermal conductivity in spherical coordinates. The formation of a polymer layer during plasma deposition is represented using the Madezhsky expression. The result of modeling the plasma process is information about the nature of deformation of molten powder particles upon impact with the base, the thickness of the deposited coating, its porosity, the strength of the adhesive compound, etc. The developed computer model makes it possible to optimize the technological modes of applying plasma polymer coatings. The software and mathematical complex is used to study and optimize the spraying process of epoxy coatings. When comparing the calculated and experimental data, a conclusion is made about the adequacy of the developed mathematical model. The technology of plasma spraying of powder polymer coatings is proposed for painting large-sized vehicles, including SkyWay transport (unimobiles), which is impossible by traditional powder spraying methods.

**Keywords:** powder polymer materials, plasma coatings, math modeling, plasma process stages, computer model

**For citation:** Unitsky A.E., Tsyrlin M.I. Math modeling of process of plasma spraying of coatings based on powder polymer materials. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;(4(50)):37–45. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-37-45](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-37-45)

## Введение

Плазменная технология – одна из перспективных технологий нанесения покрытий. Возможность одновременного раздельного и совместного, в том числе последовательного осаждения компонентов различной природы в плазменной струе – эффективный способ создания материалов и покрытий с уникальными свойствами [1; 2].

Получение высококачественных плазменных полимерных покрытий (рис. 1) с заданными свойствами связано с оптимизацией технологии напыления, которая, в основном, осуществляется чисто экспериментальным путем. Из-за сложности и многочисленности физико-химических, механических и других процессов, протекающих в системе плазмотрон – плазма – полимер – основа, из-за их тесной взаимозависимости приобретает важное значение разработка математической модели процесса плазменного напыления порошковых полимерных материалов с программной реализацией.

Отсутствие данных о воздействии плазменной струи на процессы структурирования и термоокислительной деструкции полимеров, о влиянии компонентного состава и технологических параметров плазменного процесса на эксплуатационные свойства покрытий ограничивает их практическое использование. В связи с этим проведение исследований в данном направлении является актуальным; полученные результаты позволят совершенствовать технологию форми-

рования плазменных покрытий на основе дисперсных полимеров.

Имеется значительное количество работ, посвященных исследованию взаимодействия дисперсных материалов с плазменными струями, но эти работы либо касаются неорганических материалов [3 – 5], либо ограничиваются решением задач моделирования только отдельных стадий процесса плазменной переработки полимерных материалов с чисто математическим их описанием без конкретной программной реализации [6 – 8].

Целью настоящей работы являлась разработка компьютерной модели плазменного процесса формирования покрытий из дисперсных полимеров с компьютерной реализацией.

## Концепция комплексного моделирования процесса плазменного напыления покрытий из порошковых полимерных материалов

В основу разработки математической модели положены:

- разбивка плазменного процесса на несколько основных стадий;
- комплексное моделирование всех стадий плазменного напыления со сквозной передачей данных с одной стадии на другую;
- математическое описание явлений, связанных с генерацией плазмы, струйным течением, взаимодействием дисперсного материала с потоком высокотемпературного газа и плазмы, уда-

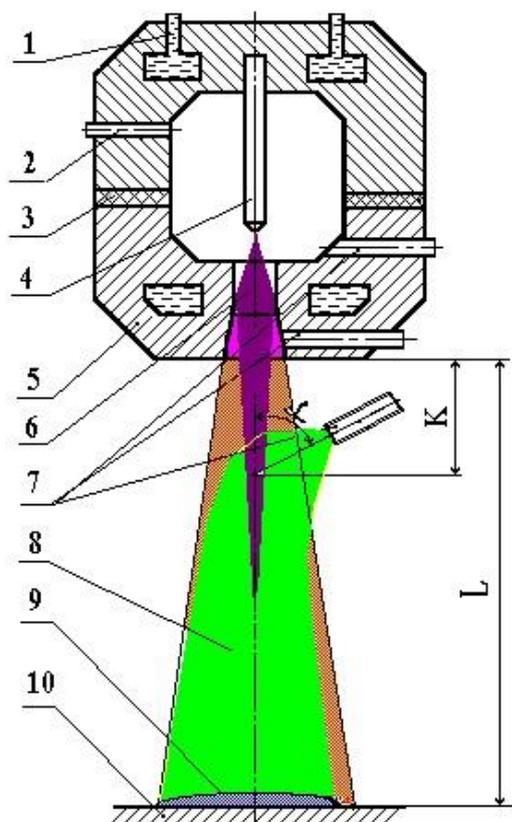


Рис. 1. Схема плазменного процесса нанесения полимерных покрытий:

1 – водяное охлаждение; 2 – ввод плазмообразующего газа; 3 – электроизоляционный блок; 4 – катод плазматрона; 5 – анод плазматрона; 6 – плазменная струя; 7 – ввод напыляемого порошка; 8 – плазменная струя с нагретым порошком; 9 – покрытие; 10 – напыляемое изделие (основание); K – дистанция ввода полимера в плазменную струю; L – дистанция напыления;  $\alpha$  – угол ввода полимерных частиц в плазменную струю

Fig. 1. Scheme of the plasma process for applying polymer coatings:

1 – water cooling; 2 – input of plasma-forming gas; 3 – electrical insulating block; 4 – plasmatron cathode; 5 – plasma torch anode; 6 – plasma jet; 7 – input of sprayed powder; 8 – plasma jet with heated powder; 9 – coating; 10 – sprayed product (base); K – distance where the polymer is introduced into the plasma jet; L – spraying distance;  $\alpha$  – angle of introduction of polymer particles into the plasma jet

ром индивидуальных частиц с основой, формированием из них осажденного слоя;

- учет при моделировании температурных зависимостей свойств плазмообразующих газов и материала покрытий;

- интеграция в состав модели баз данных свойств веществ, участвующих в процессе напыления, технологических режимов, параметров оборудования и другой информации, необходимой для комплексного моделирования;

- введение в состав модели элементов экспертных систем для анализа результатов исследований и выбора наиболее оптимальных режимов изучаемых процессов.

Функционально процесс плазменного напыления (согласно технологическим особенностям) может быть разбит на следующие стадии:

- генерация плазменной струи;
- ввод распыляемого порошка в плазменную струю, его нагрев и ускорение;
- взаимодействие плазменной струи и расплавленных частиц порошка с основанием (рис. 2).

Предпосылками для комплексного моделирования указанных процессов является обеспечение возможности сквозной передачи данных с одной стадии на другую и общность их структуры. Исходя из этого, входными данными для 1-ой стадии процесса взяты: тип установки, энергетические параметры, конструкция плазматрона, состав, температура и расход плазмообразующего газа на входе в плазматрон; на выходе стадии генерации – распределение температур и скорости струи на участке от среза плазматрона до основания.

Данные о температуре, скорости плазменной струи вместе с информацией о природе осаждаемых частиц, их дисперсности и расходе, дистанции ввода и напыления – входные для 2-ой стадии процесса. На выходе этой стадии – массив данных о распределении во времени и пространстве температур, скорости частиц и плазмообразующего газа.

Входные данные для 3-ей стадии процесса: материал основания и его свойства, длительность осаждения и скорость или закон перемещения плазматрона, а также выходные данные 2-ой стадии процесса. Результатом моделирования плазменного процесса является информация о характере деформирования расплавленных частиц порошка при соударении с основанием, толщине осажденного покрытия, его пористости, прочности адгезионного соединения и др.

При такой схеме реализуется сквозная передача данных от одной стадии процесса к другой и их динамическое изменение при вычислениях. Информация, общая для всех стадий моделирования, включается в базу данных и используется каждой моделью по необходимости. В базе данных могут находиться также результаты промежуточных расчетов всех стадий процесса, что позволит при необходимости осуществлять независимое исследование какой-то отдельной стадии с использованием данных предыдущих расчетов, хранимых в базе данных.

### Физико-математическое описание основных стадий процесса

*Генерация плазменной струи.* Температурное распределение открытой плазменной струи получено аппроксимацией экспериментальных данных для различных типов плазменных установок, конструкций плазматронов и режимов их работы.



Рис. 2. Схема интегрированной математической модели процесса плазменного напыления покрытий из порошковых полимерных материалов

Fig. 2. Scheme of the integrated mathematical model of the process of plasma spraying of coatings from powder polymer materials

Осевая температура  $T_g$  плазменной струи на расстояниях более трех калибров определяется зависимостью

$$T_g = az^b, \quad (1)$$

где  $z$  – осевая координата;  $a, b$  – коэффициенты, зависящие от режимов работы установки (см. таблицу).

Радиальное распределение температуры на выходе из плазматрона определяется по выражению [9]:

$$\frac{T_g(z, r)}{T_g(z, 0)} = \exp \left[ -\ln 2 \left( \frac{r}{R_T} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $r$  – радиальная координата;  $R_T$  – коэффициент, определяемый на основе экспериментальных данных (для установки УПУ-3Д  $R_T = z/3,38$ , для СВЧ “Фиалка”  $R_T = z/3,53$ ).

Скорость незагруженной плазменной струи составляет

$$w_g = w_{go} \frac{T_g}{T_{go}}, \quad (3)$$

где  $w_{go}$  – скорость газа в сечении ввода порошка в поток;  $T_{go}$  – температура газа в сечении ввода порошка в поток.

*Ввод частиц порошка в плазменную струю, их ускорение и нагрев.* Частица материала, попадая в поток газа, движется под действием на нее ряда сил. В общем виде уравнение движения частицы с учетом закона Ньютона имеет следующий вид [10]:

$$m_p \frac{dw_p}{dt} = F_a + F_p + F_g + F_v + F_T + F_m + F_m + F_B, \quad (4)$$

**Значения температурных коэффициентов  $a$  и  $b$**   
**Values of temperature coefficients  $a$  and  $b$**

Тип установки	Конструкция плазмотрона	Плазмообразующий газ	$a$	$b$
УПУ-3Д	ПП-25	азот	$492,5 + 2,57 \cdot I$	$-0,445 + 7,0 \cdot 10^{-5} \cdot I$
УПУ-3Д	модерниз.	азот	$1074 + 2,07 \cdot I$	$-0,314 - 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot I$
УПУ-3Д	ПП-25	аргон	$219 + 0,34 \cdot I$	$-0,619 - 9 \cdot 10^{-4} \cdot I$
УПУ-3Д	модерниз.	аргон	$284 + 1,94 \cdot I$	$-0,655 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot I$
СВЧ "Фиалка", $N_e = 5$ кВт	–	воздух	$84,21 + 5,41 \cdot 10^5 \cdot G_g$	$-0,79 + 540 \cdot G_g$
СВЧ "Фиалка", $N_e = 5$ кВт	–	азот	$117,5 + 5,62 \cdot 10^5 \cdot G_g$	$-0,75 + 502 \cdot G_g$
СВЧ "Фиалка", $N_e = 10$ кВт	–	воздух	$288,8 + 6,58 \cdot 10^5 \cdot G_g$	$-0,65 + 388 \cdot G_g$
СВЧ "Фиалка", $N_e = 10$ кВт	–	азот	$327,5 + 6,72 \cdot 10^5 \cdot G_g$	$-0,629 + 367 \cdot G_g$

Примечание:  $N_e$  – мощность установки;  $I$  – ток дуги плазмотрона;  $G_g$  – расход плазмообразующего газа.

где  $m_p$  и  $w_p$  – масса и скорость частицы порошка;  $F_a$  – сила аэродинамического сопротивления;  $F_p$  – сила, обусловленная градиентом давления в потоке;  $F_g$  – сила тяжести;  $F_v$  – сила, обусловленная инерцией вытесненной частицей объема газа;  $F_T$  – сила термофореза, обусловленная наличием температурного градиента в потоке;  $F_m$  – сила, отражающая ускорение прилегающих к поверхности частицы слоев газа;  $F_M$  – сила, обусловленная вращением частицы из-за градиента скорости обтекающего потока;  $F_B$  – сила, обусловленная нестационарностью процесса.

Основной из сил, действующих на частицу, является сила аэродинамического сопротивления

$$F_a = 0,5 C_D \ddot{S}_p \rho_g |w_g - w_p| (w_g - w_p), \quad (5)$$

где  $C_D$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $\ddot{S}_p$  – площадь сечения частиц порошка;  $w_p$  – скорость частиц порошка;  $\rho_g$  – плотность газа.

С учетом выражений (4) и (5) определяется скорость частиц и загруженного газового потока

$$w_p = w_g \sqrt{\frac{3\rho_g C_D}{2\rho_p d_p}}; \quad (6)$$

$$w_g' = \exp\left\{-\frac{G_g}{G_p} \sqrt{\frac{3\rho_g C_D z}{2\rho_p d_p}}\right\} w_{g0}, \quad (7)$$

где  $G_g$  – расход газа;  $G_p$  – расход частиц порошка;  $\rho_p$  – плотность частиц порошка.

Основными целевыми процессами, происходящими с напыляемым материалом в потоке при плазменном напылении, являются нагрев и при-

дание направленного движения. Кроме того, при напылении частицы дисперсной фазы активно взаимодействуют с окружающей средой. Теплообмен между частицей и несущим потоком газа осуществляется теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Исследование прогрева, плавления сферической частицы при ее движении в высокотемпературной газовой струе с известным полем скоростей и температур было сведено к решению дифференциального уравнения теплопроводности Фурье-Кирхгофа в сферических координатах:

$$\frac{\partial T_p(r, \tau)}{\partial \tau} = a_p \left( \frac{\partial^2 T_p(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_p(r, \tau)}{\partial r} \right); \quad (8)$$

здесь  $a_p$  – коэффициент температуропроводности частицы;  $r$  – текущий радиус частицы;  $\tau$  – время;  $T_p$  – температура частицы при начальных и граничных условиях

$$\begin{cases} T_p(r, 0) = T_0; \\ T_p(0, \tau) \neq \infty; \\ \frac{\partial T_p(0, \tau)}{\partial r} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

В этом случае имеем

$$-\frac{\partial T_p(r_p, \tau)}{\partial r} + \frac{q}{\lambda_p} = 0, \quad (10)$$

где  $r_p$  – радиус частицы;  $q = q_k + q_l$  – тепловой поток к частице за счет конвекции и лучистой энергии;  $\lambda_p$  – теплопроводность частиц порошка.

Величину конвективной составляющей полного теплового потока можно определить как

$$q_k = \alpha(T_s - T_p), \quad (11)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплообмена.

Лучистый тепловой поток, действующий на поверхность частицы от источника высокой энергии за счет рассеяния излучения на частицах, подаваемых в поток с начальной температурой  $T_0$ , определяется зависимостью [12]

$$q_l = \frac{Q_{\text{погл}}}{N_p F_p}, \quad (12)$$

где  $Q_{\text{погл}}$  – количество поглощенной лучистой энергии;  $N_p$  – количество частиц в потоке;  $F_p$  – площадь поглощающей поверхности частицы.

*Взаимодействие расплавленных частиц с основанием, формирование структуры покрытия.* Формирование полимерного слоя при плазменном осаждении происходит в вязкотекучем состоянии путем наложения отдельных частично или полностью расплавленных частиц друг на друга. Взаимодействие двухфазного потока частиц и нагретого газа с основанием и поверхностью формируемого материала сопровождается ударом, деформацией, растеканием, слиянием частиц и монолитизацией слоя.

Процесс формирования покрытия зависит от природы полимера, степени дисперсности, температуры, скорости, агрегатного состояния частиц при соударении, а также структуры и состава материала основы, состояния ее поверхности.

Растекание полимерных частиц наиболее полно описывается с помощью выражения Мадежски [13]

$$\frac{3\xi}{We} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\xi}{1,29} \right)^2 = 1, \quad (13)$$

где  $\xi = \frac{D}{d_p} = 0,613We^{0,39}$  – степень деформации частиц;  $D$  – диаметр диска после завершения деформации расплавленной частицы (сферы);  $d_p$  – диаметр частицы до удара;  $We = \rho_p w_p^2 d_p / \sigma$  – критерий Вебера;  $w_p$  – скорость частицы в момент удара;  $\sigma$  – поверхностное натяжение материала частицы в расплавленном состоянии;  $Re = \rho_p w_p d_p / \mu$  – критерий Рейнольдса;  $\rho_p$  – плотность материала частиц;  $\mu$  – динамическая вязкость расплава, зависящая от многих факторов (от температуры расплава и основы, шеро-

ховатости основы, присутствия добавок в полимерной смеси и др.).

С учетом выражений для критериев  $We$  и  $Re$  имеем

$$\frac{3\xi\sigma}{\rho_p w_p^2 d_p} + \frac{\mu}{\rho_p w_p d_p} \left( \frac{\xi}{1,29} \right)^2 = 1. \quad (14)$$

### Программная реализация модели плазменного напыления полимерных покрытий

Представленное выше физико-математическое описание теплофизических и газодинамических процессов, имеющих место при плазменном напылении порошковых полимерных материалов, практически реализовано в программно-математическом комплексе Plasma Spraying Process of Polymeric Materials (рис. 3). Он разработан с использованием объемно-ориентированной технологии программирования и состоит из нескольких модулей расчетов, в которых реализованы математические описания определенных стадий плазменного напыления.

Задача математического описания 1-ой стадии процесса напыления по определению температуры вдоль струи в работе решена с применением аппроксимации экспериментальных данных для различных типов установок, конструкций плазмотронов и режимов их работы.

Скорость частиц при движении в плазменной струе рассчитывалась с использованием уравнения (4), описывающего взаимодействие высокоскоростной плазменной струи с вводимыми в нее частицами порошка.

С учетом текущей координаты частиц и имеющегося в базе данных двумерного распределения скорости и температуры в незагруженной плазменной струе решалась задача нагрева порошка из условий конвективного и лучистого теплообмена с использованием дифференциального уравнения теплопроводности (8).

Поскольку прямой учет температурной зависимости свойств плазмообразующих газов, материалов покрытий аналитическим способом в качестве переменных при решении уравнений теплопроводности практически невозможен из-за резкого усложнения математической задачи, то эта проблема в модели была решена комплексным численно-аналитическим решением уравнений, описывающих процессы теплообмена и движения частиц порошка. Для этого траектория полета частиц разбивалась во времени или пространстве на  $n$  участков, где имеется незначительное изменение температуры. На каждом из участков осуществлялось аналитическое или численное решение уравнений при условии постоянства теплофизических свойств. Протяжен-

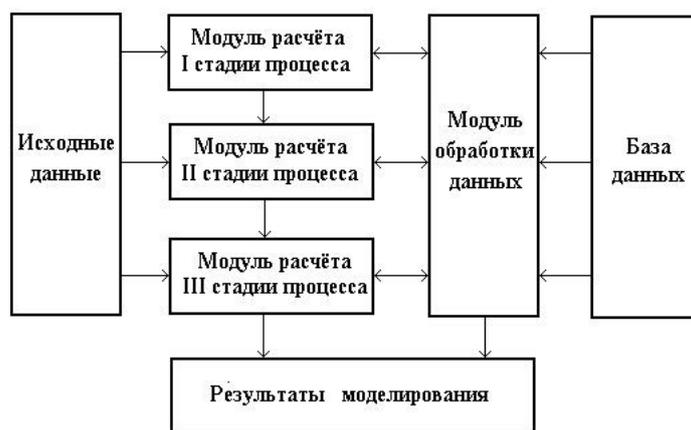


Рис. 3. Структурная схема программно-математического комплекса моделирования плазменного напыления порошковых полимерных материалов

Fig. 3. Block diagram of the software-mathematical complex for modeling plasma spraying of powder polymer materials

ность участков выбиралась в зависимости от градиента температуры. Расчеты осуществлялись пошагово. При этом в качестве начальных условий и входных параметров расчета на участке  $n + 1$  использовались результаты расчета на участке  $n$ . В результате расчетов 2-ой стадии процесса напыления определялась координата попадания каждой частицы на основание, ее температура и скорость в момент столкновения.

Считая, что частицы перед попаданием на основание имеют шарообразную форму и находятся в жидком или размягченном состоянии, устанавливалась взаимосвязь между их начальной формой и формой после попадания на поверхность с использованием выражения (13). В модели, описывающей 3-ю стадию процесса, осуществляется также геометрическое описание наложения частиц друг на друга при столкновении с основанием, образование пор, формирование рельефа поверхности покрытия с расчетом пористости. С включением ряда экспериментальных зависимостей возможна оценка физико-механических, защитных и других свойств покрытий.

Для подготовки аппроксимационных зависимостей использован пакет программ Statgraph. Программное описание процесса плазменного напыления разработано в среде Foxpro.

В состав компьютерной модели входят базы данных свойств различных веществ, которые могут быть использованы при моделировании разных вариантов процесса напыления (плазмообразующие газы, материалы покрытий, оснований), и их температурные зависимости в виде аппроксимационных уравнений. Эти данные при необходимости подключаются к моделям расчетов.

Программно-математический комплекс применен для исследования и оптимизации процесса нанесения плазменных эпоксидных покрытий. Установлен немонотонный характер зави-

симости пористости эпоксидных покрытий от технологических режимов напыления. При сравнении расчетных и экспериментальных данных (рис. 4 и 5) сделан вывод об адекватности разработанной математической модели плазменного процесса формирования покрытий из дисперсных полимеров.

Технология плазменного напыления порошковых эпоксидных покрытий предлагается для окраски крупногабаритных транспортных средств, в том числе струнного транспорта (юнимобилей), что невозможно традиционными методами порошкового напыления [14 – 16].

### Выводы

В работе было составлено физико-математическое описание процесса плазменного напы-

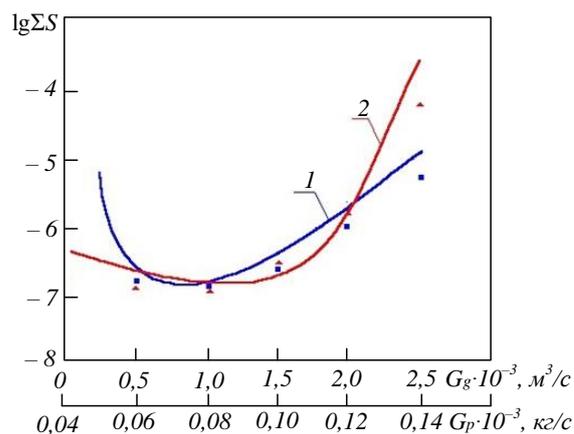


Рис. 4. Зависимость пористости эпоксидного покрытия от расхода плазмообразующего газа (1, ■) и порошка (2, ▲): ———— результаты моделирования; ■, ▲ — эксперимент

Fig. 4. Dependence of the porosity of the epoxy coating on the consumption of plasma-forming gas (1, ■) and powder (2, ▲): ———— simulation results; ■, ▲ – experiment

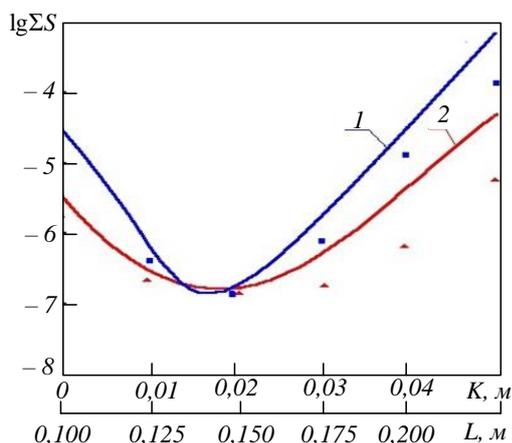


Рис. 5. Зависимость пористости эпоксидного покрытия от дистанции ввода полимера в плазменную струю (1, ■) и дистанции напыления (2, ▲):  
 ————— результаты моделирования; ■, ▲ — эксперимент

Fig. 5. Dependence of the porosity of the epoxy coating on the distance of introduction of the polymer into the plasma jet (1, ■) and the spraying distance (2, ▲):  
 ————— simulation results; ■, ▲ – experiment

ления покрытий на основе порошковых полимерных материалов путем разбивки плазменного процесса на несколько основных стадий; комплексного моделирования всех стадий плазменного напыления со сквозной передачей данных с одной стадии на другую; математического описания явлений, связанных с генерацией плазмы, струйным течением, взаимодействием дисперсного материала с потоком высокотемпературного газа и плазмы, ударом индивидуальных частиц с основанием и формированием из них осажденного слоя. С учетом выполненного описания разработана компьютерная модель, позволяющая проводить оптимизацию технологических режимов нанесения плазменных полимерных покрытий. Программно-математический комплекс применен для исследования и оптимизации процесса напыления эпоксидных покрытий. Установлен немонотонный характер зависимости пористости эпоксидных покрытий от технологических режимов напыления. При сравнении расчетных и экспериментальных данных сделан вывод об адекватности разработанной математической модели.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудин, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко и др. Москва: Наука, 1990:408.
2. Лясников В.Н., Лясникова А.В., Дударева О.А. Плазменное напыление. Саратов: Изд-во СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2016:620.
3. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008:320.
4. Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громыко Г.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. Минск: Беларуская навука, 2011:357.
5. Meghwal A., Anupam A., Murty B.S., Berndt C.C., Kottada R.S., Fng A.S.M. Thermal spray high-entropy alloy coatings: a review. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2020;29:857–893.
6. Гильман А.Б. Воздействие низкотемпературной плазмы как эффективный метод модификации поверхности полимерных материалов. *Химия высоких энергий*. 2003;1:20–26.
7. Цырлин М.И., Родченко Д.А. Формирование сетчатой структуры термоотверждаемого полимера при плазменном осаждении. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук*. 1998;4:132–136.
8. Цырлин М.И. Математическое моделирование процесса нагрева полимерных частиц при плазменном напылении покрытий. В кн.: *Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственной деятельности, разработку экономичных и экологически чистых технологий: Тез. докл. 54 межд. научно-техн. конф.* 21-24 ноября 2000. Минск: БГПА; 2000:136.
9. Жуков М.Ф., Коротеев А.С. Теория термической электродуговой плазмы. Ч. 1. Методы математического исследования плазмы. Новосибирск: Наука, 1987:278.
10. Цветков Ю.В., Панфилов С.А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. Москва: Наука, 1980:359.
11. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Москва: Высшая школа, 1967:599.
12. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, 1970:659.
13. Madejsky J. Solidification of droplets on a cold surface. *Intern. J. Heat and Mass Transfer*. 1976;19:1009–1013.
14. Grover E. *Statistical methods for graphs*. 2017:29.
15. Цырлин М.И., Юницкий А.Э. Отверждение терморезистивных порошковых материалов с использованием низкотемпературной плазмы. В кн.: *Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Сб. научных трудов. В 2 кн. Кн. 1. Материаловедение*. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2022:268–275.
16. Spyrou E. Powder Coatings. *Chemistry and Technology*. Vincentz Network, 2012:380.
17. Kiil S. Anticorrosive Coatings. *Coat. Technol.* 2009;6:135–176.

## REFERENCES

1. *Plasma coated application* / V.V. Kudinov, P.Yu. Pekshev, V. E. Belashchenko, etc. Moscow: Nauka, 1990:408. (In Russ.).
2. Lyasnikov V.N., Lyasnikova A.V., Dudareva O.A. *Plasma spraying*. Saratov: Izd-vo SGTU im. Gagarina Yu.A. 2016:620. (In Russ.).
3. Puzryakov A.F. *Theoretical foundations of plasma spraying technology*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.Eh. Bauman, 2008:320. (In Russ.).
4. Il'yushenko A.F., Shevtsov A.I., Okovityi V.A., Gromyko G.F. *Processes of formation of gas-thermal coatings and their modeling*. Minsk: Belaruskaya navuka, 2011:357. (In Russ.).
5. Meghwal A., Anupam A., Murty B.S., Berndt C.C., Kottada R.S., Fng A.S.M. Thermal spray high-entropy alloy coatings: a review. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2020;29:857–893.
6. Gil'man A.B. Low-temperature plasma exposure as an effective method for modifying the surface of polymeric materials. *Khimiya vysokikh energii*. 2003;1:20–26. (In Russ.).
7. Tsyrlin M.I., Rodchenko D.A. Formation of a network structure of a thermosetting polymer by plasma deposition. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk*. 1998;4:132–136. (In Russ.).
8. Tsyrlin M.I. Mathematical modeling of the heating process of polymer particles during plasma spraying of coatings. In: *The contribution of university science to the development of priority areas of industrial and economic activity, the development of economical and environmentally friendly technologies: Thesis. doc. 54 international scientific and technical Conf. November 21 – 24, 2000*. Minsk: BGPA; 2000:136. (In Russ.).
9. Zhukov M.F., Koroteev A.S. *Theory of thermal electric arc plasma. Part 1. Methods of mathematical study of plasma*. Novosibirsk: Nauka, 1987:278. (In Russ.).
10. Tsvetkov Yu.V., Panfilov S.A. *Low-temperature plasma in recovery processes*. Moscow: Nauka, 1980:359. (In Russ.).
11. Lykov A.V. *Theory of thermal conductivity*. Moscow: Vysshaya shkola, 1967:599. (In Russ.).
12. Kutateladze S.S. *Fundamentals of heat transfer theory*. Novosibirsk: Nauka, 1970:659. (In Russ.).
13. Madejsky J. Solidification of droplets on a cold surface. *Intern. J. Heat and Mass Transfer*. 1976;19:1009–1013.
14. Tsyrlin M.I., Unitsky A.E. Curing of thermosetting powder materials using low-temperature plasma. *Modern methods and technologies for developing and processing of materials: coll. of scientific apers*. In 2 vol. V. 1. Materials Science. Minsk: FTI NAN Belarusi, 2022:268–275. (In Russ.).
15. Spyrou E. Powder Coatings. Chemistry and Technology. Vincentz Network, 2012:380.
16. Kiil S. *Anticorrosive Coatings*. Coat. Technol. 2009;6:135–176.

**Сведения об авторах**

**Анатолий Эдуардович Юницкий**, PhD in Transport, генеральный конструктор, Закрытое акционерное общество «Струнные технологии»

**E-mail:** a@unitsky.com

**ORCID:** 0000-0003-1574-3539

**Михаил Иосифович Цырлин**, к.т.н., ведущий специалист научно-исследовательского отдела, Закрытое акционерное общество «Струнные технологии»

**Email:** m.tsirlin@unitsky.com

**ORCID:** 0000-0002-2983-3255

**Information about the authors**

**Anatoli E. Unitsky**, PhD in Transport, General Designer, Unitsky String Technologies, Inc.

**E-mail:** a@unitsky.com

**ORCID:** 0000-0003-1574-3539

**Mikhail I. Tsyrlin**, Cand. of Tech. Sci. (Eng.), Leading Specialist of the Research Department, Unitsky String Technologies, Inc.

**Email:** m.tsirlin@unitsky.com

**ORCID:** 0000-0002-2983-3255

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 14.10.2024

После доработки 30.10.2024

Принята к публикации 01.11.2024

Received 14.10.2024

Revised 30.10.2024

Accepted 01.11.2024

**Оригинальная статья**

УДК 621.789:538.911

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-46-54

**ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ И ФАЗОВОГО СОСТАВА СПЛАВА АК15,  
ПОДВЕРГНУТОГО ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМУ ЛЕГИРОВАНИЮ И ОБРАБОТКЕ  
ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

© 2024 г. Ю. А. Шлярова, А. А. Серебрякова, В. В. Шляров, А. Н. Прудников,  
Д. В. Загуляев

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

**Аннотация.** Заэвтектические сплавы Al – Si играют важную роль в промышленности и в области износостойкости материалов. В работе исследуется заэвтектический сплав Al – 15 % Si, подвергнутый комбинированной обработке в различных режимах. Анализировали покрытия методами: сканирующая электронная микроскопия (СЭМ); просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ); рентгенофазовый анализ; измерение микротвердости. Экспериментальные данные показывают, что введение Al –  $Y_2O_3$  способствует улучшению как морфологических, так и механических характеристик композита. Фазовый анализ продемонстрировал разнообразие структур и размеров различных фаз в исследуемом материале. Важно отметить, что средняя микротвердость покрытия увеличилась в 1,5 раза по сравнению с подложкой, что указывает на успешное увеличение прочностных характеристик благодаря изменениям в структуре материала. Просвечивающая электронная микроскопия подтвердила, что кристаллические ячейки в основном состоят из  $Y_3Al_2$ , в то время как промежуточные слои сформированы  $Y_2Si_2O_7$ . Эти соединения, как известно, обладают повышенной термостойкостью и прочностью, что в значительной степени способствует улучшению эксплуатационных характеристик материала. Использование интенсивного импульсного электронного пучка привело к образованию многофазной субмикро- и нанокристаллической структуры в поверхностном слое. Такой процесс способствует значительному повышению микротвердости. В результате структура материала становится более устойчивой при нагрузках, что значительно увеличивает его долговечность и надежность в условиях эксплуатации. Эти результаты подтверждают целесообразность использования комбинированных методов неравновесной модификации поверхности материалов и изделий, которые могут существенно повысить производительность и эффективность использования таких материалов в различных сферах промышленности.

**Ключевые слова:** силумин Al – 15 % Si, электровзрывное легирование, микротвердость, электронно-пучковая обработка, сканирующая электронная микроскопия, просвечивающая электронная микроскопия, многофазная субмикро- и нанокристаллическая структура

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-29-00665, <https://rscf.ru/project/24-29-00665/>

**Для цитирования:** Шлярова Ю.А., Серебрякова А.А., Шляров В.В., Прудников А.Н., Загуляев Д.В. Изменение микротвердости и фазового состава сплава АК15, подвергнутого электровзрывному легированию и обработке электронным пучком. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;(4(50)):46–54. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-46-54](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-46-54)

**Original article**

**CHANGES IN MICROHARDNESS AND PHASE COMPOSITION OF AK15 ALLOY  
SUBJECTED TO ELECTROEXPLOSIVE ALLOYING AND ELECTRON BEAM  
PROCESSING**

© 2024 Yu. A. Shliarova, A. A. Serebryakova, V. V. Shlyarov, A. N. Prudnikov,  
D. V. Zaguliaev

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

**Abstract.** Hypereutectic Al – Si alloys play an important role in industry and in the field of wear resistance of materials. The paper investigates the hypereutectic alloy Al – 15 % Si, subjected to combined processing in various modes. Coatings were analyzed using the following methods: scanning electron microscopy (SEM); scanning electron microscopy (TEM); X-ray phase analysis; measurement of microhardness. Experimental data show that the introduction of Al –  $Y_2O_3$  improves both the morphological and mechanical characteristics of the composite. The phase analysis demonstrated a variety of structures and sizes of different phases in the studied material. It is important to note that the average micro-strength of the coating increased by 1.5 times compared to the substrate, which indicates a successful increase in strength characteristics due to changes in the structure of the material. Transmission electron microscopy confirmed that the crystalline cells mainly consist of  $Y_3Al_2$ , while the intermediate layers are formed by  $Y_2Si_2O_7$ . These compounds are known to have increased thermal stability and strength, which greatly contributes to improving the operational characteristics of the material. The use of an intense pulsed electron beam led to the formation of a multiphase submicro- and nanocrystalline structure in the surface layer. This process contributes to a significant increase in microhardness. As a result, the structure of the material becomes more stable under loads, which significantly increases its durability and reliability under operating conditions. These results confirm the expediency of using combined methods of non-equilibrium surface modification of materials and products, which can significantly increase the productivity and efficiency of using such materials in various fields of industry.

**Keywords:** silumin AK15, electroexplosive alloying, microhardness, electron beam processing, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, multiphase submicro- and nanocrystalline structure

**Финансирование:** The work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-00665, <https://rscf.ru/project/24-29-00665/>

**For citation:** Shliarova Yu.A., Serebryakova A.A., Shlyarov B.B., Prudnikov A.N., Zaguliaev D.V. Changes in microhardness and phase composition of AK15 alloy subjected to electroexplosive alloying and electron beam processing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;(4(50)):46–54. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-46-54](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-46-54)

## Введение

Изменение микротвердости и фазового состава металлов и сплавов под воздействием различных тепловых и механических процессов является одной из ключевых тем в области материаловедения и металлургии [1; 2].

Заэвтектические сплавы системы Al – Si, в частности, сплав АК15 (Al – 15 % Si), активно используются в аэрокосмической и автомобильной промышленности благодаря сочетанию низкой плотности и высокой прочности [3 – 6]. В последние годы активно используются неравновесные способы модификации поверхности металлических материалов, к одному из таких методов можно отнести электровзрывное легирование (ЭВЛ) [7 – 9]. Однако, как показали последние исследования, эффективным является комбинирование методов, например, ЭВЛ и обработка электронным пучком (ЭПО). Обработка электронным пучком позволяет создать высокий градиент температур с высокоскоростным охлаждением, при этом формируется уникальная ячеи-

стая структура, обладающая повышенными физико-механическими характеристиками [10 – 13].

В настоящей работе рассматриваются результаты исследования изменения микротвердости и фазового состава сплава Al – 15 % Si, подвергнутого электровзрывному легированию и обработке электронным пучком.

Целью работы является установление микротвердости и фазового состава сплава АК15 (Al – 15 % Si), подвергнутого комбинированной обработке, заключающейся в создании на поверхности сплава АК15 (Al – 15 % Si) системы покрытие (Al –  $Y_2O_3$ ) – подложка (Al – 15 % Si) и последующее ЭПО.

В связи с изложенным представленная работа является актуальной, поскольку направлена на изменение свойств сплава Al – 15 % Si комбинированной обработкой.

## Материалы и методика

В качестве материала исследования были использованы образцы силумина Al – 15 % Si. Элементный состав силумина (прибор Shimadzu

XRF-1800), мас. %: Si 15,9; Fe 0,24; Cu 0,07; Mn 0,005; Ni 0,005; Ti 0,006; Cr 0,001; V 0,013; Mg < 0,001; S 0,032; Pb < 0,001; Zn 0,021, остальное алюминий. Размеры образцов силумина 15×15×10 мм.

Электровзрывное легирование поверхности образцов осуществляли порошком  $Y_2O_3$  на установке ЭВУ 60/10 (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк) [14], при следующих параметрах:  $m(Al) = 0,0589$  г;  $m(Y_2O_3) = 0,0589$  г;  $U = 2,8$  кВ.

Облучение модифицированных электровзрывным методом образцов осуществляли на установке «СОЛО» [15], входящей в перечень объектов современной исследовательской инфраструктуры Российской Федерации (УНУ «УНИКУУМ» (<http://www.ckp-rf.ru/usu/434216/>) с использованием одноименного источника электронов в среде аргона особой чистоты (99,999 %) при давлении 35 МПа. Параметры облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов ( $E_s$ ) 25 Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульсов воздействия 150 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов 0,3 с<sup>-1</sup>, давление рабочего газа (аргон) в рабочей камере 0,02 Па.

Исследования микротвердости материалов осуществлялись на микротвердомере HVS 1000 по ГОСТ 9450 – 76. Масса нагрузки, действующая на пирамиду, составляла 50 г, время под нагрузкой 10 с. Значение микротвердости усреднялось по 30 измерениям с шагом 25 мкм.

Исследования структуры модифицированного слоя силумина осуществляли методами оптической (прибор  $\mu$ Vizo-MET-221), сканирующей (прибор Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей дифракционной (прибор JEOL JEM-2100 F) электронной микро-

скопии [14 – 19]. Фазовый состав модифицированного слоя изучали методами рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000).

### Результаты

Морфология поверхности сплава Al – 15 % Si показана на рис. 1. *а*, результат рентгенофазового анализа – на рис. 1. *б*. Пики указывают на то, что сплав в основном состоит из твердого раствора алюминия и частиц кремния. Структурное состояние данного материала характеризуется зернами эвтектики Al – Si (рис. 1, обл. 1), кристаллами первичного кремния (рис. 1, область 2), включениями пластинчатой (ленточной) формы, обогащенными атомами железа (рис. 1, область 3) и зернами твердого раствора на основе алюминия (рис. 1, область 4). Соотношение химических элементов в данных структурных составляющих силумина приведено в таблице. Методами рентгенофазового анализа установлено, что относительное содержание фаз алюминия и кремния в литом силумине составляет 51 и 49 мас. %.

Комбинированная обработка образцов литого силумина, сочетающая электровзрывное легирование и последующее облучение импульсным электронным пучком (ЭВЛ + ЭПО), приводит к кардинальным изменениям элементного и фазового составов и состояния дефектной субструктуры поверхностного слоя материала. Обработка комбинированным методом при  $E_s = 25$  Дж/см<sup>2</sup> сопровождается формированием рельефной структуры, характерное изображение которой приведено на рис. 2, *а*, *б*. При сравнительно больших увеличениях выявляется субструктура поверхностного слоя, сформированная зернами, размеры которых изменяются в пределах

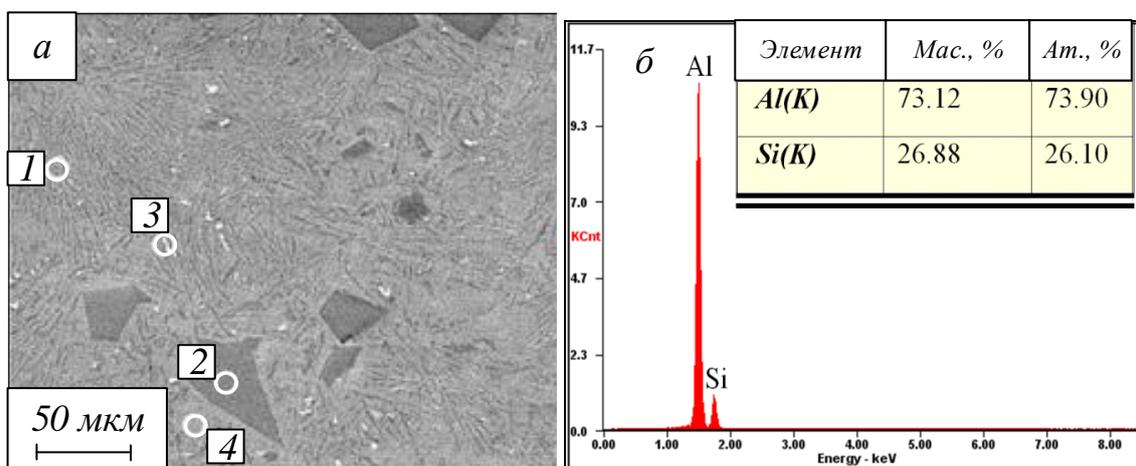


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина Al – 15 % Si в литом состоянии (*а*) и энергетические спектры (*б*), полученные с площади образца, изображение которой представлено на поз. *а*  
 Fig. 1. Electron microscopic image of the structure of silumin Al – 15 % Si in the cast state (*a*) and energy spectra (*b*) obtained from the sample area, the image of which is shown in fig. *a*

### Результаты микрорентгеноспектрального анализа образца силумина (рис. 3) The results of the microrentgenospectral analysis of the silumin sample (Fig. 3)

Элемент	Область анализа							
	1		2		3		С площади	
	мас. %	ат. %	мас. %	ат. %	мас. %	ат. %	мас. %	ат. %
O	28,69	68,59	47,73	67,28	17,54	32,35	23,77	51,12
Al	0,55	0,78	22,21	18,57	40,2	43,95	16,0	20,4
Si	0	0	0	0	7,86	8,25	3,0	3,68
Ti	0,51	0,41	30,06	14,15	14,17	8,73	8,0	5,74
Y	70,25	30,22	0	0	20,23	6,71	49,24	19,06

0,4 – 0,7 мкм (рис. 2, в). Характерным элементом поверхностного слоя являются частицы сферической формы размерами 0,6 – 9,0 мкм (рис. 2, б, в). Можно предположить, что данные образования являются частицами порошка  $Y_2O_3$ .

При воздействии интенсивного импульсного электронного пучка с плотностью энергии 25 Дж/см<sup>2</sup> морфология покрытия претерпевает заметные изменения (рис. 3). Результаты исследований (микрорентгеноспектральный анализ), представленные на рис. 3 и в таблице, свидетельствуют о наличии в поверхностном слое областей, обогащенных атомами иттрия (рис. 3, обл. 1), атомами титана (рис. 3, обл. 2) и атомами титана и алюминия (рис. 3, обл. 3).

Методами рентгенофазового анализа установлено, что комбинированная обработка приводит к формированию в поверхностном слое многофазной структуры, а именно: Al (твердый раствор на основе алюминия, 34 масс. %), TiAl (31 масс. %),  $Y_2O_3$  (26 масс. %),  $YAlO_3$  (9 масс. %).

Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии с использованием фольг проведены исследования структуры силумина в зависимости от расстояния от поверхности модифицирования. На рис. 4 приведено STEM изображение структуры поперечного сечения области 1, указанной на рис. 3.

При анализе рис. 4 можно сделать вывод о наличии многослойной структуры. В слое 1

наблюдается обогащение атомами иттрия, что свидетельствует о его значительной роли в формировании поверхности. Слой 2 содержит структуру включения, обогащенные атомами титана и атомами алюминия. Слой 3 включает атомы алюминия и также содержит включения, обогащенные атомами титана, кремния и железа. Подобная многослойная структура оказывает существенное влияние на формирование конечных механических характеристик обрабатываемого сплава [20].

Для более детального представления элементного состава структуры (рис. 4) ниже приведены количественные данные, которые отражают соотношение элементов в исследуемом участке фольги (в числителе и знаменателе: мас. и ат. %).

Содержание элемента, мас. % / ат. %						
O	Al	Si	Ti	Fe	Y	
<u>4,72</u>	<u>42,43</u>	<u>7,60</u>	<u>26,67</u>	<u>4,48</u>	<u>14,09</u>	
10,06	53,60	9,22	18,98	2,74	5,40	

Результаты анализа фазового состава участка фольги, расположенного на глубине 45 мкм от поверхности модифицирования, представлено на рис. 5. Основными элементами структуры являются зерна твердого раствора на основе алюминия, размеры которых изменяются в пределах 0,3 – 0,5 мкм (рис. 5, в) и зерна твердого раствора на основе титана размерами 0,10 – 0,25 мкм

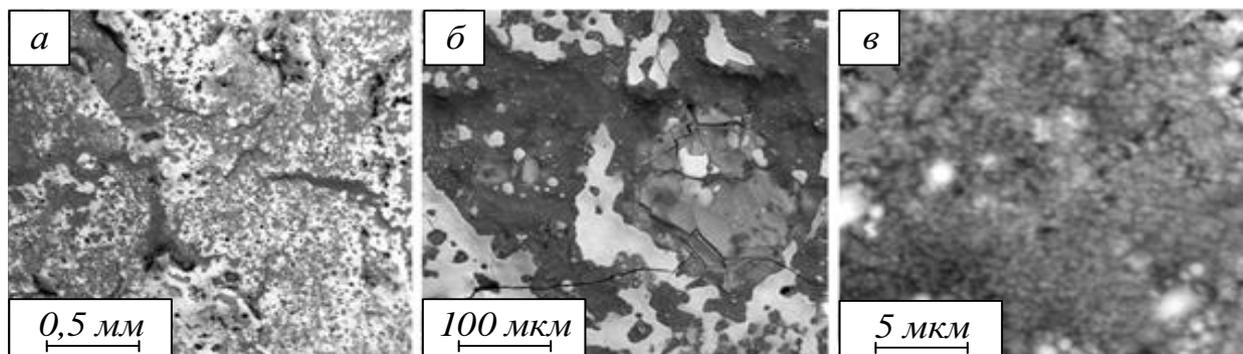


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке (плотность энергии пучка электронов 25 Дж/см<sup>2</sup>)

Fig. 2. Electron microscopic image of the surface structure of a silumin sample subjected to combined treatment (electron beam energy density of 25 J/cm<sup>2</sup>)

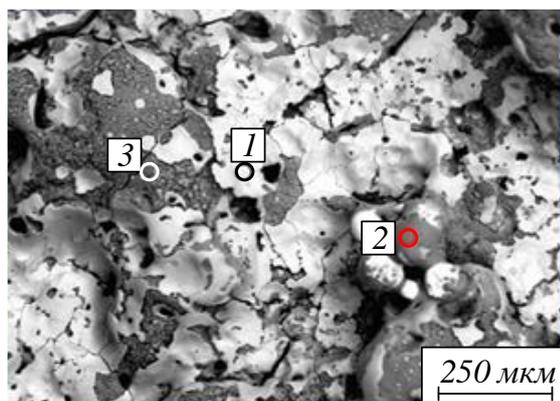


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке (плотность энергии пучка электронов 25 Дж/см<sup>2</sup>)

Fig. 3. Electron microscopic image of the surface structure of a silumin sample subjected to combined treatment (the energy density of the electron beam is 25 J/cm<sup>2</sup>)

(рис. 5, з). Данный слой содержит наноразмерные (10 – 40 нм) частицы оксидов титана, кремния и алюминия (рис. 5, з).

Распределение химических элементов в слое, расположенном на расстоянии 65 мкм от поверхности модифицирования, представлено на рис. 6. Наблюдается структура пластинчатой эвтектики, в которой пластины твердого раствора на основе алюминия чередуются с пластинами кремния. Одновременно с этим в зерне эвтектики присутствуют включения пластинчатой формы, обогащенные атомами железа (рис. 6, з). Таким образом можно заключить, что толщина модифицированного слоя участка образца не превышает 60 мкм.

Результаты измерения микротвердости показали, что микротвердость исходного сплава составляет порядка 51 HV, формирование системы покрытие (Al – Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/подложка (Al – 15 % Si) приводит к увеличению микротвердости поверхности в 1,6 раза и составляет 176,7 HV. Дополнительное облучение полученной системы электронным пучком также приводит к еще большему увеличению микротвердости до 286,3 HV. Таким образом можно утверждать, что комбинированная обработка является эффективным способом повышения прочностных характеристик исследуемого материала [21].

### Выводы

Процесс электровзрывного легирования силумина системы Al – 15 % Si с добавлением оксида иттрия, за которым последовала обработка интенсивным импульсным электронным пучком, способствовал образованию субмикро- и нанокристаллического слоя, который обогащен атомами иттрия и кислорода.

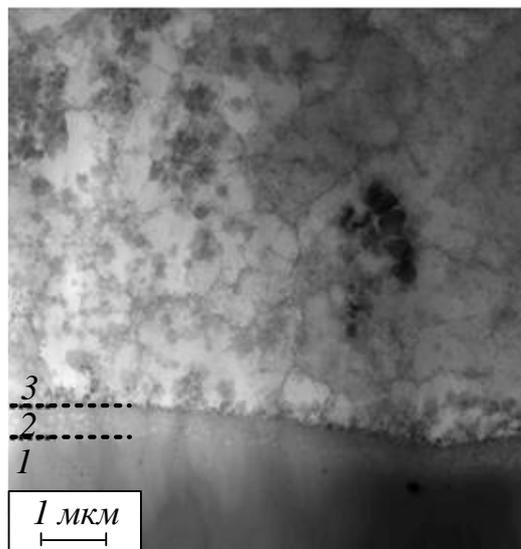


Рис. 4. STEM изображение структуры поперечного сечения области 1

Fig. 4. SEM image of the cross-sectional structure of area 1

Методами рентгенофазового анализа показано, что комбинированная обработка сопровождается формированием многофазного поверхностного слоя, основными фазами которого являются твердый раствор на основе алюминия, алюминид титана состава TiAl, оксид иттрия Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и оксиалюминид иттрия состава YAlO<sub>3</sub>.

Микротвердость после комбинированной обработки значительно повышается по сравнению с исходным состоянием материала: рост микротвердости в 5,6 раза при комбинации ЭВЛ + ЭПО с плотностью энергии пучка электронов 25 Дж/см<sup>2</sup>.

Полученные результаты открывают новые перспективы для применения модифицированных материалов в различных областях промышленности, где требуется высокая прочность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Н.А. *Фазовый состав алюминиевых сплавов*. Москва: Издательский Дом МИСиС, 2009;392.
2. Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. *Фазовый состав и структура силуминов*. Москва: МИСИС, 2008;282.
3. Бельский С.Е., Волчок И.П., Митяев А.А., Свидунович Н.А. *Производство алюминиевых сплавов: состояние и перспективы. Литье и металлургия*. 2006;26:130–133.
4. Дроздов А.А. *Алюминий. Тринадцатый элемент: энциклопедия*. Москва: Библиотека РУСАЛа, 2007;239.
5. Золоторевский В.С., Белов Н.А. *Металловедение литейных алюминиевых сплавов*. Москва: МИСиС, 2005;376.

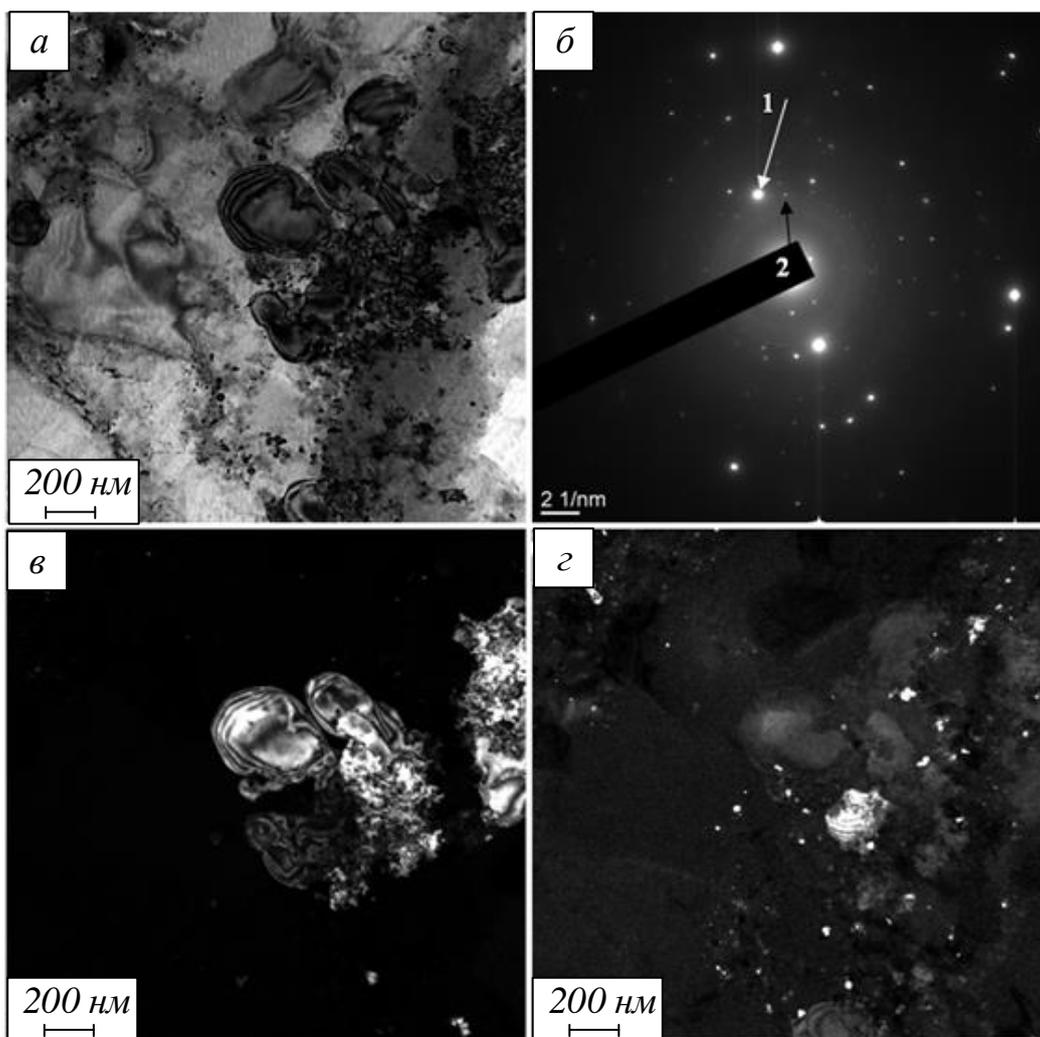


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя силумина, модифицированного комбинированным методом, расположенного на глубине 45 мкм:  
 а – светлое поле; б – микроэлектронграмма; в, г – темное поле, полученное в рефлексах  $[111]\text{Al} + [442]\text{SiO}_2$  (в),  $[002]\text{Ti} + [121]\text{Ti}_5\text{O}_9 + [131]\text{Al}_2\text{O}_3 + [342]\text{SiO}_2$  (г); на поз. б стрелками указаны рефлексы, в которых получено темное поле 1 для (в) и 2 для (г)

Fig. 5. Electron microscopic image of the structure of the silumin layer modified by the combined method, located at a depth of 45 microns:

а – light field; б – microelectronogram; в, г – dark field obtained in reflexes  $[111]\text{Al} + [442]\text{SiO}_2$  (в),  $[002]\text{Ti} + [121]\text{Ti}_5\text{O}_9 + [131]\text{Al}_2\text{O}_3 + [342]\text{SiO}_2$  (г); in pos. б the arrows indicate reflexes in which a dark field is obtained 1 for (в) and 2 for (г)

6. Javidani M., Larouche D. Application of cast Al-Si alloys in internal combustion engine components. *International Materials Reviews*. 2014;59(3):132–158.
7. Марукович Е., Стеценко В.Ю. Проблема модификации алюминиево-кремниевой эвтектики силуминов. Пути решения. *Литье и металлургия*. 2018;2:12–15.  
<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-2-12-15>
8. Samat S., Omar M.Z., Baghdadi A.H., Mohamed I.F., Aziz A.M. Mechanical properties and microstructures of a modified Al-Si-Cu alloy prepared by thixoforming process for automotive connecting rods. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;10:1086–1102.
9. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова и др.; под ред. А.П. Ласковнева. Минск: Беларус. Наука, 2013;287.
10. Sigworth G.K. The modification of Al-Si casting alloys: important practical and theoretical aspects. *International Journal of Metalcasting*. 2008;2(2):19–40.  
<https://doi.org/10.1007/BF03355425>
11. Stepanova E.N., Grabovetskaya G.P., Mishin I.P., Teresov A.P., Syrtanov M.S. Structure and mechanical properties of the Zr-Nb-H system alloys after pulsed electron beam exposure.

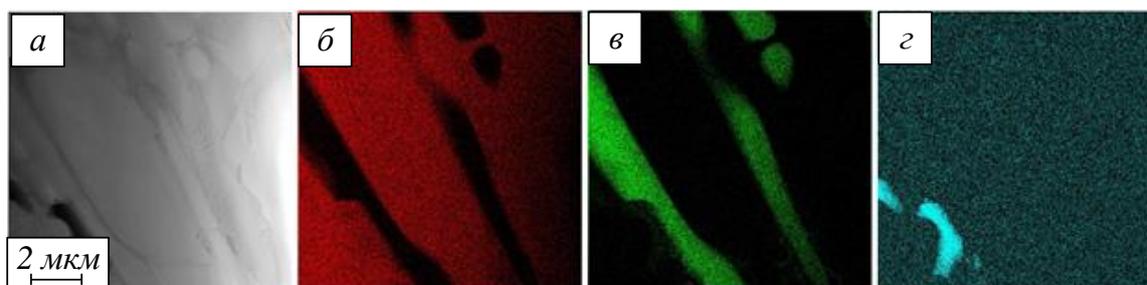


Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке, расположенного на глубине 65 мкм (а), и изображение участка (а), полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов алюминия (б), кремния (в) и железа (г)

Fig. 6. Electron microscopic image of the structure of the silumin sample layer, subjected to combined processing, located at a depth of 65 microns (a), and the image of the site (a) obtained in the characteristic X-ray radiation of aluminum (b), silicon (c) and iron (d) atoms

*AIP Conference Proceedings: Proceedings of the Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures*. 2018;251(1):020295.

<https://doi.org/10.1063/1.5083538>.

12. Bestetti M., Andrea L.H., Batuhan A., et al. Investigation on the properties of anodic oxides grown on aluminium-silicon alloys irradiated by pulsed electron beam. *Materials. Technologies. Design*. 2023;5(3(13)):109–122. [https://doi.org/10.54708/26587572\\_2023\\_5313109](https://doi.org/10.54708/26587572_2023_5313109)
13. Гэн Я., Панченко И.А., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Чен С. Влияние электронно-пучковой обработки на структуру аддитивного сплава Al – Mg. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;2(44):13–19. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-13-19](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19); EDN: HEJAEС.
14. Романов Д.А., Будовских Е.А., Жмакин Ю.Д., Громов В.Е. Опыт и перспективы использования электровзрывной установки ЭВУ 60/10 для модификации поверхности материалов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2011;(6):19–23. EDN: QCFHВХ.
15. *Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов* / Под общ. ред. Н.Н. Ковалея и Ю.Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016;312.
16. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016;196.
17. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer, 2014;717.
18. Fultz B., Howe J. *Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of materials, fourth edition*. Berlin: Springer, 2013;764.
19. Thomas J., Gemming T. *Analytical transmission Electron Microscopy*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014;348.
20. Liu Y.R., Zhang K.M., Zou J.X., Liu D.K., Zhang T.C. Effect of the high current pulsed electron beam treatment on the surface microstructure and corrosion resistance of a Mg-4Sm alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;741:65–75. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.227>
21. Zhang T.C., Zhang K.M., Zou J.X., Yan P., Yang H.Y., Song L.X., Zhang X. Surface microstructure and property modifications in a Mg-8Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy treated by high current pulsed electron beam. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;788:231–239. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.130>

#### REFERENCES

1. Belov N.A. *Phase composition of aluminum alloys*. Moscow: MISiS Publishing House, 2009:392. (In Russ.)
2. Belov N.A., Savchenko S.V., Hwang A.V. *Phase composition and structure of silumins*. Moscow: MISiS, 2008:282. (In Russ.)
3. Belsky S.E., Volchok I.P., Mityaev A.A., Svidunovich N.A. Production of aluminum alloys: status and prospects. *Casting and metallurgy*. 2006;2:130–133. (In Russ.)
4. Drozdov A.A. *Aluminum. The thirteenth element: encyclopedia*. Moscow: RUSAL Library, 2007:239. (In Russ.)
5. Zolotarevsky V.S., Belov N.A. *Metallurgy of foundry aluminum alloys*. Moscow: MISiS, 2005:376. (In Russ.)
6. Javidani M., Larouche D. Application of cast Al-Si alloys in internal combustion engine components. *International Materials Reviews*. 2014;59(3):132–158.
7. Marukovich E., Stetsenko V. The problem of modifying an aluminum-silicon eutectic alloy of silumins. Way of solutions. *Litiyo i Metallurgiya*. 2018;2:12–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-2-12-15>

8. Samat S., Omar M.Z., Baghdadi A.H., Mohamed I.F., Aziz A.M. Mechanical properties and microstructures of a modified Al–Si–Cu alloy prepared by thixoforming process for automotive connecting rods. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;10:1086–1102.
9. Laskovnev A.P., Ivanov Yu.F., Petrikova E.A. *Modification of the structure and properties of eutectic silumin by electron-ion-plasma treatment*. Minsk: Belarus Science, 2013:287. (In Russ.).
10. Sigworth G.K. The modification of Al-Si casting alloys: important practical and theoretical aspects. *International Journal of Metalcasting*. 2008;2(2):19–40.  
<https://doi.org/10.1007/BF03355425>
11. Stepanova E.N., Grabovetskaya G.P., Mishin I.P., Teresov A.P., Syrtanov M.S. Structure and mechanical properties of the Zr-Nb-H system alloys after pulsed electron beam exposure. AIP Conference Proceedings: Proceedings of the Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures: electronic collection, Tomsk, 01–05 октября 2018. Vol. 2051. Tomsk: AIP Publishing LLC, 2018;020295.  
<https://doi.org/10.1063/1.5083538>
12. Bestetti M., Andrea L. H., Batuhan A. Investigation on the properties of anodic oxides grown on aluminium-silicon alloys irradiated by pulsed electron beam. *Materials. Technologies. Design*. 2023;5(3):109–122.  
[https://doi.org/10.54708/26587572\\_2023\\_5313109](https://doi.org/10.54708/26587572_2023_5313109)
13. Gen Ya., Panchenko I.A., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Chen S. Effect of electron beam processing on the structure of additive Al – Mg alloy. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;44(2):13–19. (In Russ.).  
[https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-13-19](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19)
14. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Zhmakin Y.D., Gromov V.E. Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011;(6):19–23.
15. *Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys*. N.N. Koval and Yu.F. Ivanov ed. Tomsk: NTL Publishing House, 2016:312. (In Russ.).
16. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016:196.
17. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy*. Characterization of Nanomaterials. New York: Springer, 2014:717.
18. Fultz B., Howe J. *Transmission Electron Microscopy and Diffractometry of materials, fourth edition*. Berlin: Springer, 2013:764.
19. Thomas J., Gemming T. *Analytical transmission Electron Microscopy*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014:348.
20. Liu Y.R., Zhang K.M., Zou J.X., Liu D.K., Zhang T.C. Effect of the high current pulsed electron beam treatment on the surface microstructure and corrosion resistance of a Mg-4Sm alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;741(3):65–75.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.227>
21. Zhang T.C., Zhang K.M., Zou J.X., Yan P., Yang H.Y., Song L.X., Zhang X. Surface microstructure and property modifications in a Mg-8Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy treated by high current pulsed electron beam. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;788(2):231–239.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.130>

#### Сведения об авторах

**Юлия Андреевна Шлярова**, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** rubannikova96@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0001-5677-1427  
**SPIN-код:** 7791-1310

**Анна Александровна Серебрякова**, старший преподаватель кафедры транспорта и логистики, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** aserebrakova87@gmail.com  
**ORCID:** 0000-0003-3979-7777  
**SPIN-код:** 5889-2235

**Виталий Владиславович Шляров**, заведующий сектором ОИАМуО, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** shlyarov@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0001-8130-648X  
**SPIN-код:** 5074-3309

**Александр Николаевич Прудников**, д.т.н., доцент, профессор кафедры обработки металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** a.prudnikov@mail.ru  
**ORCID:** 0000-002-4150  
**SPIN-код:** 1949-3246

**Дмитрий Валерьевич Загуляев**, д.т.н., доцент, начальник УНИ, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин им. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** zagulyaev\_dv@physics.sibsui.ru  
**ORCID:** 0000-0002-9859-8949  
**SPIN-код:** 9522-4745

#### Information about the authors

**Yulia A. Shliarova**, Researcher, Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

**E-mail:** rubannikova96@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0001-5677-1427  
**SPIN-код:** 7791-1310

*Anna A. Serebryakova, Senior Lecturer, Department of Transport and Logistics, Siberian State Industrial University*

**E-mail:** aserebrakova87@gmail.com  
**ORCID:** 0000-0003-3979-7777  
**SPIN-код:** 5889-2235

*Vitaly V. Shlyarov, Head of the OIAMO Sector, Siberian State Industrial University*

**E-mail:** shlyarov@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0001-8130-648X  
**SPIN-код:** 5074-3309

*Aleksander N. Prudnikov, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Department of Metal Forming and Materials Science.*

*EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University*  
**E-mail:** a.prudnikov@mail.ru

**ORCID:** 0000-002-4150  
**SPIN-код:** 1949-3246

*Dmitrii V. Zaguliaev, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Prof. Head of the Scientific Research Institute, Professor, Department of Natural Sciences named after V.M. Finkel, Siberian State Industrial University*

**E-mail:** zagulyaev\_dv@physics.sibsiu.ru  
**ORCID:** 0000-0002-9859-8949  
**SPIN-код:** 9522-4745

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

Поступила в редакцию 05.11.2024

После доработки 18.11.2024

Принята к публикации 22.11.2024

Received 05.11.2024

Revised 18.11.2024

Accepted 22.11.2024

**Оригинальная статья**

УДК 621.791.05:620.179

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-55-62

**ЭФФЕКТ РАВЕНСТВА ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ ОТ УСТОЙЧИВОЙ  
ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ ДО РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ И ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ**

© 2024 г. Н. В. Абабков

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (Россия, 650000, Кемеровская обл. – Кузбасс, Кемерово, ул. Весенняя, 28)

**Аннотация.** Проблема оценки остаточного ресурса длительно работающих технических устройств опасных производственных объектов является актуальной для технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности. В настоящее время для этих целей используют комплексные подходы, включающие громоздкие расчетные алгоритмы, анализ результатов неразрушающих и разрушающих испытаний, а также металлографию. Оценка ресурса является трудоемким процессом, не всегда обеспечивающим необходимую точность полученных результатов вследствие суммирования разного рода погрешностей (вычисления, оборудование, человеческий фактор). Полученные механические характеристики не в полной мере могут быть применены к оборудованию, которое эксплуатируется длительное время в условиях повышенных температур, так как были определены при комнатной температуре и при относительно высоких скоростях деформации и являются кратковременными. Получены зависимости, которые интерпретируются переходом от кратковременных механических характеристик, определенных при комнатной температуре, к длительным, которые являются характеристиками жаропрочности и более точно описывают поведение металла в процессе длительной эксплуатации в условиях высоких температур и давлений. Выявлены особенности формирования зон устойчивой локализации деформаций для конструкционных и теплоустойчивых сталей с разной длительной прочностью при кратковременных испытаниях. Установлен эффект различия временных интервалов от начала деформации до ее устойчивой локализации и эффект равенства временных интервалов от устойчивой локализации деформации до разрушения образцов с различной длительной прочностью. С одной стороны, эффект различия может быть использован для оценки длительной прочности металла, с другой, эффект равенства применяется для оценки остаточного ресурса длительно работающего энергооборудования.

**Ключевые слова:** эффект равенства, оценка ресурса, разрушение, механические испытания, зона локализации деформации, конструкционная сталь, теплоустойчивая сталь, длительная прочность

**Благодарности:** автор выражает признательность Смирнову А.Н., профессору кафедры Технологии машиностроения КузГТУ, Данилову В.И., в.н.с. лаборатории физики прочности ИФПМ СО РАН за помощь в обсуждении результатов исследований.

**Для цитирования:** Абабков Н.В. Эффект равенства временных интервалов от устойчивой локализации деформации до разрушения образцов из конструкционных и теплоустойчивых сталей. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):55–62. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-55-62](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-55-62)

*Original article*

**EFFECT OF EQUALITY OF TIME INTERVALS FROM SUSTAINABLE LOCALIZATION OF DEFORMATION TO FRACTURE OF SAMPLES FROM STRUCTURAL AND HEAT-RESISTANT STEEL**

© 2024 N. V. Ababkov

**T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University** (28 Vesennaya Str., Kemerovo, Kemerovo region – Kuzbass 650000, Russian Federation)

**Abstract.** The problem of assessing the residual life of long-running technical devices of hazardous production facilities is relevant for technical diagnostics and industrial safety examination. Currently, complex approaches are used for these purposes, including cumbersome calculation algorithms, analysis of the results of non-destructive and destructive tests, as well as metallography. Thus, resource assessment is a labor-intensive process that does not always provide the necessary accuracy of the results obtained due to the summation of various types of errors (calculations, equipment, human factor). The obtained values of mechanical characteristics cannot be fully applied to equipment that is operated for a long time at elevated temperatures, since they were determined at room temperature and at relatively high strain rates and, thus, are short-term. Therefore, dependencies were obtained that are a transition from short-term mechanical characteristics determined at room temperature to long-term mechanical characteristics, which are characteristics of heat resistance and more accurately describe the behavior of the metal during long-term operation under conditions of high temperatures and pressures. The work revealed the features of the formation of zones of stable localization of deformations for structural and heat-resistant steels with different long-term strength during short-term tests. The established effect of differences in time intervals from the onset of deformation to stable localization of deformation and the effect of equality of time intervals from stable localization of deformation to failure of samples with different long-term strength. On the one hand, the difference effect can be used to assess the long-term strength of a metal, on the other hand, the equality effect can be used to assess the residual life of long-term power equipment.

**Keywords:** equality effect, residual life assessment, destruction, mechanical tests, deformation localization zone, structural steel, heat-resistant steel, long-term strength

**Acknowledgements:** author expresses gratitude to Smirnov A.N., professor of the Department of Mechanical Engineering Technology of KuzSTU, Danilov V.I., senior researcher of Laboratory of Strength Physics, Institute of Physics and Applied Mathematics SB RAS for their assistance in discussing the research results.

**For citation:** Ababkov N.V. Effect of equality of time intervals from sustainable localization of deformation to fracture of samples from structural and heat-resistant steel. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):55–62. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-55-62](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-55-62)

**Введение**

В настоящее время необходимо уделять внимание проблемам надежности, долговечности оборудования теплоэнергетического комплекса, эксплуатируемого длительное время, для исключения возможности появления технических, экологических и гуманитарных аварий и катастроф. При этом сложившаяся на протяжении десятилетия экономическая ситуация вынуждает продлять срок службы такого оборудования сверх расчетного [1]. Решение этой проблемы может быть достигнуто путем компромисса по проведению технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности. Техническая реализация должна предусмотреть совершенствова-

ние существующих методик испытаний, а также разработку и развитие новых [2 – 4].

Для оценки состояния трубопроводов применяют стресс-тест, который заключается в выборе отдельных участков, нагружении их до предела текучести и проверке герметичности. Использование такого параметра как предел текучести материала в качестве характеристического слабо обосновано с физической точки зрения, так как имеет косвенное отношение к конструктивной прочности. Анализ картин локализации пластического течения в нагружаемом материале может применяться для уточнения параметров испытания [5 – 8]. Кроме того, необходима информация о характере локализации деформации в материа-

лах теплоэнергетического оборудования после длительной эксплуатации.

Проблема оценки остаточного ресурса технических устройств опасных производственных объектов после длительной эксплуатации – это другая не менее важная задача технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности. Для этого в настоящее время применяются комбинированные подходы, в которые входят трудоемкие расчетные алгоритмы, результаты испытаний неразрушающими и разрушающими методами контроля, а также оптической металлографии [9 – 11]. Оценка остаточного ресурса – это процесс трудоемкий и не всегда обеспечивающий необходимую точность результатов из-за суммы погрешностей разного рода (вычислений, оборудования, человеческого фактора и другие). Подход, предложенный в настоящей работе, имеет перспективы для решения обозначенной проблемы.

Цель настоящей работы заключается в выявлении особенностей формирования зон устойчивой локализации деформаций для конструкционных и теплоустойчивых сталей с разной длительной прочностью при кратковременных испытаниях.

#### Материалы и методы исследования

Исследования проводили на образцах, вырезанных из длительно работающих элементов теплоэнергетических установок: водоопускная труба фронтального экрана в состоянии поставки без эксплуатации, после эксплуатации без разрушения в течение 220 000 ч и после эксплуатации в течение 240 000 ч до разрушения, материал – сталь марки 20; гнутый участок паропровода перед выхлопным клапаном в состоянии поставки без эксплуатации, после эксплуатации без разрушения в течение 262 000 ч и после эксплуатации в течение 265 000 ч до разрушения, материал – сталь марки 12Х1МФ. Химический состав исследованных сталей приведен в табл. 1.

Механические характеристики измеряли на испытательной машине Walter + Bai AG LFM-125 [12 – 15]. Испытание заключалось в одноосном растяжении с постоянной скоростью перемещения подвижного захвата 0,4 мм/мин при комнатной

температуре на образцах с формой dog-bone и размерами рабочей части 40 × 6 × 2 мм (рис. 1).

Процесс растяжения образцов сопровождался регистрацией картин локализации деформации с использованием метода цифровой корреляции изображений (DIC) [16], реализованного комплектом видеочамер PL-B781F и при освещении лазером SNF-xxx-635-30-KB [17; 18].

#### Результаты исследований

Анализ результатов механических испытаний образцов из стали марки 20 показал, что длительная эксплуатация привела к уменьшению пластичности стали более чем в два раза с  $22 \pm 1,8$  до  $9,7 \pm 1,2$  % (рис. 2, а), а также к значительному изменению вида диаграммы напряжение – деформация. Прочность металла образцов после длительной эксплуатации по отношению к состоянию без эксплуатации увеличилась (рис. 2, б). Время от начала испытания до локализации деформации от состояния без эксплуатации к разрушенному уменьшилось. Для образцов из стали марки 12Х1МФ показатели прочности остались на одном уровне (рис. 2, в), тогда как пластичность уменьшилась от состояния без эксплуатации к состоянию после длительной эксплуатации с  $30 \pm 1,9$  до  $22 \pm 1,1$  % (рис. 2, в).

Описание процесса растяжения образцов с учетом локализации деформации проводили путем расчета деформационных показателей: доля деформации при локализации от всей деформации материала до разрушения  $a_1$  и при локализации до начала падающей части кривой нагружения  $a_2$  [19]:

$$a_1 = \frac{t_{loc}}{t_{crac}} = \frac{\varepsilon_{loc}}{\delta}; \quad (1)$$

$$a_2 = \frac{t_{loc}}{t_B} = \frac{\varepsilon_{loc}}{\varepsilon_B}, \quad (2)$$

где  $t_{loc}$  и  $\varepsilon_{loc}$  – время и деформация, соответствующие локализации деформации;  $t_B$  и  $\varepsilon_B$  – время и деформация, соответствующие максимально-напряжению  $\sigma_B$ ;  $t_{crac}$  и  $\delta$  – время и деформация, соответствующие разрушению образца.

Т а б л и ц а 1

#### Химический состав исследованных сталей

Table 1. Chemical composition of the studied steels

Марка стали	Содержание элементов, % (по массе)									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Va	Fe
20	0,17 – 0,24	0,17 – 0,37	0,35 – 0,65	до 0,25	до 0,25	до 0,25	до 0,04	до 0,035	до 0,08	~98
12Х1МФ	0,08 – 0,15	0,17 – 0,37	0,4 – 0,7	0,9 – 1,2	до 0,3	0,25 – 0,35	до 0,025	до 0,03	0,15 – 0,3	~96

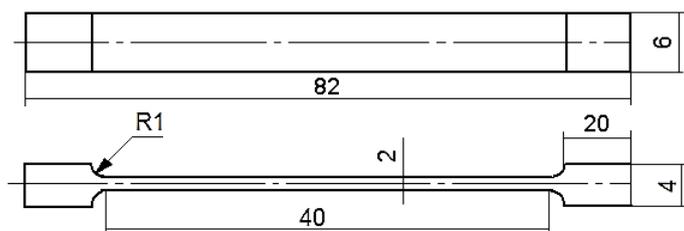


Рис. 1. Эскиз исследованных образцов  
Fig. 1. Sketch of the studied samples

Для образцов из стали марки 20 в состоянии после эксплуатации без разрушения (220 000 ч) установлено уменьшение параметра  $a_2$  до 0,471 (на 40 %) (рис. 3, а). Для образцов из стали марки 12Х1МФ показатели  $a_1$  и  $a_2$  для состояний без эксплуатации и после эксплуатации без разрушения значительно не отличаются, тогда как для состояния после эксплуатации и разрушения значения  $a_1$  и  $a_2$  уменьшились (рис. 3, б).

Ранее полученные механические характеристики не в полной мере можно было применять к оборудованию, которое эксплуатируется длительное время в условиях повышенных температур (320 и 560 – 585 °С для стали марок 20 и 12Х1МФ) и давлений (1,6 и 14 МПа для стали марок 20 и 12Х1МФ), так как были определены при комнатной температуре и при относительно

высоких скоростях деформации и являются кратковременными [20 – 22].

Отношение  $\sigma_{0,2}/\delta_k$  выбрано в качестве условной характеристики сопротивляемости материала разрушению [23 – 24], а обработка экспериментальных данных в координатах  $\sigma_{д.п.} - \sigma_{0,2}/\delta_k$  подтвердила такую закономерность для стали марки 12Х1МФ и температур испытания (560, 580 и 600 °С) на длительную прочность:

$$\sigma_{д.п.}^{560} = 5,3047 \ln \left( \frac{\sigma_{0,2}^{20}}{\delta^{20}} \right) - 9,3387 ; R^2 = 0,9725 ; (3)$$

$$\sigma_{д.п.}^{580} = 6,6035 \ln \left( \frac{\sigma_{0,2}^{20}}{\delta^{20}} \right) - 7,0086 ; R^2 = 0,9748 (4)$$

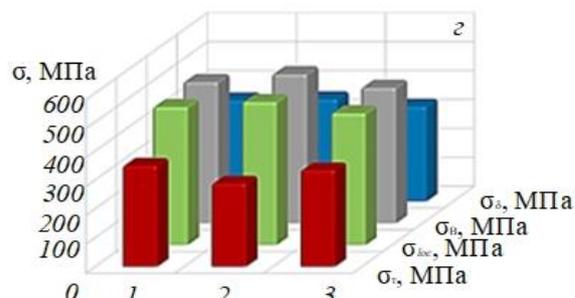
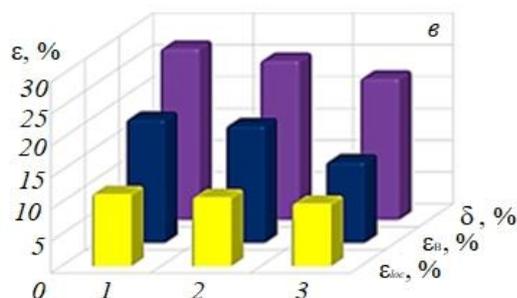
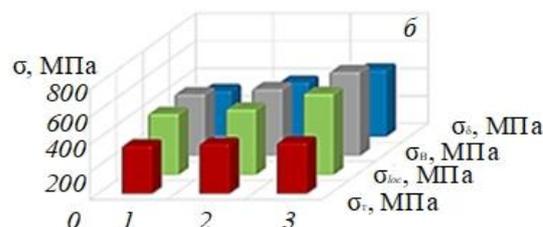
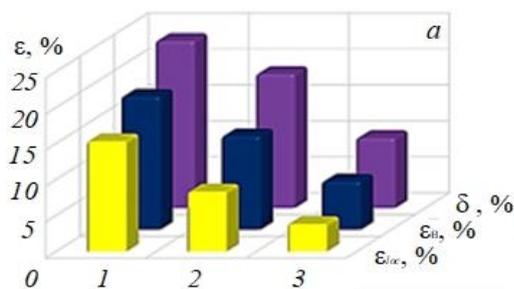


Рис. 2. Результаты механических испытаний образцов из стали марок 20 (а, б) и 12Х1МФ (в, г):

1 – состояние поставки без эксплуатации; 2 – после эксплуатации без разрушения (220 000 и 262 000 ч для стали марок 20 и 12Х1МФ); 3 – после эксплуатации и разрушения (240 000 и 265 000 ч для стали марок 20 и 12Х1МФ)

Fig. 2. The results of mechanical tests of steel samples of grades 20 (а, б) and 12Х1МФ (в, г):

1 – the state of delivery without operation; 2 – after operation without destruction (220,000 and 262,000 hours for steel grades 20 and 12Х1МФ); 3 – after operation and destruction (240,000 and 265 000 h for steel grades 20 and 12Х1МФ)

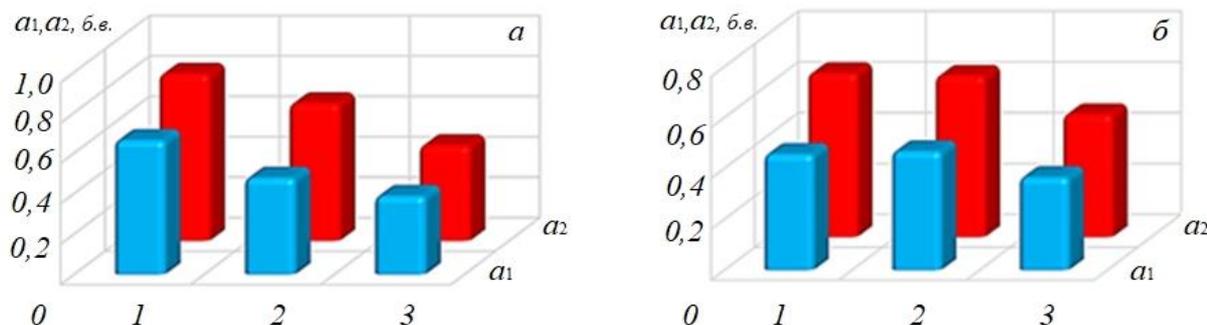


Рис. 3. Деформационные показатели образцов из стали марок 20 (а) и 12Х1МФ (б): 1 – состояние поставки без эксплуатации; 2 – после эксплуатации без разрушения (220 000 и 262 000 ч для стали марок 20 и 12Х1МФ); 3 – после эксплуатации и разрушения (240 000 и 265 000 ч для стали марок 20 и 12Х1МФ)

Fig. 3. Deformation parameters of samples made of structural (а) and 0.12C-1Cr-1Mo-1V steels (б):

1 – initial, without operation; 2 – after operation without destruction (220,000 and 262,000 hours for steel grades 20 and 12X1MF); 3 – after operation and destruction (240,000 and 265 000 h for steel grades 20 and 12X1MF)

$$\sigma_{д.п.}^{600} = 194,11 \frac{\sigma_{0,2}^{20}}{\delta_{20}^{20}} - 127,24; R^2 = 0,9126. \quad (5)$$

Полученные зависимости (3) – (5) являются переходом от кратковременных механических характеристик, определенных при комнатной температуре, к длительным механическим характеристикам, которые являются характеристиками жаропрочности и более точно описывают поведение металла в процессе длительной эксплуатации в условиях высоких температур и давлений.

На основе ранее полученных результатов исследования микроструктуры методом просвечивающей электронной микроскопии и измерения характеристик методов неразрушающего контроля [25] было сделано совмещение диаграмм

напряжение – деформация для образцов в различных состояниях (поставка, без эксплуатации и после эксплуатации без разрушения) с общим началом нагружения (рис. 4).

В результате совмещения диаграмм было выявлено, что временные промежутки от начала нагружения до устойчивой локализации деформации не равны ( $t_{loc1} = 115 \text{ с} \neq t_{loc2} = 920 \text{ с}$ ). В то же время оказались равными временные промежутки от устойчивой локализации деформации до разрушения образцов ( $t_{crac1} - t_{loc1} = 385 \text{ с} = t_{crac2} - t_{loc2} = 400 \text{ с}$ ) для различных состояний (поставка без эксплуатации и после эксплуатации без разрушения (220 000 ч)).

Показано, что этап достижения устойчивой локализации деформации является важным с точки зрения возможности применения для оценки работоспособности и прогнозирования остаточного ресурса технического устройства.

### Выводы

Обнаружен эффект, выявленный при устойчивой локализации деформации образцов из конструкционных и теплоустойчивых сталей с разной длительной прочностью, заключающийся в различии временных интервалов (от 113 до 922 с) от начала деформации до устойчивой локализации деформации и равенстве временных интервалов (400 с) от устойчивой локализации деформации до разрушения. Выявленный эффект различия временных интервалов от начала деформации до ее устойчивой локализации и эффект равенства временных интервалов от устойчивой локализации деформации до разрушения образцов с различной длительной прочностью. С одной стороны, эффект различия имеет потенциал применения для оценки длительной прочности исследуемого металла, с другой стороны, эффект равенства используется для оценки работоспособности и прогнозирования остаточного ресурса энергооборудования.

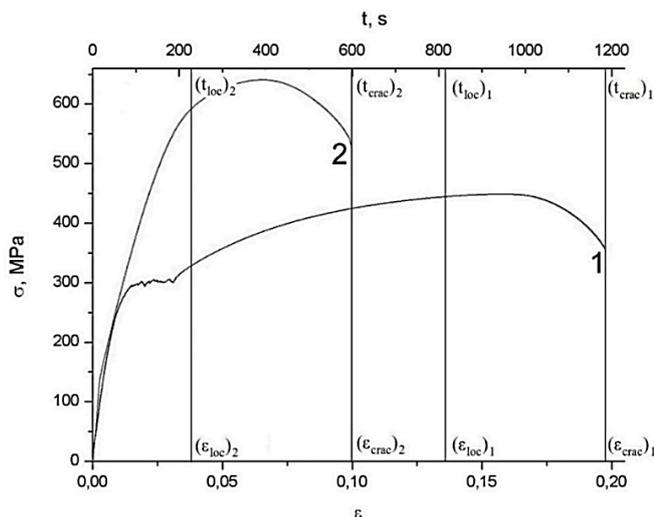


Рис. 4. Диаграммы напряжение – деформация для испытанных образцов из стали марки 20 в различных состояниях: 1 и 2 – поставка без эксплуатации и после эксплуатации без разрушения (220 000 ч)

Fig. 4. Stress – strain diagrams for tested steel samples of grade 20 in various states:

1 and 2 – delivery without operation and after operation without destruction (220,000 h)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rezinskikh V. F., Grin' E. A. Reliability and safety of thermal power stations in Russia at the present stage: problems and future objectives. *Thermal Engineering*. 2010;57:1–8. <https://doi.org/10.1134/S0040601510010015>
2. Ключев В.В. *Деградация диагностики безопасности*. Москва: Издательский дом «Спектр». 2012:128. EDN: SFDDCN.
3. Багмутов В.П., Белов Е.Г., Божко И.А., Будовских Е.А., Ващук Е.С и др. *Структурно-фазовые состояния перспективных металлических материалов: Коллективная монография*: под ред. В.Е. Громова. Новокузнецк: Изд-во НПК. 2009:613. EDN: SNBGKB.
4. Березина Т.Г., Бугай Н.В., Трунин И.И. *Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок*. Киев: Техника. 1991:118.
5. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А., Плосков Н.А. О природе упругопластического инварианта деформации. *Журнал технической физики*. 2018;88(6):855–859. <http://dx.doi.org/10.21883/JTF.2018.06.46016.2542>
6. Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Zuev L.B. On the kinetics of mobile Chernov–Luders band fronts. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1783:020035. <https://doi.org/10.1063/1.4966328>
7. Gorbatenko V.V., Danilov V.I., Zuev L.B. Elastoplastic transition in material with sharp yield point. *AIP Conference Proceedings*. 2015;1683:020058. <https://doi.org/10.1063/1.4932748>
8. Danilov V.I., Orlova D.V., Zuev L.B. On the kinetics of localized plasticity domains emergent at the pre-failure stage of deformation process. *Materials and Design*. 2011; 32(3):1554–1558. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.031>
9. Muravev V. V., Lenkov S. V., Tapkov K. A. In-Production Nondestructive Testing of Internal Stresses in Rails Using Acoustoelasticity Method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019;55(1):8–14. <https://doi.org/10.1134/S1061830919010078>
10. Смирнов А.Н., Абабков Н.В., Глинка А.С., Логов А.Б. Акустические и физико-механические показатели теплоустойчивой стали в окрестности трещины. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2011;10:40–45.
11. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Petrov K.V. Connection between the properties of 0.4Cr steel bar stock and the speed of bulk and rayleigh waves. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017;53(8):560–567. <https://doi.org/10.1134/S1061830917080046>
12. Smirnov A.N., Ozhiganov E.A., Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Murav'ev V.V. The dependence of local deformations and internal stress fields on welding technique for grade VSt3sp structural steel: I. The influence of welding technique on the mechanical characteristics and acoustic emission parameters of grade VSt3sp steel. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51(11):705–712. <https://doi.org/10.1134/S1061830915110066>
13. Zuev L. B. Chernov–Luders and Portevin–Le Chatelier deformations in active deformable media of different nature. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017; 58(2):328–334. <https://doi.org/10.1134/S0021894417020171>
14. Zuev L. B. Autowave mechanics of plastic flow in solids. *Physics of Wave Phenomena*. 2012;20(3):166–173. <https://doi.org/10.3103/S1541308X12030028>
15. Danilov V. I., Barannikova S. A., Zuev L. B. Localized Strain Autowaves at the Initial Stage of Plastic Flow in Single Crystals. *Technical Physics*. 2003;48(11):1429–1435. <https://doi.org/10.1134/1.1626775>
16. Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Orlova D.V., Danilova L.V., Smirnov A.N. Luders Deformation in Weld Joints. *Steel in Translation*. 2018;48(2):87–92. <https://doi.org/10.3103/S0967091218020031>
17. Иванов Ю.Ф., Лычагин Д.В., Громов В.Е., Целлермаер В.В., Соснин О.В., Коваленко В.В., Коновалов С.В. Мезоскопическая субструктура и электроимпульсное подавление усталостного разрушения. *Физическая мезомеханика*. 2000;3(1):103–108.
18. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020;13(20):1–13. <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
19. Ababkov N.V. Study of localized deformation zones by nondestructive testing methods in structural and heat-resistant steels. *AIP Conference Proceedings* 2020;2315:040001. <https://doi.org/10.1063/5.0036641>
20. Крутасова Е.И. *Надежность металла энергетического оборудования*. Москва: Энергоиздат. 1981:237.
21. Куманин В.И., Ковалева Л.А., Алексеев С.В. *Долговечность металла в условиях ползучести*. Москва: Металлургия. 1988: 224.
22. Бугай Н.В., Шкляр М.И. *Неразрушающий контроль металла теплоэнергетических установок*. Москва: Энергия. 1978: 177 с.

23. Антикайн П.А., Зыков А.К. *Изготовление объектов котлонадзора. Справочное издание*. Москва: Металлургия. 1980:328.
  24. Ковпак V. I. Operational creep of materials for steam pipes and extension of service lives of heat electric power plants. *Проблемы прочности*. 1998;3:56–61.
  25. Ababkov N., Smirnov A., Danilov V., Zuev L., Popova N., Nikonenko E. Structural-phase state, mechanical properties, acoustic and magnetic characteristics in the sustainable deformation localization zones of power equipment made of structural and heat resistant steels. *Metals*. 2021;11(10):1638. <https://doi.org/10.3390/met11101638>
- REFERENCES**
1. Rezinskikh V. F., Grin' E. A. Reliability and safety of thermal power stations in Russia at the present stage: problems and future objectives. *Thermal Engineering*. 2010;57:1–8. <https://doi.org/10.1134/S0040601510010015>
  2. Klyuev V.V. *Degradation of safety diagnostics*. Moscow: Izdatel'skii dom «Spektr». 2012:128. EDN: SFDDCN. (In Russ.).
  3. Bagmutov V.P., Belov E.G., Bozhko I.A., Budovskikh E.A., Vashchuk E.S i dr. *Structural and phase states of promising metallic materials: A collective monograph*: edited by V.E. Gromov. Novokuznetsk: Izd-vo NPK. 2009:613. EDN: SNBGKB. (In Russ.).
  4. Berezina T.G., Bugai N.V., Trunin I.I. *Diagnostics and forecasting of metal durability of thermal power plants*. Kyiv: Tekhnika. 1991:118. (In Russ.).
  5. Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A., Ploskov N.A. On the nature of the elastoplastic invariant of deformation. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2018;88(6):855–859. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.21883/JTF.2018.06.46016.2542>
  6. Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Zuev L.B. On the kinetics of mobile Chernov–Luders band fronts. *AIP Conference Proceedings*. 2016; 1783:020035. <https://doi.org/10.1063/1.4966328>
  7. Gorbatenko V.V., Danilov V.I., Zuev L.B. Elastoplastic transition in material with sharp yield point. *AIP Conference Proceedings*. 2015;1683:020058. <https://doi.org/10.1063/1.4932748>
  8. Danilov V.I., Orlova D.V., Zuev L.B. On the kinetics of localized plasticity domains emergent at the pre-failure stage of deformation process. *Materials and Design*. 2011; 32(3):1554–1558. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.031>
  9. Muravev V.V., Lenkov S.V., Tapkov K.A. In-Production Nondestructive Testing of Internal Stresses in Rails Using Acoustoelasticity Method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019;55(1):8–14. <https://doi.org/10.1134/S1061830919010078>
  10. Smirnov A.N., Ababkov N.V., Glinka A.S., Logov A.B. Acoustic and physico-mechanical properties of heat-resistant steel in the vicinity of the crack. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2011;10:40–45. (In Russ.).
  11. Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Petrov K. V. Connection between the properties of 0.4Cr steel bar stock and the speed of bulk and rayleigh waves. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017;53(8):560–567. <https://doi.org/10.1134/S1061830917080046>
  12. Smirnov A.N., Ozhiganov E.A., Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Murav'ev V.V. The dependence of local deformations and internal stress fields on welding technique for grade VSt3sp structural steel: I. The influence of welding technique on the mechanical characteristics and acoustic emission parameters of grade VSt3sp steel. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51(11):705–712. <https://doi.org/10.1134/S1061830915110066>
  13. Zuev L. B. Chernov–Luders and Portevin–Le Chatelier deformations in active deformable media of different nature. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017; 58(2):328–334. <https://doi.org/10.1134/S0021894417020171>
  14. Zuev L. B. Autowave mechanics of plastic flow in solids. *Physics of Wave Phenomena*. 2012;20(3):166–173. <https://doi.org/10.3103/S1541308X12030028>
  15. Danilov V. I., Barannikova S. A., Zuev L. B. Localized Strain Autowaves at the Initial Stage of Plastic Flow in Single Crystals. *Technical Physics*. 2003;48(11):1429–1435. <https://doi.org/10.1134/1.1626775>
  16. Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Orlova D.V., Danilova L.V., Smirnov A.N. Luders Deformation in Weld Joints. *Steel in Translation*. 2018;48(2):87–92. <https://doi.org/10.3103/S0967091218020031>
  17. Ivanov Yu.F., Lychagin D.V., Gromov V.E., Tsellermaer V.V., Sosnin O.V., Kovalenko V.V., Konovalov S.V. Mesoscopic substructure and electrical pulse suppression of fatigue failure. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2000;3(1):103–108. (In Russ.).
  18. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020;13(20):1–13.

- <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
19. Ababkov N.V. Study of localized deformation zones by nondestructive testing methods in structural and heat-resistant steels. *AIP Conference Proceedings* 2020;2315:040001. <https://doi.org/10.1063/5.0036641>
  20. Krutasova E.I. *Reliability of metal power equipment*. Moscow: Energoizdat. 1981:237. (In Russ.).
  21. Kumanin V.I., Kovaleva L.A., Alekseev S.V. *Durability of metal in creep conditions*. Moscow: Metallurgiya. 1988:224. (In Russ.).
  22. Bugai N.V., Shklyarov M.I. *Non-destructive testing of metal of thermal power plants*. Moscow: Energiya. 1978:177. (In Russ.).
  23. Antikain P.A., Zykov A.K. *Production of boiler inspection facilities. Reference edition*. Moscow: Metallurgiya. 1980:328. (In Russ.).
  24. Kovpak V. I. Operational creep of materials for steam pipes and extension of service lives of heat electric power plants. *Problemy prochnosti*. 1998;3:56–61.
  25. Ababkov N., Smirnov A., Danilov V., Zuev L., Popova N., Nikonenko E. Structural-phase state, mechanical properties, acoustic and magnetic characteristics in the sustainable deformation localization zones of power equip-

ment made of structural and heat resistant steels. *Metals*. 2021;11(10):1638. <https://doi.org/10.3390/met11101638>

**Сведения об авторе**

**Николай Викторович Абабков**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой технологий машиностроения, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

**E-mail:** ababkovnv@kuzstu.ru

**ORCID:** 0000-0003-0794-8040

**SPIN-код:** 2309-4988

**Information about the author**

**Nikolai V. Ababkov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof., Head of the Department of Mechanical Engineering Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

**E-mail:** ababkovnv@kuzstu.ru

**ORCID:** 0000-0003-0794-8040

**SPIN-код:** 2309-4988

Поступила в редакцию 19.02.2024

После доработки 12.04.2024

Принята к публикации 22.04.2024

Received 19.02.2024

Revised 12.04.2024

Accepted 22.04.2024

**Оригинальная статья**

УДК 620.17:66.017

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-63-71

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА РАЗРУШЕНИЕ И  
МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА**

© 2024 г. М. О. Кудряшова<sup>1,2</sup>, С. С. Петров<sup>1,2</sup>, П. Е. Юдин<sup>3</sup>, А. Ю. Ежов<sup>4</sup>,  
О. С. Бондарева<sup>2</sup>, А. А. Мельников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Научно-производственный центр «Самара» (Россия, 443022, Самара, Гаражный проезд, 3Б)

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34)

<sup>3</sup>Самарский государственный технический университет (Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 133)

<sup>4</sup>ООО «КРОНЕ-Автоматика» (Россия, 443004, Самарская обл., Волжский р-н, п. Верхняя Подстепновка, д. 2)

**Аннотация.** Исследовано влияние наводороживания на характер разрушения и механические характеристики титанового сплава Ti – 6Al – 4V в процессе эксплуатации в водородсодержащей среде при нормальных температурах. Описан основной механизм протекания процесса водородного охрупчивания для титановых сплавов ( $\alpha + \beta$ )-класса, который заключается в выделении и последующем распаде хрупких гидридных фаз. В ходе исследования установлено, что в процессе работы образцов из рассматриваемого сплава при заданном составе и параметрах эксплуатационной среды происходит насыщение металла водородом, о чем свидетельствует увеличение его содержания в материале после эксплуатации в сравнении с образцом в исходном состоянии. Показан механизм разрушения металла образца, насыщенного водородом в процессе эксплуатации в водородсодержащей среде. Морфология поверхности излома исследуемого образца характерна для хрупкого типа разрушения. На поверхности образца вблизи зоны разрушения присутствуют крупные дефекты в виде кратеров, следы эрозии и растрескивание. Структура излома характеризуется наличием «зубьев пилы», наблюдается обширная система вторичных микротрещин и взаимодействие их с магистральной трещиной, что является характерным проявлением водородного охрупчивания титанового сплава. Вблизи поверхности разрушения образца наблюдается деградация микроструктуры, проявляющаяся в образовании микропустот на границах раздела фаз  $\alpha/\beta$ , инициирующих разрушение. Установлено повышение на 35 – 38 % микротвердости металла части разрушенного образца, непосредственно контактировавшей с рабочей средой, что может быть связано с распределением в рассматриваемой области мелкодисперсных гидридов титана, которые образовались в результате наводороживания металла.

**Ключевые слова:** титановый сплав, водородная хрупкость, фрактография, микроструктура, механические характеристики

**Для цитирования:** Кудряшова М.О., Петров С.С., Юдин П.Е., Ежов А.Ю., Бондарева О.С., Мельников А.А. Исследование влияния наводороживания на разрушение и механические характеристики титанового сплава. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):63–71. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-63-71](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-63-71)

**Original article**

**INFLUENCE OF HYDROGEN ABSORPTION ON DESTRUCTION AND MECHANICAL  
CHARACTERISTICS OF TITANIUM ALLOY**

© 2024 M. O. Kudryashova<sup>1,2</sup>, S. S. Petrov<sup>1, 2</sup>, P. E. Yudin<sup>3</sup>, A. Yu. Ezhov<sup>4</sup>, O. S. Bondareva<sup>2</sup>,  
A. A. Mel'nikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>«Research and Production Centre «Samara» LLC (3B, Garazhnyy proyezd, Samara, Samara Region, 443022, Russian Federation)

<sup>2</sup>Samara National Research University (34, Moskovskoye shosse, Samara, Samara Region, 443086, Russian Federation)

<sup>3</sup> Samara State Technical University (133 Molodogvardeyskaya Str., Samara, Samara Region, 443001, Russian Federation)

<sup>4</sup>«KROHNE-Automatics» LLC, (133 Molodogvardeyskaya Str., Samara, Samara Region, 443001, Russian Federation)

**Abstract.** The effect of hydrogen absorption on the nature of destruction and mechanical characteristics of Ti – 6Al – 4V titanium alloy during operation in a hydrogen-containing medium at normal temperatures has been studied. The main mechanism of the hydrogen embrittlement process for ( $\alpha + \beta$ ) titanium alloys is described, which consists in the separation and subsequent decomposition of brittle hydride phases. In the course of the study, it was established that during the operation of samples from the alloy under the given composition and parameters of the operating environment there is a saturation of the metal with hydrogen, as evidenced by the increase in its content in the material after operation in comparison with the sample in the initial state. The mechanism of destruction of a metal sample saturated with hydrogen during operation in a hydrogen-containing medium is shown. The fracture surface morphology of the investigated specimen is characteristic of brittle fracture type. Large crater-shaped defects, signs of erosion and cracking are present on the surface of the sample near the fracture zone. The fracture structure is characterized by the presence of “saw teeth”, an extensive system of secondary micro-cracks and their interaction with the main crack is observed, which is a characteristic manifestation of hydrogen embrittlement of a titanium alloy. Near the fracture surface of the sample, degradation of the microstructure is observed, manifested in the formation of micro voids at the interface of the  $\alpha/\beta$  phases initiating destruction. An increase in the microhardness of the metal of the part of the destroyed sample that was in direct contact with the working medium was found to be 35-38%, which may be due to the distribution of finely dispersed titanium hydrides in the region under consideration, which were formed as a result of hydrogen absorption of metal.

**Keywords:** titanium alloy, hydrogen embrittlement, fractography, microstructure, mechanical characteristics

**For citation:** Kudryashova M.O., Petrov S.S., Yudin P.E., Ezhov A.Yu., Bondareva O.S., Mel'nikov A.A Influence of hydrogen absorption on destruction and mechanical characteristics of titanium alloy. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):63–71. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-63-71](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-63-71)

## Введение

Титан широко применяется в качестве промышленного конструкционного материала благодаря своим свойствам (высокой прочности, твердости и пластичности в сочетании с малой плотностью). Наиболее распространенными для промышленного применения являются сплавы тройной системы Ti – Al – V, в частности, сплав ( $\alpha + \beta$ )-класса Ti – 6Al – 4V (марка ВТ6).

Сплавы на основе титана применяют для изготовления оборудования в сфере водородной энергетики. Водород считается одним из наиболее перспективных видов топлива, так как является экологически безопасным и не выделяет вредных веществ при сгорании, благодаря чему имеет большой потенциал для замены традиционных источников энергии. Однако, несмотря на многообещающие перспективы использования водородной энергетики, существует ряд ограничений,

связанных с хранением и транспортировкой водорода, высокая степень опасности которых требует применения надежных материалов.

Для титановых сплавов известна проблема водородного охрупчивания при эксплуатации изделий в водородосодержащих средах при нормальной температуре [1]. Влияние водорода на микроструктуру и механические свойства титановых сплавов при нормальной температуре изучали для сплавов ( $\alpha + \beta$ )-класса [2 – 7]. Работы [8 – 10] посвящены изучению воздействия водорода на микроструктуру и механические характеристики сплавов  $\alpha$ -класса, результаты которых также важны для понимания механизма водородного охрупчивания титановых сплавов. Несмотря на высокую проработанность рассматриваемой тематики в научном сообществе, явление наводороживания титана и его сплавов при нормальных температурах до сих пор оста-

ется актуальной задачей, так как на сегодняшний день нередко именно оно становится основной причиной выхода из строя оборудования на предприятиях водородной энергетики.

Наводороживание титана и его сплавов проявляется в потере пластичности (охрупчивании) материала [11]. В сплавах ( $\alpha + \beta$ )-класса основной механизм водородного охрупчивания обусловлен выделением и распадом хрупких гидридных фаз, которые оказывают сильное влияние на характер разрушения этих сплавов и ухудшают их механические свойства [12 – 15]. В титановых сплавах ( $\alpha + \beta$ )-класса степень влияния водорода зависит от соотношения фаз в микроструктуре. Предел растворимости водорода в сплаве повышает  $\beta$ -фаза. При высоком ее содержании в структуре водород преимущественно транспортируется внутри  $\beta$ -решетки и вступает в реакцию с фазой по границам раздела  $\alpha/\beta$ -фаз, где происходит осаждение гидроксида, спровоцированное превышением предела растворимости  $\alpha$ -фазы. В таком случае наблюдается серьезная деградация структуры, способствующая охрупчиванию сплава из-за ослабления границ раздела  $\alpha/\beta$ -фаз гидридной фазой [16 – 19].

Целью настоящей работы является анализ влияния наводороживания, протекающего при нормальной температуре, на характер разрушения, микроструктуру и механические свойства титанового сплава системы Ti – 6Al – 4V.

Основными задачами является изучение микроструктуры и механических свойств металла образцов в исходном состоянии и после эксплуатации при нормальной температуре в водородсодержащей среде.

### Методы исследования

Объектами исследования являются образцы из титанового сплава системы Ti – 6Al – 4V в исходном состоянии и после эксплуатации в водородсодержащей среде. Эксплуатацию образцов осуществляли на установке производства водорода (УПВ), рабочая среда – водородсодержащий газ (общая доля водорода не менее 99 %), рабочая температура 38 – 40 °С, рабочее давление 2,5 – 2,6 МПа. В процессе эксплуатации произошло разрушение образцов при наработке 29 суток.

Образцы для исследования были изготовлены путем разрезки в продольном направлении необходимых фрагментов с последующей их заливкой в эпоксидную смолу с целью изготовления металлографических шлифов в продольном сечении. Анализ содержания водорода в образцах определяли с помощью спектрометра Титан СЛ. Для выявления микроструктуры металла проводили химическое травление образцов в растворе плавиковой и азотной кислот. Металлографические и электронно-микроскопические исследования проводили с

помощью растрового электронного микроскопа TESCAN VEGA3 SBH. Для измерения микротвердости использовали микротвердомер ПМТ-3М. Изучение проводили на подготовленных металлографических шлифах в наружной, срединной и внутренней областях сечения фрагмента образца, не контактировавшего с рабочей средой, а также вблизи зоны разрушения на образце, контактировавшем с рабочей средой (нагрузка составляла 50 г).

### Основные результаты

По результатам проведенного спектрального анализа установлено, что в металле исходного образца содержание водорода составляет 0,0015 %, что является допустимым значением для сплава Ti – 6Al – 4V в соответствии с ГОСТ 19807 – 91. В образце после эксплуатации содержание водорода не соответствует требованиям ГОСТ 19807 – 91 и достигает 0,017 %, что в 11,3 раза выше, чем в исходном состоянии.

Металлографический анализ образцов из титанового сплава Ti – 6Al – 4V в исходном состоянии показал, что структура основного металла волокнистая, вытянутая в направлении исходной пластической деформации прутковой заготовки. Структура представлена характерной для титанового сплава ( $\alpha + \beta$ )-класса мелкозернистой глобулярной двухфазной ( $\alpha + \beta$ )-структурой. Наблюдаются вытянутые пластины  $\alpha$ -фазы малого размера (рис. 1, а).

Структура металла после эксплуатации в водородсодержащей среде представлена мелкозернистой глобулярной двухфазной ( $\alpha + \beta$ )-структурой, вытянутой в направлении исходной пластической деформации. В сравнении с образцами в исходном состоянии структура образцов после эксплуатации имеет более вытянутые и тонкие пластины  $\alpha$ -фазы, что является следствием воздействия больших степеней пластической деформации при получении прутковой заготовки (рис. 1, б).

Результаты измерения микротвердости металла титанового сплава системы Ti – 6Al – 4V в исходном состоянии и после эксплуатации в водородсодержащей среде представлены в таблице.

Уровень микротвердости по сечению образца в исходном состоянии изменяется в интервале 238 – 275 HV<sub>0,05</sub> (в среднем составляет 257 HV<sub>0,05</sub>). Микротвердость металла после контакта с водородсодержащей средой вблизи зоны разрушения образца составляет в среднем 326 HV<sub>0,05</sub>, что больше примерно на 38 % в сравнении с металлом, не контактировавшим с рабочей средой. Полученные результаты подтверждают выводы об увеличении микротвердости титанового сплава в результате влияния наводороживания [20].

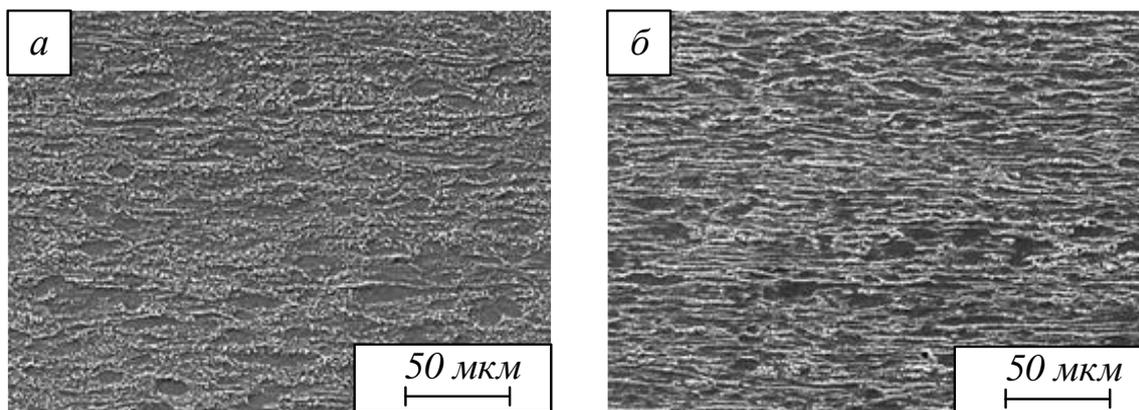


Рис. 1. Микроструктура металла образцов из титанового сплава Ti – 6Al – 4V в исходном состоянии (а) и после эксплуатации (б) (продольное сечение)

Fig. 1. Metal microstructure of samples from titanium alloy of Ti – 6Al – 4V system in initial state (a) and after hydrogen exposure (b) (longitudinal section)

Электронно-микроскопический анализ поверхности образца, разрушенного после эксплуатации в водородсодержащей среде, показал, что вблизи зоны разрушения присутствуют крупные дефекты в виде кратеров, следы эрозии и растрескивание, что характерно для процесса наводороживания титанового сплава [21]. Микрорельеф поверхности излома характерен для хрупкого разрушения и состоит из плоских фасеток с террасным узором, который возник в результате распространения трещины на различных уровнях. Наблюдаются участки со смешанным рельефом, состоящим из фасеток гидридного скола, высоких гребней разрыва и мелких ямок, являющихся пустотами, образовавшимися в результате растрескивания гидридов (рис. 2, а

– з). В работе [19] описан подобный механизм разрушения в результате водородного охрупчивания титана.

Электронно-микроскопические исследования профиля излома показали, что в строении излома присутствуют «зубья пилы», возникающие при водородном охрупчивании титанового сплава [22]. Отчетливо наблюдается ансамбль вторичных трещин и взаимодействие их с магистральной трещиной (рис. 3, а, б). Показана зона перехода от нормальной микроструктуры к микроструктуре, претерпевшей деградацию в результате наводороживания (рис. 3, в). Последняя содержит многочисленные микротрещины, распространяющиеся как по границам раздела  $\alpha/\beta$ -фаз (рис. 3, в),

### Результаты замера микротвердости по Виккерсу HV0,05 Vickers HV0.05 microhardness results

Образец	Область измерений	Микротвердость в точке					Среднее значение
		1	2	3	4	5	
В исходном состоянии	Наружная поверхность	296	265	241	303	271	275
	Середина	228	275	215	296	281	259
	Внутренняя поверхность	209	232	257	253	240	238
Разрушенный после эксплуатации (фрагмент образца, не контактировавший с рабочей средой)	Наружная поверхность	227	248	255	220	264	243
	Середина	218	223	245	227	231	229
	Внутренняя поверхность	238	235	215	235	250	235
Разрушенный после эксплуатации (фрагмент образца, контактировавший с рабочей средой)	Вблизи зоны разрушения	340	325	360	313	294	326

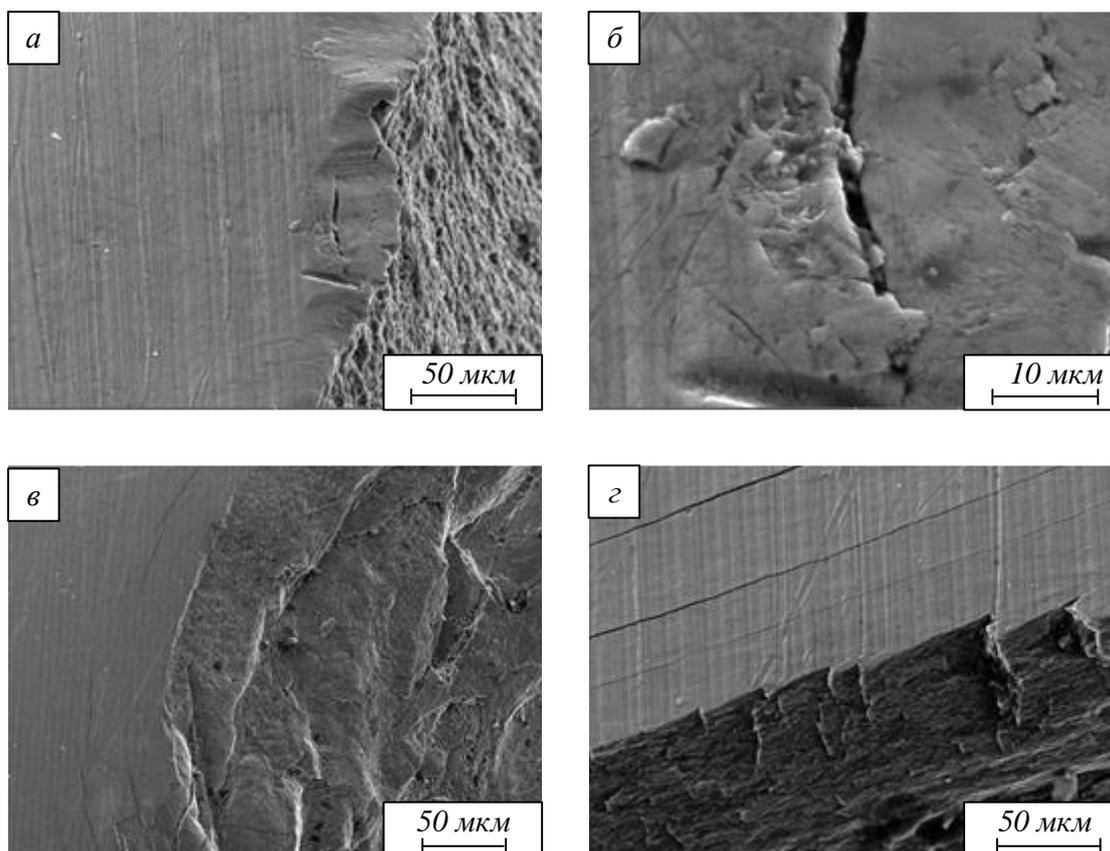


Рис. 2. Дефекты на поверхности образца из титанового сплава системы Ti – 6Al – 4V, разрушенного в процессе эксплуатации в водородсодержащей среде (электронный микроскоп):

*a, б* – кратеры и следы эрозии; *в, г* – растрескивание

Fig. 2. Defects on the surface of the sample from titanium alloy of Ti – 6Al – 4V system, destroyed after hydrogen exposure (electron microscope):

*a, б* – craters and traces of erosion; *в, г* – cracking

так и по телу зерен (рис. 3, *з, д*). Кроме того, наблюдаются многочисленные микропустоты, равномерно распределенные вблизи поверхности разрушения (рис. 3, *е*). Микропустоты пролегают вдоль границ раздела  $\alpha/\beta$ -фаз в местах залегания гидридов, которые при воздействии внешней деформации на образец растрескивались, в результате чего образовывались небольшие пустоты по всему объему. По мере роста эти пустоты приводили к образованию микропустот, которые наблюдаются на поверхности излома образца (рис. 2, *а*), являясь концентраторами напряжений, разрушающие образец. Описанный механизм схож с представленным в работе [19] и характерен для проявления водородного охрупчивания.

### Выводы

Исследовано влияние наводороживания на микроструктуру, механические характеристики и разрушение металла образцов из титанового сплава Ti – 6Al – 4V. Показано, что при эксплуатации образцов в водородсодержащей среде при нормальных температурах происходит насыщение металла водородом, о чем свидетельствует

увеличение его содержания в металле после эксплуатации в 11,3 раза в сравнении с образцом в исходном состоянии, не контактировавшим с рабочей средой.

По результатам металлографического анализа установлено, что микроструктура металла в исходном состоянии и после эксплуатации представлена мелкозернистой глобулярной двухфазной ( $\alpha + \beta$ )-структурой с выраженными пластинами  $\alpha$ -фазы, вытянутыми в направлении исходной пластической деформации, размер которых изменяется незначительно.

Уровень микротвердости металла после эксплуатации вблизи зоны разрушения после контакта с водородсодержащей средой выше на 38 %, что может быть связано с распределением в рассматриваемой области мелкодисперсных гидридов титана, которые образуются в результате наводороживания.

На поверхности изделия вблизи зоны разрушения присутствуют крупные дефекты в виде кратеров, следы эрозии и растрескивание. Структура излома характеризуется наличием «зубьев пилы», наблюдается обширная система

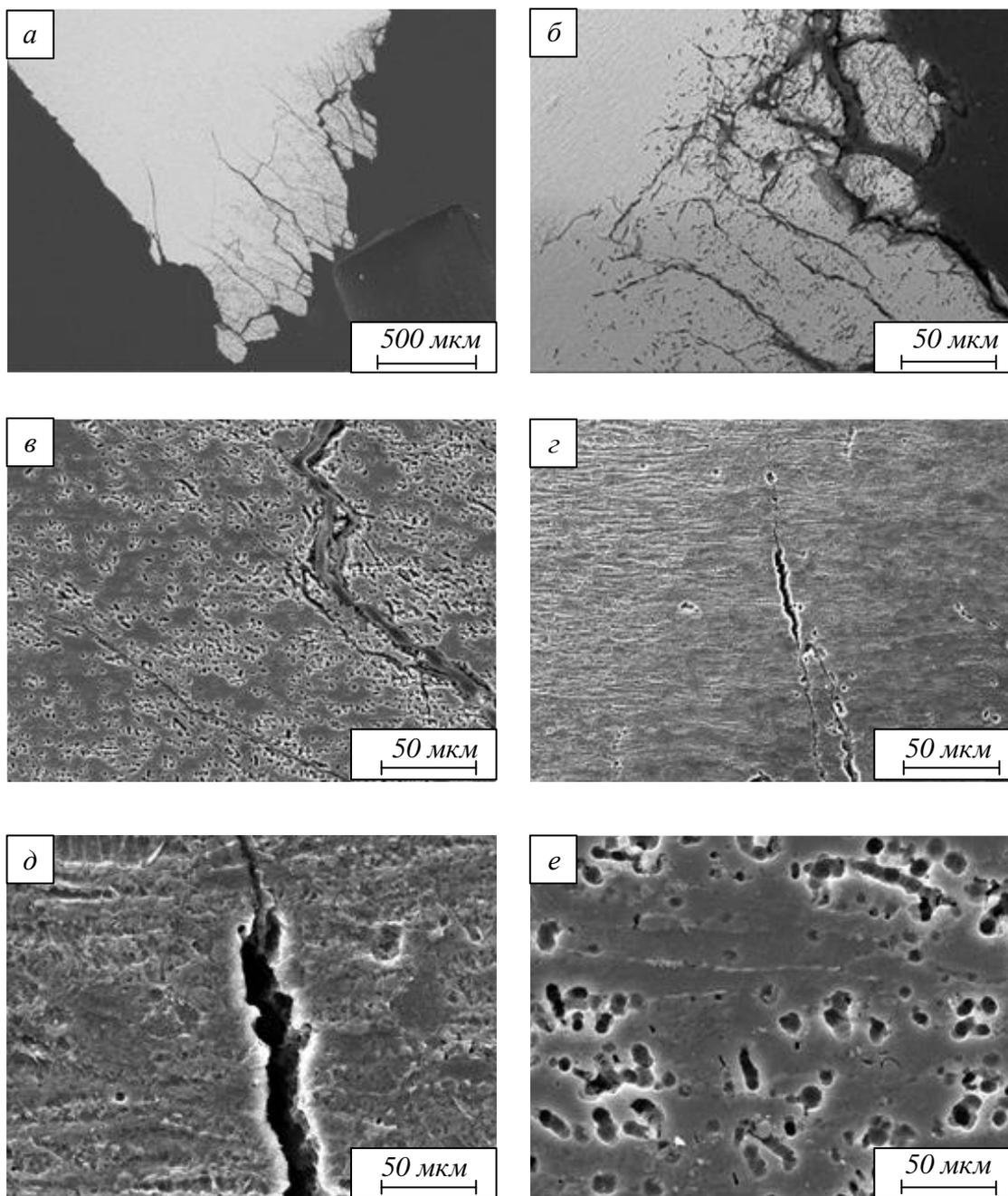


Рис. 3. Профиль излома образца из титанового сплава системы Ti – 6Al – 4V, разрушенного в процессе эксплуатации в водородсодержащей среде (электронный микроскоп)

Fig. 3. Fracture profile of a sample from titanium alloy of Ti – 6Al – 4V system, destroyed as a result of hydrogen exposure (electron microscope)

вторичных микротрещин и взаимодействие их с магистральной трещиной, а также многочисленные микропустоты, пролегающие вдоль границ раздела  $\alpha/\beta$ -фаз, что является проявлением водородного охрупчивания титанового сплава.

Титановый сплав Ti – 6Al – 4V подвержен наводороживанию и, как следствие, водородному охрупчиванию. Это снижает его надежность и эксплуатационные характеристики. Для предотвращения подобных разрушений на производстве необходим тщательный подбор применяемых материалов и проведение предварительных испытаний в модельной среде с целью

снижения риска проявления водородного охрупчивания, значительно сокращающего срок эксплуатации изделий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Embrittlement of Secondary Hydrogen-Containing Phases in Titanium-Based Alloys. In: *Glass Physics and Chemistry. Proceedings of the Third Russian-Israeli Bi-National Workshop 2004 «The Optimization of the Composition, Structure, and Properties Of Metals, Oxides, Composites, Nanomaterials, and Amorphous Materials»* (St.

- Petersburg, Russia, June 13-23, 2004*). St. Petersburg. 2005;31(1):96–101.  
<https://doi.org/10.1007/s10720-005-0029-5>
2. Белова С.Б., Колачев Б.А., Мамонов И.М. Параметры диффузии элементов замещения в  $\alpha$ - и  $\beta$ -титане. *Научные труды (Вестник МАТИ)*. 2002;5 (77):5–9.
  3. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. Москва: Наука. 1994:304.
  4. Ильин А.А., Колачев Б.А., Носов В.К., Мамонов А.М. *Водородная технология титановых сплавов*. Москва: МИСИС. 2002:390.
  5. Eliezer D., Tal-Gutelmacher E., Cross C. E., Boellinghaus T. Hydrogen trapping in  $\beta$ -21S titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;421(1–2):200–207.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.067>
  6. Chattoraj I. Stress corrosion cracking (SCC) and hydrogen-assisted cracking in titanium alloys. *Stress Corrosion Cracking*. 2011:381–408.  
<https://doi.org/10.1533/9780857093769.3.381>
  7. Gerland M., Lefranc P., Doquet V., Sarrazin-Baudoux C. Deformation and damage mechanisms in an  $\alpha/\beta$  6242 Ti alloy in fatigue, dwell-fatigue and creep at room temperature. Influence of internal hydrogen. *Materials Science and Engineering A*. 2009;507(1-2):132–143.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.045>
  8. Conforto E., Guillot I., Feaugas X. Solute hydrogen and hydride phase implications on the plasticity of zirconium and titanium alloys: a review and some recent advances. *Philosophical Transactions A*. 2017;375(2098):20160417.  
<http://doi.org/10.1098/rsta.2016.0417>
  9. Barkia B. Viscoplasticité à l'ambiante du titane en relation avec ses teneurs en oxygène et hydrogène. Extended abstract of Doctor's thesis. 2014:269.  
<http://doi.org/10.13140/RG.2.1.1731.8007>
  10. Wasz M.L., Brotzen F.R., McLellan R.B., Griffin A.J. Effect of oxygen and hydrogen on mechanical properties of commercial purity titanium. *International Materials Reviews*. 2013;41(1):1–12.  
<https://doi.org/10.1179/imr.1996.41.1.1>
  11. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Hydrogen cracking in titanium-based alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2005;404-406:621–625.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.02.098>
  12. Nelson H.G. Effect of High Temperature Hydrogen on Titanium Base Alloys. *A Publication of The Minerals, Metals & Materials Society*. 1996:699.
  13. Feaugas X., Conforto E. Influence de l'hydrogène sur les mécanismes de déformation et d'endommagement des alliages de titane et de zirconium. *PlastOx*. 2009:161–178.  
<https://doi.org/10.1051/ptox/2009012>
  14. Bignon Q., Martin F., Auzoux Q., Wouters Y. Hydrogen impact on the mechanical properties of three titanium alloys. In: *3<sup>rd</sup> International conference on metals and hydrogen*. Gand, Belgium. 2018:11.
  15. Малков И.Л., Бойцов И.Е., Дмитриенко А.Н., Казимов М.В., Клевцов В.Г., Туманова Н.Ю., Юхимчук А.А. Исследование водородной прочности титановых сплавов. *Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ*. 2020;25–2:170–179. EDN:IVVRPB;  
[https://doi.org/10.53403/9785951504944\\_2020\\_25.2\\_170\\_179](https://doi.org/10.53403/9785951504944_2020_25.2_170_179)
  16. Pittinato G.F., Hanna W.D. Hydrogen in  $\beta$  transformed Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1972; 3(11):2905–2909.
  17. Hardie D., Ouyang S. Effect of hydrogen and strain rate upon the ductility of mill-annealed Ti6Al4V. *Corrosion Science*. 1999;41(1):155–177.  
[https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00109-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00109-7)
  18. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Hydrogen-assisted degradation of titanium based alloys. *Materials Transactions*. 2004;45(5):1594–1600.  
<https://doi.org/10.2320/matertrans.45.1594>
  19. Briant C.L., Wang Z.F., Chollocoop N. Hydrogen embrittlement of commercial purity titanium. *Corrosion Science*. 2002;44(8):1875–1888.  
[https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00159-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00159-7)
  20. Молоканова А.А., Саулин Д.В. Исследование процессов наводороживания коррозионно-стойких сплавов и сплавов цветных металлов. *Вестник ПНИПУ*. 2023;4:92–107.  
<https://doi.org/10.15593/2224-9400/2023.4.07>
  21. Чернов И.П., Лидер А.М., Черданцев Ю.П., Гаранин Г.В., Никитенков Н.Н., Кренинг М., Сурков А.С. Дефекты в титане, инициированные водородом. *Физическая мезомеханика*. 2000;3(6):97–103. EDN: KWPJCB.
  22. Винокур Б.И., Белов С.П., Брун М.Я. Титановые сплавы. *Металловедение титана и его сплавов*. Москва: Металлургия. 1992:352.

## REFERENCES

1. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Embrittlement of Secondary Hydrogen-Containing Phases in Titanium-Based Alloys. In: *Glass Physics and Chemistry. Proceedings of the Third Russian-Israeli Bi-National Workshop 2004 «The Optimization of the Composition, Structure, and Properties Of Metals, Oxides, Composites, Nanomaterials, and Amorphous Materials»* (St. Petersburg, Russia, June 13–23, 2004). St. Petersburg. 2005;31(1):96–101.  
<https://doi.org/10.1007/s10720-005-0029-5>

2. Belova S.B., Kolachev B.A., Mamonov I.M. Diffusion parameters of substitution elements in  $\alpha$ - and  $\beta$ -titanium. *Nauchnye trudy (Vestnik MATI)*. 2002;5(77):5–9. (In Russ.).
3. Il'in A.A. *The mechanism and kinetics of phase and structural transformations in titanium alloys*. Moscow: Nauka. 1994:304. (In Russ.).
4. Il'in A.A., Kolachev B.A., Nosov V.K., Mamonov A.M. *Hydrogen technology of titanium alloys*. Moscow: MISIS. 2002:390. (In Russ.).
5. Eliezer D., Tal-Gutelmacher E., Cross C. E., Boellinghaus T. Hydrogen trapping in  $\beta$ -21S titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;421(1–2):200–207. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.067>
6. Chatteraj I. Stress corrosion cracking (SCC) and hydrogen-assisted cracking in titanium alloys. *Stress Corrosion Cracking*. 2011:381–408. <https://doi.org/10.1533/9780857093769.3.381>
7. Gerland M., Lefranc P., Doquet V., Sarrazin-Baudoux C. Deformation and damage mechanisms in an  $\alpha/\beta$  6242 Ti alloy in fatigue, dwell-fatigue and creep at room temperature. Influence of internal hydrogen. *Materials Science and Engineering A*. 2009;507(1–2):132–143. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.11.045>
8. Conforto E., Guillot I., Feaugas X. Solute hydrogen and hydride phase implications on the plasticity of zirconium and titanium alloys: a review and some recent advances. *Philosophical Transactions A*. 2017;375(2098):20160417. <http://doi.org/10.1098/rsta.2016.0417>
9. Barkia B. Viscoplasticité à l'ambiance du titane en relation avec ses teneurs en oxygène et hydrogène. Extended abstract of Doctor's thesis. 2014:269. <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.1731.8007>
10. Wasz M.L., Brotzen F.R., McLellan R.B., Griffin A.J. Effect of oxygen and hydrogen on mechanical properties of commercial purity titanium. *International Materials Reviews*. 2013;41(1):1–12. <https://doi.org/10.1179/imr.1996.41.1.1>
11. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Hydrogen cracking in titanium-based alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2005;404–406:621–625. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.02.098>
12. Nelson H.G. Effect of High Temperature Hydrogen on Titanium Base Alloys. *A Publication of The Minerals, Metals & Materials Society*. 1996:699.
13. Feaugas X., Conforto E. Influence de l'hydrogène sur les mécanismes de déformation et d'endommagement des alliages de titane et de zirconium. *PlastOx*. 2009:161–178. <https://doi.org/10.1051/ptox/2009012>
14. Bignon Q., Martin F., Auzoux Q., Wouters Y. Hydrogen impact on the mechanical properties of three titanium alloys. In: *3<sup>rd</sup> International conference on metals and hydrogen*. Gand, Belgium. 2018:11.
15. Malkov I.L., Boitsov I.E., Dmitrienko A.N., Kazimov M.V., Klevtsov V.G., Tumanova N.Yu., Yukhimchuk A.A. Investigation of the hydrogen strength of titanium alloys. *Trudy RFYaTs-VNIIEF*. 2020;25–2:170–179. EDN:IVVRPB; (In Russ.). [https://doi.org/10.53403/9785951504944\\_2020\\_25.2\\_170\\_179](https://doi.org/10.53403/9785951504944_2020_25.2_170_179)
16. Pittinato G.F., Hanna W.D. Hydrogen in  $\beta$  transformed Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1972; 3(11):2905–2909.
17. Hardie D., Ouyang S. Effect of hydrogen and strain rate upon the ductility of mill-annealed Ti6Al4V. *Corrosion Science*. 1999;41(1):155–177. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00109-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00109-7)
18. Tal-Gutelmacher E., Eliezer D. Hydrogen-assisted degradation of titanium based alloys. *Materials Transactions*. 2004;45(5):1594–1600. <https://doi.org/10.2320/matertrans.45.1594>
19. Briant C.L., Wang Z.F., Chollocoop N. Hydrogen embrittlement of commercial purity titanium. *Corrosion Science*. 2002;44(8):1875–1888. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00159-7](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00159-7)
20. Molokanova A.A., Saulin D.V. Investigation of the processes of hydrogenation of corrosion-resistant alloys and non-ferrous metal alloys. *Vestnik PNIPU*. 2023;4:92–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2023.4.07>
21. Chernov I.P., Lider A.M., Cherdantsev Yu.P., Garanin G.V., Nikitenkov N.N., Krening M., Surkov A.S. *Defects in titanium initiated by hydrogen*. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2000;3(6):97–103. EDN: KWPJCB. (In Russ.).
22. Vinokur B.I., Belov S.P., Brun M.Ya. *Titanium alloys*. *Metallurgy of titanium and its alloys*. Moscow: Metallurgiya. 1992:352. (In Russ.).

#### Сведения об авторах

**Мария Олеговна Кудряшова**, младший научный сотрудник, ООО «Научно-производственный центр «Самара», аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
**E-mail:** dmitrieva@npcsamara.ru  
**ORCID:** 0000-0002-4874-9278  
**SPIN-код:** 1135-1380

**Сергей Степанович Петров**, к.ф.-м.н., начальник Аналитического отдела, ООО «Научно-производственный центр «Самара», доцент кафедры физики твердого тела и неравновесных систем, Самарский

национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
**E-mail:** petrov@npcsamara.ru  
**ORCID:** 0009-0001-4011-0058  
**SPIN-код:** 1094-4110

**Павел Евгеньевич Юдин**, к.т.н., доцент, директор по науке, ООО «Научно-производственный центр «Самара», доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», Самарский государственный технический университет  
**E-mail:** yudin@npcsamara.ru  
**ORCID:** 0000-0002-4517-3744  
**SPIN-код:** 3901-0458

**Александр Юрьевич Ежов**, главный конструктор, ООО «КРОНЕ-Автоматика»  
**E-mail:** ejovvkb@yandex.ru

**Ольга Сергеевна Бондарева**, к.т.н., доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
**E-mail:** bondareva.os@ssau.ru  
**ORCID:** 0000-0002-4273-2483  
**SPIN-код:** 8308-0326

**Алексей Александрович Мельников**, к.т.н., доцент, доцент кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
**E-mail:** melnikov.alex@yandex.ru  
**ORCID:** 0000-0002-1953-3670  
**SPIN-код:** 7359-3564

#### **Information about the authors**

**Mariya O. Kudryashova**, Junior Researcher, «Research and Production Centre «Samara» LLC, postgraduate student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University  
**E-mail:** dmitrieva@npcsamara.ru  
**ORCID:** 0000-0002-4874-9278  
**SPIN-код:** 1135-1380

**Sergei S. Petrov**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Analytical Department, «Research and Production Centre

«Samara» LLC, Associate Professor of the Department of Solid State Physics and Nonequilibrium Systems, Samara National Research University  
**E-mail:** petrov@npcsamara.ru  
**ORCID:** 0009-0001-4011-0058  
**SPIN-код:** 1094-4110

**Pavel E. Yudin**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Director of Science, «Research and Production Centre «Samara» LLC, Associate Professor of the Department «Metal science, powder metallurgy, nanomaterials», Samara State Technical University  
**E-mail:** yudin@npcsamara.ru  
**ORCID:** 0000-0002-4517-3744  
**SPIN-код:** 3901-0458

**Aleksandr Yu. Ezhov**, Chief Designer, «KROHNE-Automatics» LLC  
**E-mail:** ejovvkb@yandex.ru

**Ol'ga S. Bondareva**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University  
**E-mail:** bondareva.os@ssau.ru  
**ORCID:** 0000-0002-4273-2483  
**SPIN-код:** 8308-0326

**Aleksei A. Mel'nikov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University  
**E-mail:** melnikov.alex@yandex.ru  
**ORCID:** 0000-0002-1953-3670  
**SPIN-код:** 7359-3564

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 05.04.2024  
После доработки 24.04.2024  
Принята к публикации 06.05.2024

Received 05.04.2024  
Revised 24.04.2024  
Accepted 06.05.2024

**Оригинальная статья**

УДК 53.09:54-116

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-72-82

**МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СПЛАВА ХН65ВМТЮ МЕТОДОМ  
ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ**

© 2024 г. Д. В. Комаров<sup>1,2</sup>, С. В. Коновалов<sup>1,3</sup>, Ю. Ф. Иванов<sup>4</sup>, И. А. Панченко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

<sup>2</sup>АО «Газпром диагностика» (Россия, 196158, Санкт-Петербург, ул. Пулковское шоссе, 40, корпус 4, литера D, помещение D8039)

<sup>3</sup>Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

<sup>4</sup>Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

**Аннотация.** Одним из перспективных методов повышения эксплуатационных характеристик деталей горячего тракта газотурбинных двигателей является изменение физико-химических свойств поверхностных слоев основного материала за счет применения радиационно-пучковых технологий, а именно импульсной электронно-пучковой обработки (ЭПО). В работе рассмотрены результаты модификации электронным лучом образцов, вырезанных из замковой части рабочих лопаток турбины высокого давления наземного газотурбинного компрессора ГТК-10-4 после эксплуатации в течение 37444 ч, выполненных из жаропрочного сплава на никелевой основе ХН65ВМТЮ без защитного покрытия. Изменяемым параметром обработки выбрана плотность энергии электронного пучка  $E_e$ , которая составила 15, 25 и 35 Дж/см<sup>2</sup>, длительность его воздействия и количество импульсов не варьировались. Измерение микротвердости и нанотвердости модифицированных слоев, а также исследование трибологических характеристик (коэффициента трения и скорости износа поверхностного слоя) поверхности обработанных образцов позволили определить оптимальный режим ЭПО из рассматриваемых, плотность энергии при котором составила 15 Дж/см<sup>2</sup>. Выдвинуты предположения о возможных причинах деградации трибологических свойств поверхностного слоя сплава относительно исходного состояния после ЭПО на других режимах, связанные с полученной структурой модифицированных слоев и наличием в нем трещин и объемных дефектов. Подтверждены основные положения теории направленной кристаллизации в условиях многокомпонентности сплава и высоких скоростей охлаждения поверхностного слоя. Отмечена невозможность применения импульсной ЭПО в условиях массового производства как самостоятельного финишного метода обработки. Использование указанной технологии возможно лишь при условии применения определенных режимов с последующей шлифовкой, необходимой для выравнивания развитого микрорельефа обработанной поверхности, а также снятия слоя металла в объеме, необходимом для устранения поверхностных трещин.

**Ключевые слова:** жаропрочный никелевый сплав, износостойкость, коэффициент трения, микротвердость, нанотвердость, электронно-пучковая обработка

**Финансирование.** Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00087-2401.

**Для цитирования:** Комаров Д.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Модификация поверхностного сплава ХН65ВМТЮ методом импульсной электронно-пучковой обработки. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):72–82. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-72-82](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-72-82)

*Original article*

**MODIFICATION OF THE SURFACE LAYER OF THE XH65BMTIO ALLOY BY THE METHOD OF PULSE ELECTRON BEAM TREATMENT**

© 2024 D. V. Komarov<sup>1,2</sup>, S. V. Konovalov<sup>3</sup>, Y. F. Ivanov<sup>4</sup>, I. A. Panchenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University (34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russian Federation)

<sup>2</sup>AO «Gazprom diagnostika» (40, housing 4, letter D, room D8039, Pulkovskoe shosse, Sankt-Peterburg, 196158, Russian Federation)

<sup>3</sup>Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

<sup>4</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS (2/3 pr. Akademicheskij, Tomsk, 634055, Russian Federation)

**Abstract.** One of the promising methods for increasing the performance characteristics of parts of the hot path of gas turbine engines is to change the physicochemical properties of the surface layers of the base material through the use of radiation beam technologies, namely pulsed electron beam processing (EBP). The paper examines the results of modification by an electron beam of samples cut from the locking part of the rotor blades (RB) of the high-pressure turbine (HPT) of the ground-based gas turbine compressor GTK-10-4 after operation for 37,444 hours, made of a heat-resistant nickel-based alloy XH65BMTIO without protective coating. The variable processing parameter was the electron beam energy density  $E_s$ , which was  $E_s = 15, 25$  and  $35 \text{ J/cm}^2$ , the duration of its exposure  $\tau$ , as well as the number of pulses  $N$  did not vary. Measurement of the microhardness and nanohardness of the modified layers, as well as the study of the tribological characteristics (friction coefficient  $\mu$  and wear rate of the surface layer  $V_{is}$ ) of the surface of the treated samples made it possible to determine the optimal EPO mode from those considered, the energy density at which was  $E_s = 15 \text{ J/cm}^2$ . Suggestions have been put forward about the possible reasons for the degradation of the tribological properties of the surface layer of the alloy relative to the initial state after EPB in other modes, related to the resulting structure of the modified layers and the presence of cracks and volumetric defects in it. The main provisions of the theory of directional crystallization under conditions of multicomponent alloy and high cooling rates of the surface layer have been confirmed. The impossibility of using pulsed EPB in mass production conditions as an independent finishing method of processing was noted. The use of this technology is possible only if certain modes are used with subsequent grinding necessary to level the developed microrelief of the treated surface, as well as remove the metal layer in the amount necessary to eliminate surface cracks.

**Keywords:** heat-resistant nickel alloy, wear resistance, coefficient of friction, micro-hardness, nanohardness, electron beam processing

**Funding.** Research was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-00087-2401.

**For citation:** Komarov D.V., Konovalov S.V. Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. Modification of the surface layer of the XH65BMTIO alloy by the method of pulse electron beam treatment. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):72–82. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-72-82](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-72-82)

**Введение**

В последние 15 – 20 лет производителям электронно-пучковых установок удалось произвести оборудование, обеспечивающее высокую плотностью энергии электронного луча в сочетании с низким ускоряющим напряжением, высокую энергетическую эффективность, широкий диапазон регулировки параметров и хорошую воспроизводимость импульсов, что позволило рассматривать электронно-пучковую обработку как наиболее перспективную технологию, поз-

воляющую получать новые уникальные физико-механические свойства обрабатываемых материалов, а, как следствие, формировать требуемые эксплуатационные свойства при обработке твердых тел из металлических материалов [1].

Сущность процесса электронно-пучковой обработки (ЭПО) заключается в преобразовании кинетической энергии потока электронов, сформированных в вакууме, в тепловую энергию в зоне взаимодействия с обрабатываемым твердым телом (мишенью). Взаимодействие между ускоренными

электронами и материалом мишени представляет собой сложный процесс. Как правило, одним из основных его результатов является изменение теплового поля в приповерхностных слоях обрабатываемого твердого тела, которое может сопровождаться нагревом, плавлением, испарением и структурно-фазовыми превращениями материала в зависимости от его свойств и условий обработки.

Необходимо отметить, что существующие математические модели расчета пространственно-временных характеристик теплового поля многокомпонентных сплавов имеют целый ряд допущений, что, в конечном счете, не позволяет точно оценить значение температуры в отдельных точках мишени со временем при ее нагреве и последующем охлаждении. А как следствие, не позволяет прогнозировать эволюцию механических и эксплуатационных свойств деталей и изделий после ЭПО на различных режимах. Именно поэтому широкое внедрение указанной технологии в промышленное производство возможно только после проведения большого объема испытаний и прикладных научных исследований.

Анализ работ, опубликованных отечественными авторами за последние годы [2; 3], позволил выделить несколько направлений, по которым развивалось применение ЭПО с целью модификации поверхности твердых тел из различных металлов и сплавов:

- ЭПО поверхностных слоев с применением классической термообработки или без нее;
- ЭПО поверхностных слоев после электро-взрывного легирования;
- ЭПО поверхностных слоев после наплавки;
- ЭПО поверхностных слоев аддитивных сплавов.

Выполненные научные исследования структурно-фазового состояния модифицированных электронным пучком образцов-свидетелей методами современного материаловедения, а также определение механических характеристик и проведение испытаний по установлению некоторых эксплуатационных свойств как до, так и после проведения ЭПО позволили не только принципиально подтвердить применимость указанной технологии к различным металлам и сплавам, но и определить оптимальные режимы электронного пучка в каждом рассматриваемом случае.

Большинство имеющихся на сегодняшний день работ посвящено изучению модифицирующего влияния ЭПО на стали, титановые и алюминидные сплавы, реже рассматриваются сплавы на никелевой и медной основе.

Целью настоящей работы стало изучение модифицирующего воздействия импульсной ЭПО на свойства жаропрочного никелевого сплава ХН65ВМТЮ без защитного покрытия, применяемого для изготовления лопаток и дисков турбин

наземных газотурбинных двигателей (ГТД), а также определение возможности применения технологии в массовом производстве.

Эволюцию свойств поверхностного слоя после обработки предложено определять путем установления коэффициента трения  $\mu$  и скорости износа поверхности образцов  $V_{из}$ , а также измерения микротвердости  $HV$ , нанотвердости  $V$  и модуля упругости  $E$  модифицированной зоны. Необходимо отметить, что до настоящего времени работа по подбору оптимальных режимов электронного пучка с целью обработки указанного сплава (а также родственных с ним материалов без защитных покрытий) в РФ не выполнялась. Наиболее близкие научные исследования отечественных авторов опубликованы в работах [4 – 7]. Однако изученные в этих работах сплавы содержали существенное количество кобальта и имели защитные покрытия системы Ni-Cr-Al-Y. В исследованиях зарубежных авторов использовали материалы, содержание никеля в которых существенно ниже, чем в сплаве ХН65ВМТЮ [8; 9].

#### Материал и принципы исследования

В качестве материала использовали образцы размером  $10 \times 10 \times 10$  мм из замковой части рабочих лопаток турбины высокого давления ГТК-10-4 после эксплуатации в течение 37444 ч, изготовленные из жаропрочного сплава ХН65ВМТЮ на никелевой основе следующего химического состава, мас. %: 0,02 – 0,04 С; 15,65 – 16,09 Cr; 8,85 – 9,4 W; 3,72 – 4,05 Mo; 1,32 – 1,47 Al; 1,29 – 1,54 Ti; 0,1 – 0,18 Si; 0,07 – 0,09 Mn; 0,02 Cu; 0,008 – 0,01 В; 0,025 Се; 0,005 S; 0,005 Р; остальное Ni. Перед обработкой поверхность образцов предварительно шлифовали и полировали до зеркального блеска. Электронно-пучковую обработку выполняли на вакуумной импульсной установке «СОЛЮ» Института сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН, Россия, г. Томск), на трех режимах, изменяя плотность энергии электронного пучка  $E_e$ . Длительность воздействия электронного пучка электронов  $t$ , а также количество импульсов воздействия  $N$  не изменялись ( $\tau = 200$  мкс;  $N = 1$ ). Трибологические свойства определялись в геометрии диск – штифт с помощью трибометра (CSEM, Швейцария) при комнатной температуре и влажности. В качестве контртела использовался шарик из карбида вольфрама диаметром 6 мм, радиус трека сосавлял 2 мм, скорость вращения – 25 мм/с, нагрузка – от 0,5 до 5 Н, дистанция до остановки – 50 м.

Объем износа поверхностного слоя определяли после установления геометрических размеров образовавшегося трека с помощью лазерного оптического профилометра MicroMeasure 3D Sation (Stil, Франция). Скорость износа рассчитывали по формуле:

$$V_{\text{из}} = \frac{2\pi R A_{\text{ср}}}{\sum_{i=1}^{n=2000} F_i L_i}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{из}}$  – скорость износа,  $\text{мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ ;  $R$  – радиус трека,  $\text{мм}$ ;  $A_{\text{ср}}$  – средняя площадь поперечного сечения канавки износа,  $\text{мм}^2$ ;  $n = 2000$  – время, в течение которого выполнялись испытания,  $\text{с}$ ;  $F_i$  – величина приложенной нагрузки к контртелу на  $i$ -ом временном отрезке,  $\text{Н}$ ;  $L_i$  – пройденная шариком дистанция на  $i$ -ом временном отрезке,  $\text{м}$ .

Микротвердость определялась на различных глубинах от обрабатываемой поверхности в соответствии с ГОСТ 9450 – 76 на микротвердомере HV-1000 (TIME Group Inc., Китай) методом вдавливания правильной четырехгранной алмазной пирамиды в течение 10 с при нагрузке 0,4903 Н (50 г).

Нанотвердость и модуль упругости определялись на различных глубинах от обрабатываемой поверхности в соответствии с ГОСТ Р 8.748 – 2011 на сканирующем нанотвердомере НаноСкан-4Д (ФГБНУ ТИСНУМ, Россия) методом вдавливания алмазного наконечника Берковича с совместным измерением перемещения наконечника ( $S = 10000 \text{ Н/мин}$ ) и силы ( $F = 0,30 \text{ мН}$ ), прикладываемой к наконечнику.

Микрошлифы образцов исследовались методом световой оптической микроскопии с 50 – 500-кратным увеличением на бинокулярном оптическом металлографическом инвертированном микроскопе МЕТАМ ЛВ-31 и методом сканирующей электронной микроскопии на настольном сканирующем электронном микроскопе Thermo Scientific Phenom (Phenom-World BV, Нидерланды) с программным пакетом Pro Suite.

### Основные результаты

Шероховатость поверхности лопаток турбин ГТД существенно влияет на коэффициент полезного действия всей установки [10; 11], а также на образование усталостных трещин [12]. Именно поэтому при выборе способа изготовления и технологии финишной обработки рабочих лопаток данный фактор требуется учитывать.

По результатам испытаний среднее значение коэффициента трения сплава в исходном состоянии составило 0,694. После обработки этот показатель увеличился на всех режимах и составил от 0,697 до 0,803. Однако необходимо учитывать, что негативная эволюция коэффициента во многом объясняется дистанцией контр-тела и нагрузкой, которая к нему прикладывается. Обусловлено это тем, что в некоторый момент времени поверхностный (упрочненный) слой образцов протирается.

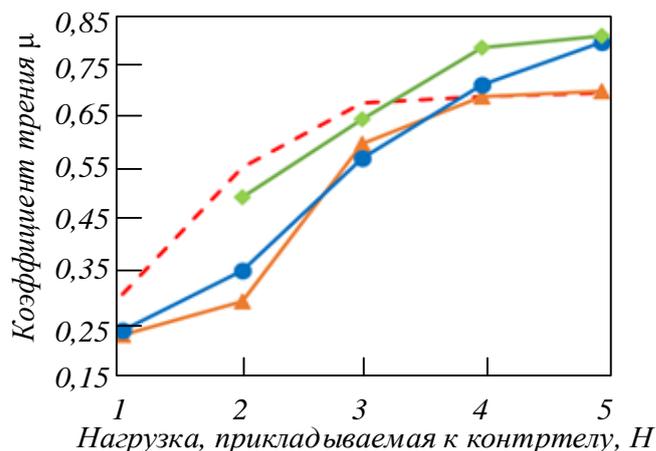


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения  $\mu$  образца в исходном состоянии (---), после обработки при  $E_s$ , равном 15, 25 и 35  $\text{Дж/см}^2$  (▲, ●, ◆), от минимальной нагрузки, прикладываемой к контртелу трибометра: 1 – 2 Н; 2 – 3 Н; 3 – 3,5 Н; 4 – 4 Н; 5 – 5 Н

Fig. 2. Dependence of the coefficient of friction  $\mu$  of the sample in the initial state (---), after processing at  $E_s$  equal to 15, 25 and 35  $\text{J/cm}^2$  (▲, ●, ◆) on the minimum load applied to the counterbody of the tribometer:

1 – 2 Н; 2 – 3 Н; 3 – 3,5 Н; 4 – 4 Н; 5 – 5 Н

С этого момента результаты испытаний характеризуют уже свойства не модифицированной поверхности, а подповерхностного слоя. Именно поэтому для более точной оценки коэффициента трения, а, соответственно, и установления оптимального режима ЭПО указанный показатель предложено оценивать при небольших нагрузках, действующих на контртело.

Для решения поставленной задачи исходный массив данных был разделен на четыре диапазона по прикладываемой к шариком нагрузке: 2, 3, 3,5 и 4 Н. Затем для каждого режима ЭПО в зависимости от плотности электронного луча были определены средние значения коэффициента трения (рис. 1). На всех образцах как в исходном состоянии, так и после обработки при увеличении нагрузки на контр-тело в зависимости от степени выкрашивания поверхностного слоя коэффициент трения увеличивается. Внешний вид образцов, подвергнутых облучению ЭПО при различных режимах, после трибологических испытаний показан на рис. 2.

Установлено, что при нагрузках менее 3 Н значения коэффициента оказалось меньше относительно исходного состояния. На графике видно, что лучшее соотношение между показателями, характеризующими шероховатость поверхности, получилось при плотности энергии электронного пучка 15  $\text{Дж/см}^2$ .



Рис. 3. Внешний вид образцов, подвергнутых облучению интенсивным электронным пучком после трибологических испытаний:

$a - E_s = 15 \text{ Дж/см}^2$ ;  $b - E_s = 25 \text{ Дж/см}^2$ ;  $v - E_s = 35 \text{ Дж/см}^2$

Fig. 4. Appearance of samples irradiated with an intense electron beam at different energy density levels  $E_s$ , after tribological tests:

$a - E_s = 15 \text{ J/cm}^2$ ;  $b - E_s = 25 \text{ J/cm}^2$ ;  $v - E_s = 35 \text{ J/cm}^2$

Определение скорости износа поверхностного слоя показало существенное ухудшение показателя при плотностях энергии 25 и 35 Дж/см<sup>2</sup>. В частности, на режиме  $E_s = 25 \text{ Дж/см}^2$  скорость износа  $V_{\text{из}}$ , рассчитанная по объему износа поверхностного слоя материала, увеличилась в 4,1 раза, при  $E_s = 35 \text{ Дж/см}^2$  – в 5,9 раза. На режиме  $E_s = 15 \text{ Дж/см}^2$  наблюдалось уменьшение показателя  $V_{\text{из}}$  в 1,1 раза относительно исходного состояния сплава.

Деградация указанного параметра может быть объяснена, с одной стороны, развитой сеткой трещин, сформированных на поверхности мишеней в результате быстрого нагрева и охлаждения материала, с другой стороны, неоднородностью структуры и наличием газовых пор в модифицированном объеме сплава. Так, сформированная зеренная структура на обработанных электронным лучом поверхностях (рис. 3) позволяет сделать вывод о том, что более мелкий размер ячеек и высокая степень их однородности соответствуют режиму  $E_s = 15 \text{ Дж/см}^2$ , на котором была зафиксирована скорость износа поверхностного слоя  $V_{\text{из}}$ , превышающая указанный параметр как в исходном состоянии, так и после ЭПО на других режимах.

Вместе с тем трещины, возникшие в результате обработки образца электронным пучком на режиме  $E_s = 15 \text{ Дж/см}^2$ , в большинстве своем носят одиночный характер глубиной не более 5 мкм

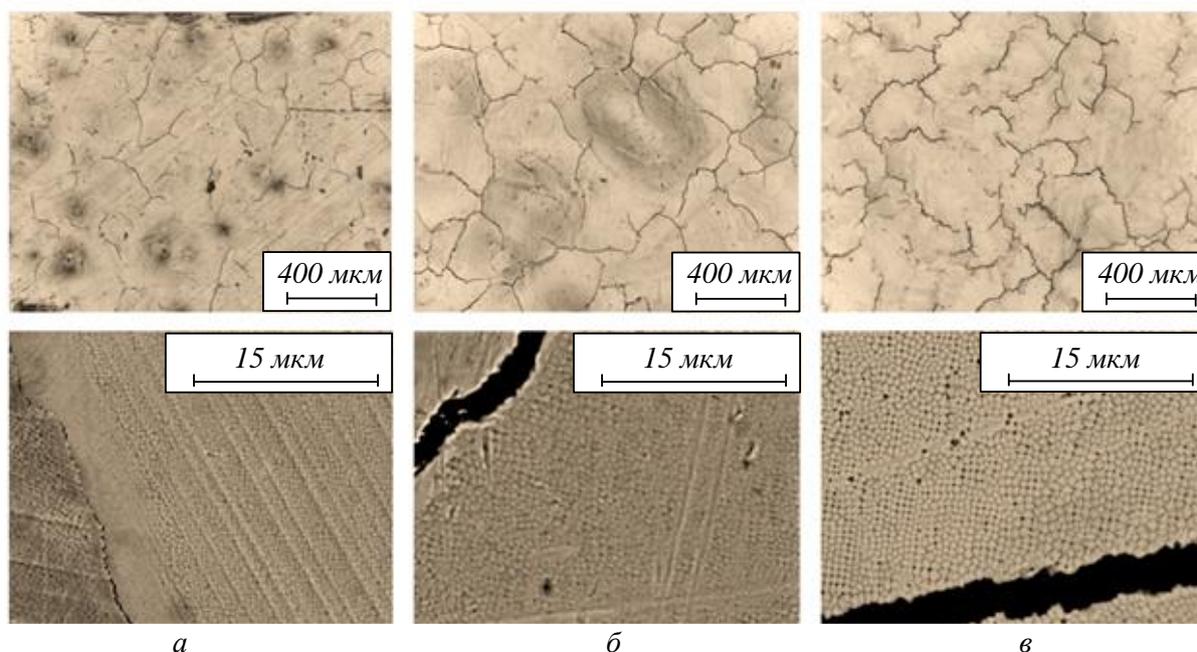


Рис. 5. Поверхность образцов после ЭПО на различных режимах:

$a - E_s = 15 \text{ Дж/см}^2$ ;  $b - E_s = 25 \text{ Дж/см}^2$ ;  $v - E_s = 35 \text{ Дж/см}^2$

Fig. 6. Surface of samples after EBP in various modes:

$a - E_s = 15 \text{ J/cm}^2$ ;  $b - E_s = 25 \text{ J/cm}^2$ ;  $v - E_s = 35 \text{ J/cm}^2$

**Значения микротвердости образцов сплава ХН65ВМТЮ, подвергнутых облучению интенсивным электронным пучком**

**Table 1. Microhardness values of ХН65ВМТЮ alloy samples subjected to irradiation with an intense electron beam**

$E_s$ , Дж/см <sup>2</sup>	Микротвердость, МПа образцов на глубине от обработанной поверхности, мкм				
	20	40	60	80	100
15	422,06	434,86	418,24	410,40	391,28
25	426,92	436,80	396,66	376,06	384,20
35	361,44	440,10	427,78	396,54	385,14

Пр и м е ч а н и е: микротвердость сплава в исходном состоянии составила 307,80 МПа.

(рис. 3. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, а), в отличие от подобных поверхностных дефектов, полученных на режимах  $E_s = 25$  и  $E_s = 35$  Дж/см<sup>2</sup> (рис. 3, б, в), глубина которых оказалось сопоставимой с размером модифицированной зоны и в отдельных случаях достигала 40 мкм.

Кроме трещин на поверхности образцов, обработанных на режимах  $E_s = 15$  и  $E_s = 25$  Дж/см<sup>2</sup>, присутствуют зоны углублений (кратеры) диаметром от 25 до 75 мкм и от 200 до 660 мкм соответственно, вероятно возникшие в ходе усадки материала при его высокоскоростной кристаллизации. На режиме  $E_s = 35$  Дж/см<sup>2</sup> указанные дефекты не выявлены.

Необходимо отметить, что вероятность кратерообразования может быть снижена за счет увеличения количества импульсов ЭПО, так как при таком режиме облучения происходит выглаживание микрорельефа поверхности [13], что, в конечном счете, поможет увеличить эффективность технологии.

Микротвердость модифицированных слоев, измеренная на различных глубинах от поверхности обработки (табл. 1), для всех режимов стала выше, чем в исходном состоянии, что, в свою очередь, также может оказывать влияние на охрупчивание сплава и скорость износа поверхностного слоя. Так, среднее значение микротвердости в поверхностном слое после ЭПО при  $E_s = 15$  Дж/см<sup>2</sup> увеличилось в 1,35 раза, при  $E_s = 25$  Дж/см<sup>2</sup> – в 1,31 раза, при  $E_s = 35$  Дж/см<sup>2</sup> – в 1,30 раз. Снижение значения показателя для режима с  $E_s = 35$  Дж/см<sup>2</sup> на глубине 20 мкм, вероятнее всего, связано с высоким количеством газовых пор, образованных в поверхностном слое образца под воздействием электронного луча, делающих, с одной стороны, структуру менее однородной, а с другой – осложняющих процесс визуального определения границ следа от индентора при измерении микротвердости. Также необходимо отметить, что теплоотвод в основной объем материала со скоростью  $10^4$  –  $10^9$  К/с [14], обеспечивающий охлаждение по-

верхностного слоя, привел к увеличению микротвердости материала не только на поверхности, но и к увеличению указанного параметра в центре образцов в 1,12 – 1,27 раз.

В общем случае при условии гомогенности структуры показатели твердости и износостойкости коррелируют между собой и имеют прямопропорциональную зависимость. Например, такая зависимость хорошо видна в работе [15].

В рассматриваемом примере данная зависимость подтверждается обнаруженной корреляцией между средними значениями микротвердости, измеренной на глубине до 100 мкм, и скоростями износа модифицированных слоев, которая составила  $r_{VHV} = -0,977$  и говорит о том, что большему значению микротвердости соответствует меньшее значение скорости износа.

Также в работе методом наноиндентирования исследовались изменения нанотвердости  $V$  и модуля упругости  $E$ . Известно, что указанные характеристики являются весьма информативными, определяющими механические свойства сплава: твердость характеризует сопротивление упругой деформации и пластическому течению, а модуль упругости – упругие свойства сплавов. Комбинация твердости и упругости обуславливает стойкость к износу материала [16].

Нанотвердость модифицированных слоев на различных глубинах от поверхности обработки для всех режимов также стала выше, чем в исходном состоянии (табл. 2), а именно, значение нанотвердости при  $E_s = 15$  Дж/см<sup>2</sup> превысило характеристики металла в исходном состоянии приблизительно в 1,7 – 2,8 раза, при  $E_s = 25$  Дж/см<sup>2</sup> – в 4,5 – 7,1 раза, при  $E_s = 35$  Дж/см<sup>2</sup> – в 1,8 – 1,9 раза. Необходимо отметить, что в общем случае профили нанотвердости являются убывающими до значений, превышающих нанотвердость сплава в состоянии поставки. Кривая для режима  $E_s = 35$  Дж/см<sup>2</sup> имеет монотонный характер, нанотвердость существенно не изменяется на всем диапазоне измерений.

**Значения нанотвердости образцов сплава ХН65ВМТЮ, подвергнутых облучению интенсивным электронным пучком***Table 2. Nanohardness values of ХН65ВМТЮ alloy samples subjected to irradiation with an intense electron beam*

$E_s$ , Дж/см <sup>2</sup>	Нанотвердость, ГПа, образцов на глубине от обработанной поверхности, мкм						
	10	20	30	40	50	60	70
15	18,03	14,92	12,58	11,17	11,10	11,07	10,97
25	40,12	45,96	44,28	37,62	34,66	30,52	29,27
35	12,50	11,71	11,85	11,67	11,55	12,03	12,47

П р и м е ч а н и е: нанотвердость сплава в исходном состоянии составила 6,45 ГПа.

Увеличение значений нанотвердости после ЭПО относительно аналогичного параметра в состоянии поставки сплава можно связать с формированием мелкозернистой структуры в модифицированной области, полученной в связи с быстрой кристаллизацией расплавленного слоя, а также деформационного упрочнения подповерхностного слоя [17].

Значения модуля упругости, измеренные на глубине до 70 мкм от обработанных поверхностей на всех режимах, превысили указанный параметр в исходном состоянии, который составил 49,85 ГПа. При этом разброс значений оказался существенным: при  $E_s = 25$  Дж/см<sup>2</sup> значение параметра увеличилось в 8 – 12 раз, при  $E_s = 25$  Дж/см<sup>2</sup> – в 16 – 27 раз, при  $E_s = 35$  Дж/см<sup>2</sup> – в 2 – 4 раза.

Определение химического состава сплава, выполненное как на обработанных поверхностях, так и на поперечных шлифах на глубине до 64 мкм, позволило на основании перераспределения элементов сплава после ЭПО подтвердить основные положения теории направленной кристаллизации и получить схожие результаты сформулированы в работах [6; 7]. Так, в указанных работах в ходе облучения жаропрочного сплава на никелевой основе электронным пучком с низкими плотностями энергии ( $E_s = 20 \div 22$  Дж/см<sup>2</sup>) удалось установить, что примеси с коэффициентом распределения  $K_0 > 1$  оттесняются фронтом кристаллизации к поверхности (хром, углерод, алюминий), в то время как компоненты с  $K_0 < 1$  (молибден, вольфрам) кристаллизуются на границе раздела перекристаллизованный материал – матричный сплав.

В частности, для образца, обработанного на режиме  $E_s = 15$  Дж/см<sup>2</sup>, удалось установить, что содержание алюминия в подповерхностном слое увеличилось в 4,17 раз относительно исходного состояния и оставалось выше состояния поставки сплава во всем диапазоне, на котором выполнялось исследование (сравнение содержания элементов до и после импульсной ЭПО оцени-

валось по массовым количествам). Содержание титана в подповерхностном слое оказалось выше в 1,42 раза. При этом его содержание в слоях с увеличением глубины уменьшалось и на отметке в 60 мкм достигло значения исходного состояния сплава. Содержание хрома увеличилось во всем диапазоне, но незначительно, в среднем в 1,07 раза. При этом среднее содержание таких легирующих элементов, как молибден и вольфрам на глубине до 64 мкм уменьшилось в 1,91 и 2,47 раза соответственно.

Исходя из основных положений о влиянии легирующих элементов на жаропрочность никелевых сплавов [18], можно сделать предположение, что перераспределение элементов в модифицированном слое сплава после импульсной ЭПО позволит улучшить его жаростойкость за счет увеличенного содержания хрома и титана, а также обеспечит более эффективную защиту деталей от высокотемпературной газовой коррозии за счет существенного увеличения содержания алюминия в поверхностном слое.

Несмотря на то, что в работе модификация поверхностного слоя сплава ХН65ВМТЮ методом импульсной ЭПО исследовалась на образцах после эксплуатации, полученные данные можно считать репрезентативными в целом для материала, так как металл замковой части лопаток незначительно деградирует в ходе эксплуатации и может характеризовать свойства сплава в исходном состоянии [19].

Для использования технологии импульсной ЭПО в массовом производстве необходимо учитывать, что после модификации поверхностных слоев сплава ХН65ВМТЮ на всех режимах наблюдались поверхностные трещины глубиной от 5 до 40 мкм. При этом упрочнение материала удалось достигнуть на глубине до 70 мкм и более от поверхности. Поэтому для устранения поверхностных трещин после импульсной ЭПО сплава ХН65ВМТЮ требуется осуществлять поверхностную обработку. Одним из ярких

примеров такой технологии является роботизированная адаптивная размерная полировка [20].

Кроме того, для увеличения надежности и долговечности лопаток в поверхностном слое необходимо создать оптимальные остаточные напряжения сжатия [21], например, с помощью проведения термической обработки изделий.

### Выводы

Проведение импульсной ЭПО жаропрочного никелевого сплава ХН65ВМТЮ на режимах  $E_s$ , равном 15, 25 и 35 Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 200$  мкс,  $N = 1$  позволило повысить среднюю микротвердость в модифицированном слое в 1,30 – 1,35 раза, а также среднюю нанотвердость в 1,7 – 7,1 раза.

Коэффициент шероховатости, определенный до момента протирания поверхностного слоя, на всех режимах имел более низкое значение относительно сплава в исходном состоянии, что имеет большое значение для достижения более высоких значений КПД ГТД.

Оценка износостойкости сплава после ЭПО, выполненная по скорости износа модифицированного слоя, показала, что на режиме  $E_s = 15$  Дж/см<sup>2</sup> значение показателя увеличилось в 1,1 раза, на режимах  $E_s$ , равном 25 и 35 Дж/см<sup>2</sup>, параметр деградировал в 4,1 и 5,9 раз соответственно, что, скорее всего, объясняется наличием большого количества дефектов, образовавшихся в поверхностном слое образцов при облучении электронным пучком.

Определение химического состава модифицированного слоя на поперечных шлифах показало увеличение массового количества алюминия, титана и хрома вблизи обработанных поверхностей, что, в свою очередь, должно способствовать увеличению жаростойкости материала после ЭПО, а также позволит обеспечить более эффективную защиту деталей из сплава ХН65ВМТЮ от высокотемпературной газовой эрозии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ivanov Y.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Y.A., Semin A.P. Prospects for the Application of Surface Treatment of Alloys by Electron Beams in State-of-the-Art Technologies. *Uspehi Fiziki Metallov*. 2022;21(3):345–362. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345>
- Комаров Д.В., Коновалов С.В., Жуков Д.В., Виноградов И.С., Панченко И.А. Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. Часть 1. *Ползуновский вестник*. 2021;4:129–139. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.017>; EDN: PEMXHD.
- Комаров Д.В., Коновалов С.В., Жуков Д.В., Виноградов И.С., Панченко И.А. Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. Часть 2. *Ползуновский вестник*. 2022;3:204–215. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028>; EDN: VAJZCT.
- Шулов В.А., Энгелько В.И., Громов А.Н., Теряев Д.А., Быщенко О.А., Ширваньянц Г.Г. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для восстановления эксплуатационных свойств лопаток газотурбинных двигателей. *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2014; 1:43–49. EDN: RYEQWL.
- Шулов В.А., Громов А.Н., Теряев Д.А., Энгелько В.И. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для модифицирования поверхности лопаток газотурбинных двигателей (обзор). *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2015;1:38–48. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-1-38-48>; EDN: TNHGB.
- Шулов В.А., Крайников А.В., Пайкин А.Г., Быщенко О.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Модифицирование жаростойкого вакуумно-дугового покрытия NiCrAlY на поверхности лопаток из жаропрочных никелевых сплавов ЖС6У и ЖС26НК сильноточными импульсными электронными пучками. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2009;2:37–40. EDN: KWJKAN.
- Новиков А.С., Пайкин А.Г., Шулов В.А., Быщенко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Результаты длительных испытаний на технологическом двигателе РД33 лопаток компрессора ГТД из стали ЭП866Ш, облученных сильноточным импульсным электронным пучком. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2010;9:18–22. EDN: MUFMUF.
- Lyu P., Chen Y., Liu Z., Cai J., Zhang C., Jin Y., Guan Q., Zhao N. Surface modification of CrFeCoNiMo high entropy alloy induced by high-current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2020;504:144453. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144453>.
- Zhao G., Zhang P., Li J., Zhang Z., Li H., Ma L. Effects of different scanning speeds on microstructure evolution and tribological properties of Inconel 718 alloy vacuum electron beam surface modification. *Materials Today Sustainability*. 2024;25:100613. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100613>.

10. Хайрулин В.Т., Самохвалов Н.Ю., Тихонов А.С., Сендюров С.И. Результаты экспериментального исследования лопаток турбин с различной поверхностной шероховатостью. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника.* 2015;42:20–33. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2015.42.2>. EDN: TZQU DL.
11. Liu J., Li Z., Hanachi H. A physics-based framework for online surface roughness assessment for high-pressure turbines. *Chinese Journal of Aeronautics.* 2021;34(7):135–156. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.06.015>
12. Носов Н.В., Абрамов А.Д., Косулин С.И. Оценка микроструктуры поверхности профиля пера лопаток газотурбинного двигателя. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение.* 2017;16(2):90–100. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-2-90-100>. EDN: ZAETLZ.
13. Шулов В.А., Энгелько В.И., Громов А.Н., Теряев Д.А., Быценко О.А., Ширваньянц Г.Г. Кратерообразование на поверхности деталей из титановых сплавов при облучении сильноточными импульсными электронными пучками. *Физика и химия обработки материалов.* 2015;5:22–28. EDN: UXBPTV.
14. Громов В.Е., Коновалов С.В., Аксёнова К.В., Кобзарева Т.Ю. *Эволюция структуры и свойств легких сплавов при энергетических воздействиях.* Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016:249.
15. Токтарбаева Г.М., Алпысбаев С.К., Рахадиллов Б.К., Сатабаева З.А., Жапарова М.С. Влияние электролитно-плазменного упрочнения поверхности на структуру и свойства стали 40XH. *Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева.* 2020;1:199–204. [https://doi.org/10.51885/15614212\\_2020\\_1\\_199](https://doi.org/10.51885/15614212_2020_1_199). EDN: QZKRJI.
16. Муслев С.А., Лотков А.И. Нанотвердость и модуль упругости монокристаллов и поликристаллов системы сплавов TiNi-TiFe. *Физическая мезомеханика.* 2022;25(6):57–62. [https://doi.org/10.55652/1683-805X\\_2022\\_25\\_6\\_57](https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_6_57). EDN: ALVTYQ.
17. Gao Y. Surface modification of TC4 titanium alloy by high current pulsed electron beam (HCPEB) with different pulsed energy densities. *J. Alloys and Comps.* 2013;572:180–185.
18. Мысик Р.К., Сулинин А.В., Брусницын С.В. Литейные сплавы на основе тяжелых цветных металлов. Учебное пособие для вузов. Москва: Юрайт, 2022:140.
19. Белявин А.Ф., Куренкова В.В., Федотов Д.А., Салий С.Г., Щербинин А.П. Продление ресурса рабочих лопаток ГТК 10-4 из сплава ЭИ 893 после продолжительного срока эксплуатации. *Автоматическая сварка.* 2016; 4(752):9–25.
20. Мубаракшин Р.М., Дическул М.Д., Николаев Н.Н., Травкин А.А., Мубаракшин Р.М., Мубаракшин М.Р. Роботизированная адаптивная размерная полировка компрессорных и турбинных лопаток. *Авиационные двигатели.* 2021;4(13):51–62. [https://doi.org/10.54349/26586061\\_2021\\_4\\_51](https://doi.org/10.54349/26586061_2021_4_51) EDN: YGFKKK.
21. Сазонов М.Б., Соловацкая Л. В. Влияние напряжённого состояния поверхностного слоя на выносливость лопаток компрессора газотурбинного двигателя. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение.* 2019;18(1):109–117. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-1-109-117>. EDN: ZDUVLV.

## REFERENCES

1. Ivanov Y.F., Gromov V.E, Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Y.A., Semin A.P. *Prog. Phys. Met.* 2022;21(3):345–362.
2. Komarov D.V., Konovalov S.V., Zhukov D.V., Vinogradov I.S., Panchenko I.A. Analiz sovremennoj situacii v oblasti primeneniya elektronno-puchkovej obrabotki razlichnyh splavov. Part 1. *Polzunovskij vestnik.* 2021;4:129–139. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2021.04.0174>; EDN: PEMXHD.
3. Komarov D.V., Konovalov S.V., Zhukov D.V., Vinogradov I.S., Panchenko I.A. Analiz sovremennoj situacii v oblasti primeneniya elektronno-puchkovej obrabotki razlichnyh splavov. Part 2. *Polzunovskij vestnik.* 2022;3:204–215. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028>. EDN: VAJZCT.
4. Shulov V.A., Engel'ko V.I., Gromov A.N., Teryaev D.A., Bycenko O.A., Shirvan'yanc G.G. Primenenie sil'notochnyh impul'snyh elektronnyh puchkov dlya vosstanovleniya ekspluatacionnyh svojstv lopatok gazoturbinnnyh dvigatelej. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Poroshkovaya metallurgiya i funkcional'nye pokrytiya.* 2014;1:43–49. EDN: RYEQWL.
5. Shulov V.A., Gromov A.N., Teryaev D.A., Engel'ko V.I. Primenenie sil'notochnyh impul'snyh elektronnyh puchkov dlya modifitsiro-

- vaniya poverhnosti lopatok gazoturbinnih dvigatelej (review). *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2015;1:38–48. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-1-38-48>; EDN: TNIHGB.
6. Shulov V.A., Krajnikov A.V., Pajkin A.G., Bycenko O.A., Engel'ko V.I., Tkachenko K.I. Modificirovanie zharostojkogo vakuumnodugovogo pokrytiya NiCrAlY na poverhnosti lopatok iz zharoprochnykh nikel'nykh splavov ZhS6U i ZhS26NK sil'notochnymi impul'snymi elektronnyimi puchkami. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2009;2:37–40. EDN: KWJKAN.
  7. Novikov A.S., Pajkin A.G., Shulov V.A., Bycenko O.A., Teryaev D.A., Engel'ko V.I., Tkachenko K.I. Rezul'taty dlitel'nykh ispytaniy na tekhnologicheskom dvigatеле RD33 lopatok kompressora GTD iz stali EP866Sh, obluchennykh sil'notochnym impul'snym elektronnyim puchkom. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2010;9:18–22. EDN: MUFMUF.
  8. Zhao G., Zhang P., Li J., Zhang Z., Li H., Ma L. Surface modification of CrFeCoNiMo high entropy alloy induced by high-current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2020;504:144453. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144453>.
  9. Zhao G., Zhang P., Li J., Zhang Z., Li H., Ma L. Effects of different scanning speeds on microstructure evolution and tribological properties of Inconel 718 alloy vacuum electron beam surface modification. *Materials Today Sustainability*. 2024;25:100613. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100613>.
  10. Hajruln V.T., Samohvalov N.Yu., Tihonov A.S., Sendyurev S.I. Rezul'taty eksperimental'nogo issledovaniya lopatok turbin s razlichnoj poverhnostnoj sferohovatos't'yu. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*. 2015;42:20–33. <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2015.42.2>; EDN: TZQUDL.
  11. Liu J., Li Z., Hanachi H. A physics-based framework for online surface roughness assessment for high-pressure turbines. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2021;34(7):135–156.
  12. Nosov N.V., Abramov A.D., Kosulin S.I. Ocenka mikrostruktury poverhnosti profilya pera lopatok gazoturbinnogo dvigatelya. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*. 2017;16(2):90–100. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2017-16-2-90-100>; EDN: ZAETLZ.
  13. Shulov V.A., Engel'ko V.I., Gromov A.N., Teryaev D.A., Bycenko O.A., Shirvan'yanc G.G. Krateroobrazovanie na poverhnosti detalej iz titanovykh splavov pri oblucheniisil'notochnymi impul'snymi elektronnyimi puchkami. *Fizika i himiya obrabotki materialov*. 2015;5:22–28. EDN: UXBPTV.
  14. Gromov V.E., Konovalov S.V., Aksyonova K.V., Kobzareva T.Yu. *Evolyuciya struktury i svoystv legkih splavov pri energeticheskikh vozdeystviyah*. Min-vo obr. i nauki RF, SibGIU, Mezhgos. Koordinac. Sovet po fizike prochnosti i plastichnosti materialov. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2016:249.
  15. Toktarbaeva G.M., Alpysbaev S.K., Rahadilov B.K., Satabaeva Z.A., Zhaparova M.S. Vliyanie elektrolitno-plazmennogo uprochneniya poverhnosti na strukturu i svoystva stali 40HN. *Vestnik Vostochno-Kazahstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbaeva*. 2020;1:199–204. [https://doi.org/10.51885/15614212\\_2020\\_1\\_199](https://doi.org/10.51885/15614212_2020_1_199) EDN: QZKRJI.
  16. Muslov S.A., Lotkov A.I. Nanotverdost' i modul' uprugosti monokristallov i polikristallov sistemy splavov TiNi–TiFe. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2022;25(6):57–62. [https://doi.org/10.55652/1683-805X\\_2022\\_25\\_6\\_57](https://doi.org/10.55652/1683-805X_2022_25_6_57); EDN: ALVITYQ.
  17. Gao Y. Surface modification of TC4 titanium alloy by high current pulsed electron beam (HCPEB) with different pulsed energy densities. *J. Alloys and Comps*. 2013;572:180–185.
  18. Mysik R.K., Sulinin A.V., Brusnicyn S.V. Litejnye splavy na osnove tyazhelykh cvetnykh metallov: uchebnoe posobie dlya srednego professional'nogo obrazovaniya. Moscow: Yurajt, 2024:140.
  19. Belyavin A.F., Kurenkova V.V., Fedotov D.A., Salij S.G., Shcherbinin A.P. Prodlenie resursa rabochih lopatok GTK 10-4 iz splava EI 893 posle prodolzhitel'nogo sroka ekspluatatsii. *Avtomaticheskaya svarka*. 2016; 4(752):9–25.
  20. Mubarakshin R.M., Dicheskul M.D., Nikolaev N.N., Travkin A.A., Mubarakshin R.M. Robotizirovannaya adaptivnaya razmernaya polirovka kompressornykh i turbinnnykh lopatok. *Aviacionnye dvigateli*. 2021;4(13):51–62. [https://doi.org/10.54349/26586061\\_2021\\_4\\_51](https://doi.org/10.54349/26586061_2021_4_51) EDN: YGFKKK.
  21. Sazonov M.B., Solovackaya L. V. Vliyanie napryazhyonnogo sostoyaniya poverhnostnogo sloya na vynoslivost' lopatok kompressora gazoturbinnogo dvigatelya. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*. 2019;18(1):109–117. <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2019-18-1-109-117>; EDN: ZDUVLV.

**Сведения об авторах**

**Дмитрий Валерьевич Комаров**, аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева; начальник отдела организации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, АО «Газпром диагностика»

**E-mail:** komarov\_dimitriy@mail.ru

**ORCID:** 0000-0002-2003-2021

**SPIN-код:** 2858-2704

**Сергей Валерьевич Коновалов**, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет; профессор кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

**E-mail:** konovalov@sibsiu.ru

**ORCID:** 0000-0003-4809-8660

**SPIN-код:** 4391-7210

**Юрий Федорович Иванов**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники СО РАН

**E-mail:** yufi55@mail.ru

**ORCID:** 0000-0001-8022-7958

**SPIN-код:** 7576-4810

**Ирина Алексеевна Панченко**, к.т.н., доцент кафедры менеджмента качества и инноваций, заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет.

**E-mail:** i.r.i.ss@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0002-1631-9644

**SPIN-код:** 4253-6679

**Information about the authors**

**Dmitrij V. Komarov**, Postgraduate student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials

Science, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev; Head of the Research and Development Department, АО «Gazprom diagnostika»

**E-mail:** komarov\_dimitriy@mail.ru

**ORCID:** 0000-0002-2003-2021

**SPIN-код:** 2858-2704

**Sergej V. Konovalov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Scientific and Innovation Activities, Siberian State Industrial University; Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev

**E-mail:** konovalov@sibsiu.ru

**ORCID:** 0000-0003-4809-8660

**SPIN-код:** 4391-7210

**Yurij F. Ivanov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Chief Researcher, Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS

**E-mail:** yufi55@mail.ru

**ORCID:** 0000-0001-8022-7958.

**SPIN-код:** 7576-4810

**Irina A. Panchenko**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Quality Management and Innovation, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

**E-mail:** i.r.i.ss@yandex.ru

**ORCID:** 0000-0002-1631-9644

**SPIN-код:** 4253-6679

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

Поступила в редакцию 06.05.2024

После доработки 10.06.2024

Принята к публикации 14.06.2020

Received 06.05.2024

Revised 10.06.2024

Accepted 14.06.2020

**Обзорная статья**

УДК 669.1

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-83-91

**СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ФУТЕРОВОК РАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ  
ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

© 2024 г. А. С. Запольский<sup>1,2</sup>, М. В. Темлянцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Кузнецкие ферросплавы» (654034, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Обнорского, 170)

<sup>2</sup>Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Определены факторы, влияющие на срок службы футеровки разливочных ковшей. Исследованы способы повышения стойкости футеровки разливочных ковшей ферросплавного производства. Приведены несколько составов для защиты футеровки от контакта жидкого металла и шлака. Просушивание после ремонта (изготовления) футеровки разливочных ковшей в специальной сушильной камере, в которой теплогенерация реализуется посредством сжигания дизельного топлива, приводит к тому, что около 80 % тепла выбрасывается в атмосферу и не полностью удаляется влага из огнеупоров. Указаны основные данные по влиянию разогрева футеровки ковшей ферросплавного производства на ее срок службы и безопасность процесса разлива расплава металла. Рассмотрены различные конструкции стенок суши и разогрева разливочных ковшей, выполнено их сравнение. Выбор конструкции стенда зависит от конкретных условий производства, включая доступность ресурсов, емкость и габариты ковшей, требования безопасности и экологические нормы. Нанесение защитных покрытий на огнеупорную футеровку и использование конструкции электрического или плазменного стенок для суши и разогрева разливочных ковшей являются наиболее современными решениями, позволяющими снизить затраты производства, обеспечить оптимальную механизацию и автоматизацию технологического процесса при соблюдении установленных требований промышленной безопасности с минимальным воздействием на окружающую среду.

**Ключевые слова:** ферросплавное производство, огнеупорная футеровка, защитный слой, стойкость футеровки, стенок разогрева, сушка, разогрев футеровки

**Для цитирования:** Запольский А.С., Темлянцев М.В. Способы повышения стойкости футеровок разливочных ковшей ферросплавного производства. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):83–91. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-83-91](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-83-91)

**Review article**

**APPROACHES TO INCREASE THE DURABILITY OF THE LINING OF CASTING  
LADLES OF FERROALLOY PRODUCTION**

© 2024 A. S. Zapol'skii<sup>1,2</sup>, M. V. Temlyantsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC Kuznetsk Ferroalloys (170 Obnorsky Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

<sup>2</sup>Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

**Abstract.** The factors influencing the service life of the lining of filling vessels have been determined. The methods of increasing the durability of the lining of casting ladles of ferroalloy production are investigated. Several variants of compositions for protecting the lining from contact of liquid metal and slag are given. Drying after repair

(manufacture) of the lining of filling buckets in a special drying chamber, in which heat generation is realized by burning diesel fuel, leads to the fact that about 80% of the heat is released into the atmosphere and moisture is not completely removed from the refractories. The main data on the effect of heating the lining of ferroalloy ladles on its service life and the safety of the molten metal casting process are indicated. Various designs of drying and heating stands for filling buckets are considered, and their comparison is performed. The choice of stand design depends on the specific production conditions, including resource availability, bucket capacity and dimensions, safety requirements and environmental standards. The application of protective coatings on the refractory lining and the use of an electric or plasma stand design for drying and heating filling buckets are the most modern solutions that reduce production costs, ensure optimal mechanization and automation of the technological process while complying with established industrial safety requirements with minimal environmental impact.

**Keywords:** ferroalloy production, refractory lining, protective layer, lining durability, heating stands, drying, heating of the lining

**For citation:** Zapol'skii A.S., Temlyantsev M.V. Approaches to increase the durability of lining ladles of ferroalloy production. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):83–91. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-83-91](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-83-91)

### Введение

Разливочный ковш входит в перечень основного оборудования, используемого в металлургии, в том числе при производстве ферросплавов. Он применяется для приема, транспортировки и разлива расплава металла. Без эффективной и надежной конструкции разливочного ковша невозможно обеспечить стабильную работу плавильного цеха. При этом срок службы ковша в значительной степени зависит от стойкости футеровки [1].

В настоящее время на большинстве ферросплавных производств России для разлива ферросилиция применяются ковши, футерованные огнеупорным кирпичом. Анализ стойкости футеровки разливочных ковшей показал, что износ футеровки происходит неравномерно, максимальные повреждения образуются в местах падения струи металла и вблизи шлакового пояса. Высокие температуры приводят к растворению огнеупорного материала из-за химического взаимодействия с агрессивной средой расплава металла, которая разрушает огнеупорный материал [2; 3]. При применении для футеровки ферросплавных ковшей шамотных огнеупоров ее стойкость не высока и в среднем составляет 5 – 8 наливов [1].

### Способов повышения стойкости футеровки

Повысить срок службы футеровки разливочных ковшей возможно за счет увеличения количества слоев кладки из огнеупорных кирпичей, что снизит полезную емкость ковша и повысит его массу. Увеличение габаритов ковша приведет к дополнительным расходам на металлоконструкции и огнеупоры, будет служить дополнительной нагрузкой, из-за чего может потребоваться проведение дорогостоящего технического перево-

оружения по замене электромостовых кранов в разливочном пролете плавильных цехов.

Применение наливных футеровок разливочных ковшей лишено вышеуказанных недостатков, однако, повышается стоимость огнеупорных материалов, а также трудоемкость выполнения футеровки и ее термической обработки (сушки и разогрева).

Альтернативным вариантом для увеличения срока службы огнеупорной кладки ковшей могут служить защитные обмазки. Огнеупорные защитные обмазки представляют собой порошки из различных огнеупорных материалов определенной зернистости в смеси с разными добавками, обеспечивающими связывание компонентов обмазки с защищаемым материалом. Защитные покрытия на рабочую поверхность огнеупорной футеровки можно наносить вручную или, что предпочтительнее, методом торкретирования (рис. 1). Торкретирование является наиболее эффективным способом повышения стойкости футеровки. Для этого способа применяют как алюмосиликатные, так и кремнеземистые материалы [4].

В работе [5] проведены лабораторные эксперименты по подбору защитных огнеупорных обмазок футеровок и их опытно-промышленные испытания на ферросплавном производстве. Установлено, что стойкость футеровки с обмазкой на основе молотого боя шамота (рис. 2) в 1,5 раза увеличивает количество наливов по сравнению с обычной футеровкой. Обмазка из молотых кварцита и шлака повышает срок службы футеровки в среднем на 10 – 20 %.

Просушивание после ремонта (изготовления) футеровки разливочных ковшей возможно в специальной сушильной камере, в которой теплоген-



Рис. 1. Торкретирование разливочных ковшей [5]  
Fig. 1. Shotcrete filling buckets [5]

нерация реализуется посредством сжигания дизельного топлива. Такой вариант сушки разливочного ковша имеет низкую тепловую эффективность, поскольку порядка 80 % тепла теряется с уходящими продуктами сгорания, а влага не полностью удаляется из огнеупоров. Зачастую после ремонта выходят разливочные ковши со следами влаги в районе сливного носка и в верхней части огнеупорной футеровки (рис. 3).

При использовании сушильной камеры разогрев просушенной футеровки ковша осуществляют методом порционной заливки в ковш жидкого расплава из другого ковша. В этом случае разогрев разливочного ковша считается завершённым при достижении температуры кожуха ковша не менее 100 °С.

При выпуске металла из ферросплавной печи происходят значительные потери тепла, связанные с его аккумуляцией холодной футеровкой

разливочного ковша [6; 7]. Оценку состояния футеровки, как правило, выполняют с помощью тепловизионных исследований [8 – 11]. Резкий перепад температур при выпуске жидкого металла приводит к разрушению футеровки из-за возникающих значительных температурных напряжений, что в результате снижает срок службы футеровки разливочных ковшей [12 – 14].

При выпуске расплава металла в непросушенный ковш возникает риск интенсивного (взрывообразного) парообразования (вследствие «запирания» влаги между стальным кожухом и футеровкой), сопровождающегося выбросами металла [15]. Это явление обусловило требование промышленной безопасности, согласно которому слив расплава в ковши, вышедшие из ремонта, разрешается проводить только после тщательного их просушивания и разогрева [16].

Для проведения термической подготовки огнеупорной футеровки разливочного ковша перед приемом расплава металла требуется разогрев футеровок разливочных ковшей, который является важной технологической операцией [17].



Рис. 2. Нанесенная защитная обмазка на основе молотого боя шамота [5]

Fig. 2. Applied protective coating based on ground chamotte [5]



Рис. 3. Недостаточно просушенный разливочный ковш  
Fig. 3. Insufficiently dried filling ladle

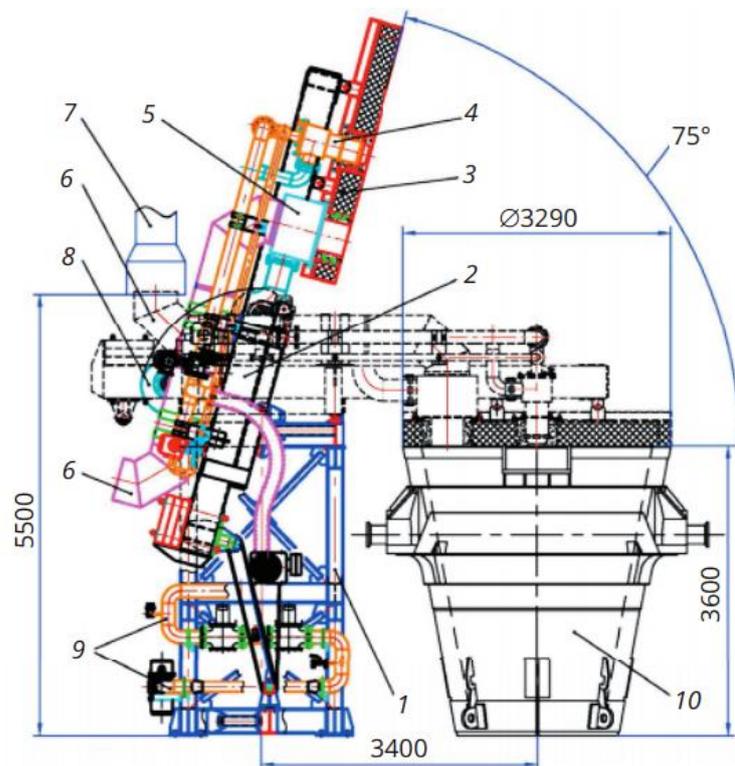


Рис. 4. Газовый стенд сушки футеровки разливочных ковшей емкостью 70 т [21]:

1 – опорная рама; 2 – стрела подъемная; 3 – крышка футерованная; 4 – горелка; 5 – эжектор воздушный;  
6 – патрубок дымоудаления; 7 – зонд цехового тракта дымоудаления; 8 – вентилятор дутьевой;  
9 – газопровод ферросплавного газа; 10 – ковш

Fig. 4. Gas drying stand for lining of filling buckets with a capacity of 70 tons [21]:

1 – support frame; 2 – lifting boom; 3 – lined lid; 4 – burner; 5 – air ejector; 6 – smoke exhaust pipe;  
7 – probe of the workshop smoke removal path; 8 – blow fan; 9 – ferroalloy gas pipeline; 10 – ladle

Для сушки и разогрева применяют установки, в составе которых используется как газовое, так и электрическое оборудование. Выбор между ними зависит от ряда факторов (эффективность, затраты на эксплуатацию, доступное оборудование и технологии).

Газовые стенды обычно имеют более высокую тепловую мощность и могут нагревать ковш быстрее. Они являются одним из самых экономичных вариантов при больших объемах работы, однако требуют установки дополнительных систем вентиляции и повышенных требований безопасности при работе с газом. В большинстве случаев газовые стенды показывают более высокую тепловую эффективность для большегрузных ковшей (сталеразливочных) благодаря высокой мощности и более быстрому разогреву [18 – 20]. Разогрев футеровки на газовых стендах осуществляют раскаленными продуктами сгорания газообразного топлива (обычно природного газа).

В ферросплавном производстве, не используя природный газ, в качестве газообразного топлива для горелки стенда сушки футеровки разливочных ковшей возможно использование ферросплавного газа (рис. 4) [21; 22], который

образуется при получении ферросплавов на печах закрытого типа.

Закрытые ферросплавные печи имеют следующие недостатки:

- негерметичность конструкции (часть неочищенного колошникового газа из-за особенностей конструкции печи попадает в атмосферу без очистки);

- «мокрая» газоочистка требует регулярного обслуживания и очистки, что приводит к дополнительному простоям печи;

- в пространстве под сводом и в газоходах находится ферросплавный газ, содержащий оксид углерода CO, который взрывоопасен и токсичен;

- улавливаемый «мокрой» системой очистки газов оксид кремния SiO<sub>2</sub> не может использоваться для получения микрокремнезема, который является товарным продуктом.

В настоящее время эксплуатируемые закрытые ферросплавные печи реконструируют в ферросплавные печи открытого типа с низким зонтом, которые обладают всеми преимуществами ферросплавных печей закрытого типа, но оборудуются «сухой» системой очистки газов, не предусматривающей образование ферросплавного газа.

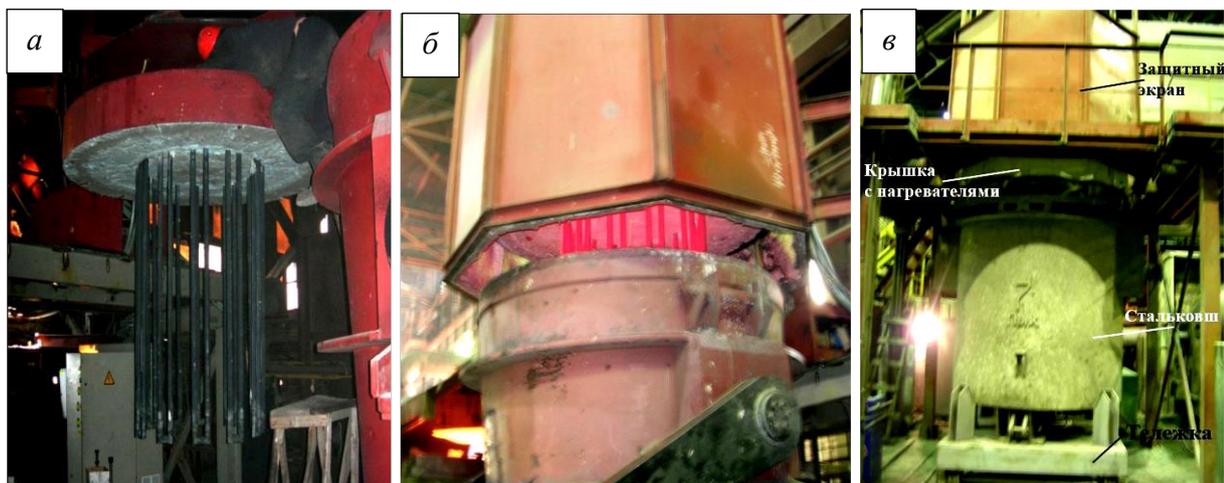


Рис. 5. Конструкция электростендов для сушки и разогрева футеровок разливочных ковшей [23 – 28]:

*a – в* – общий вид электронагревателей, защитного экрана, стенда с ковшом

Fig. 5. The design of electric stands for drying and heating the linings of pouring ladles [23 – 28]:

*a – в* – general view of electric heaters, protective screen, stand with bucket

Для решения вышеуказанной проблемы возможно применение электрических стендов, которые более экологически чистые из-за отсутствия выбросов, легки в управлении температурным режимом разогрева, компактны и просты в обслуживании.

Электрические стенды сушки и разогрева разливочных ковшей применяют реже, чем газовые. Способ сушки и подогрева футеровки ковшей, осуществляемый электрическими нагревателями, реализуется на стенде нагрева, представляющего из себя несущую конструкцию, на которой закреплена футерованная крышка с вмонтированными от 10 до 20 карбидокремневыми нагревателями.

Передача тепла от нагревателей к футеровке осуществляется преимущественно излучением, что повышает КПД процесса нагрева по сравнению с газовым подогревом, позволяя нагревать футеровку до 1400 °С. Недостатком рассматриваемого способа является невозможность управления окислительно-восстановительным потенциалом атмосферы в ковше во время сушки и подогрева футеровки. Известно, что во время сушки углеродсодержащих футеровок сталеразливочных ковшей происходит коксование органических связующих, входящих в состав огнеупоров. Процесс коксования связан с выделением большого количества газообразных органических соединений. Это приводит к осаждению углерода в виде сажи на нагревателях и электропроводке, что, в свою очередь, вызывает изменение электропроводности нагревателей, локальные перегревы, и в конечном итоге оплавление и поломку нагревателей. Кроме того, при нагреве углеродсодержащей футеровки выше 500 – 600 °С в окислительной атмосфере происходит выгорание углерода из поверхностных слоев огнеупоров, что приводит к их разрыхлению и резкому снижению износоустойчи-

вости [23 – 28]. Для ковшей ферросплавного производства контроль окислительного потенциала атмосферы имеет менее важное значение, поскольку для выполнения рабочего слоя футеровки в основном применяют оксидные огнеупоры, в частности шамотные [1; 5]. В России рассматриваемые стенды применяют на заводе «Электросталь» (рис. 5).

Для осуществления процесса нагрева разливочный ковш электромостовым краном устанавливают на выкатную телегу. Механизм горизонтального перемещения подает ковш под центр крышки и фиксирует его в этом положении. Крышка с нагревателями опускается до стыковки с ковшем. В таком положении нагреватели находятся во внутренней полости ковша. Сушка и разогрев футеровки ковша проходят в автоматическом режиме. По окончании нагрева футеровки выполняется обратный порядок действий [27]. Дополнительно электрический стенд может быть оборудован вентилятором циркуляции горячего воздуха внутри ковша или подключен к магистрали сжатого воздуха [29].

Одним из прогрессивных направлений является применение для высокотемпературного разогрева сталеразливочных ковшей стендов, в которых в качестве источника тепловой энергии используют низкотемпературную плазму (рис. 6). Такие стенды лишены недостатков, присущих электростендам [30; 31]:

- максимальная температура нагрева до 2500 °С;
- высокая скорость нагрева футеровки;
- сокращение потребления электроэнергии;
- увеличение ресурса рабочих электродов.

#### Выводы

Выбор конструкции стенда зависит от конкретных условий производства, технологичес-



Рис. 6. Плазменная система для сушки и разогрева ковшей ЭПОС-НП-2 [24]

Fig. 6. Plasma system for drying and heating buckets EPOS-NP-2 [24]

кой целесообразности, экономической эффективности, доступности энергетических ресурсов, конструкции футеровки и видов применяемых огнеупоров, требований безопасности и экологических норм.

Нанесение защитных покрытий на огнеупорную футеровку и использование конструкции электрического или плазменного стенов для сушки и разогрева разливочных ковшей являются прогрессивными решениями, позволяющими снизить затраты производства, обеспечить оптимальную механизацию и автоматизацию технологического процесса при соблюдении установленных требований промышленной безопасности с минимальным воздействием на окружающую среду.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров А.С., Кинжибекова А.К., Приходько Е.В., Арипова Н.М., Карманов А.Е. Анализ работы футеровок разливочных ковшей. *Вестник Торайгыров университета*. 2022;3:142–153. <https://doi.org/10.48081/RPOK3424>
2. Scheunis L., Fallah-Mehrjardi A., Campforts M., Jones P.T., Blanpain B., Malfliet A., Jak E. The effect of a temperature gradient on the phase formation inside a magnesia–chromite refractory in contact with a non-ferrous PbO–SiO<sub>2</sub>–MgO slag. *Journal of the european ceramic society*. 2015;35(10):2933–2942.
3. Yuxiang Dai, Jing Li, Wei Yan, Chengbin Shi. Corrosion mechanism and protection of BOF refractory for high silicon hot metal steelmaking process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(3):4292–4308. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.055>

4. Кашеев И.Д. *Свойства и применение огнеупоров*. Москва: Теплотехник, 2004:352.
5. Улмаганбетов Н.А., Алмагамбетов М.С., Заякин О.В., Досекенов М.С. Оптимизация стойкости футеровки разливочных ковшей ферросплавного производства. *Наука и техника Казахстана*. 2023;(3):152–161. <https://doi.org/10.48081/RXHH7263>
6. Volkova O., Janke D. Modelling of Temperature Distribution in Refractory Ladle Lining for Steelmaking. *ISIJ International*. 200;43(8): 1185–1190.
7. Gupta N, Chandra S. Temperature Prediction Model for Controlling Casting Superheat Temperature. *ISIJ International*. 2004;44(9):1517–1526.
8. Guen L.Le, Huchet F. Thermal imaging as a tool for process modelling: application to a flight rotary kiln. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2020;17(2):79–95. <https://doi.org/10.1080/17686733.2019.1611222>
9. Lee Rippon, Barry Hirtz, Carl Sheehan, Travis Reinheimer, Philip Loewen, Bhushan Gopalun. Visualization of multiscale ring formation in a rotary kiln. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2021;36(4):549–558. <https://doi.org/10.1515/npprj-2021-0048>
10. Lin C., Yi Z., Jiang Z. An alumina rotary kiln monitoring system based on flame image processing. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2019;41(10):2764–2771. <https://doi.org/10.1177/0142331218810085>
11. Michael Hampel. *Beitrag zur Eigenschaftsbewertung von feuerfesten Magnesiakohlenstoffzeugnissen*: Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg. Freiberg, 2010:226.
12. Andreev K., Luchini B., Rodrigues M.J., Alves J.L. Role of fatigue in damage development of refractories under thermal shock loads of different intensity. *Ceram. INT*. 2020;(46):20707–20716. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2020.04.235>
13. Prikhod'ko E.V. Analysis of methods for heating the lining of high-temperature units. *Refractories and industrial ceramics*. 2021;62(4):463–466. <https://doi.org/10.1007/S11148-021-00625-1>
14. Запольский А.С. Выявление утечек воды в системе охлаждения открытых ферросплавных печей. В кн.: *Инновационный конвент "Кузбасс: образование, наука, инновации"*. Материалы XII Инновационного конвента. Кемерово: изд. КемГУ, 2024:599–601.
15. *Правила безопасности процессов получения или применения металлов (утв. приказом Ростехнадзора от 09.12.2020 г. № 512)*. Официальный интернет-портал правовой

- информации. URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения 24.11.2024 г.).
16. Fomenko S.M., Akishev A., Tolendiuly S. Thermal flows influence on the change of temperature stresses in surface and inner layers of refractories. *Materials Today: Proceedings*. 2020;33(4):1853–1858. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.198>
  17. Запольская Е.М., Темлянец М.В., Григорьев А.В. Исследование влияния температурных режимов на параметры тепловой работы стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2019;2(28):7–10.
  18. Запольская Е.М., Темлянец М.В., Костюченко К.Е. Оценка влияния емкости сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стенов разогрева. В кн.: *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество. Труды XVII Всероссийской научно-практической конференции*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2013:18–23.
  19. Запольская Е.М., Темлянец М.В., Костюченко К.Е. Влияние геометрических размеров и емкости сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стенов высокотемпературного разогрева. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2013;2(4):28–32.
  20. Запольская Е.М., Феоктистов А.В., Темлянец М.В. Оценка тепловой эффективности стенов высокотемпературного разогрева сталеразливочных ковшей различной емкости. В кн.: *Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения). Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса*. 2017:162 – 165.
  21. Рязанов В.Т., Шульгин С.С., Набоких А.А., Шестаков С.Б. Опыт внедрения стенов сушки разливочных ковшей, отапливаемых ферросплавным газом. *Сталь*. 2020;5:24–25
  22. Запольский А.С., Темлянец М.В. Стратегия энергосбережения ферросплавного производства. В кн.: *Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2024:63–70.
  23. Темлянец М.В., Матвеев М.В., Темлянцева Е.Н. Исследование влияния различных факторов на обезуглероживание периклазоуглеродистых ковшовых огнеупоров. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2011.10:32–36.
  24. Бершицкий И.М., Тарарышкин А.В. Энергосберегающие и экологически безопасные установки для электрической сушки и подогрева футеровки ковшей. *Сталь*. 2010;2:24–25.
  25. Бершицкий И.М., Сивак Б.А., Кац Я.Л. Разработка и внедрение высокоэффективных электрических установок сушки и нагрева футеровок разливочных ковшей для черной и цветной металлургии. *Тяжелое машиностроение*. 2018;5:14–18.
  26. Краснянский М.В., Кац Я.Л., Бершицкий И.М. Эффективность электронагрева футеровки сталеразливочных ковшей. *Металлург*. 2012;5:48–53.
  27. Краснянский М.В. Исследование и совершенствование энергетического режима внепечной обработки стали в ковшах малой вместимости: автореф. дис. канд. техн. наук – 05.16.02 Металлургия черных, цветных и редких металлов. – Москва, 2014:21.
  28. Бершицкий И.М., Сивак Б.А., Кац Я.Л. Разработка и внедрение высокоэффективных электрических установок сушки и нагрева футеровок разливочных ковшей для черной и цветной металлургии. *Тяжелое машиностроение*. 2018;5:14–18.
  29. Пат. № 1260113 SU. Устройство для сушки футеровки сталеразливочных ковшей / П.П. Луцик, А.Т. Есаулов, Б.П. Дроменко, С.И. Лавренко, В.М. Кирсанов, Ю.Б. Кушнир; заявл. 05.05.86; опубл. 30.09.86. Бюл. № 36.
  30. Пат. № 2663447 RU. Способ сушки и нагрева футеровки сталеразливочного ковша / М.Г. Кузьмин, Я.Л. Кац, А.В. Речкалов, А.С. Аньшаков; опубл.06.08.2018. Бюл. № 22.
  31. Стенд для сушки и подогрева литейных ковшей. URL: <https://epos-nsk.ru/plazmennyye-tehnologii/plazmennyy-podogrev-i-sushka-kovshey/> (дата обращения: 07.06.2024).

## REFERENCES

1. Nikiforov A.S., Kinzhbekova A.K., Prikhod'ko E.V., Aripova N.M., Karmanov A.E. Analysis of the lining of filling buckets. *Vestnik Toraigyrov universiteta*. 2022;3:142–153. (In Russ.). <https://doi.org/10.48081/RPOK3424>
2. Scheunis L., Fallah-Mehrjardi A., Campforts M., Jones P.T., Blanpain B., Malfliet A., Jak E. The effect of a temperature gradient on the phase formation inside a magnesia–chromite refractory in contact with a non-ferrous PbO–SiO<sub>2</sub>–MgO slag. *Journal of the european ceramic society*. 2015;35(10):2933–2942.
3. Yuxiang Dai, Jing Li, Wei Yan, Chengbin Shi. Corrosion mechanism and protection of BOF refractory for high silicon hot metal steelmak-

- ing process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(3):4292–4308.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.055>
4. Kashcheev I.D. *Properties and application of refractories*. Moscow: Teplotekhnika, 2004:352. (In Russ.)
  5. Ulmaganbetov N.A., Almagambetov M.S., Zayakin O.V., Dosekenov M.S. Optimization of lining durability of ferroalloy ladles. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2023;(3):152–161. (In Russ.) <https://doi.org/10.48081/RXHH7263>
  6. Volkova O., Janke D. Modelling of Temperature Distribution in Refractory Ladle Lining for Steelmaking. *ISIJ International*. 2004;43(8):1185–1190.
  7. Gupta N, Chandra S. Temperature Prediction Model for Controlling Casting Superheat Temperature. *ISIJ International*. 2004;44(9):1517–1526.
  8. Guen L.Le, Huchet F. Thermal imaging as a tool for process modelling: application to a flight rotary kiln. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*. 2020;17(2):79–95.  
<https://doi.org/10.1080/17686733.2019.1611222>
  9. Lee Rippon, Barry Hirtz, Carl Sheehan, Travis Reinheimer, Philip Loewen, Bhushan Gopalun. Visualization of multiscale ring formation in a rotary kiln. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2021;36(4):549–558.  
<https://doi.org/10.1515/npprj-2021-0048>
  10. Lin C., Yi Z., Jiang Z. An alumina rotary kiln monitoring system based on flame image processing. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2019;41(10):2764–2771.  
<https://doi.org/10.1177/0142331218810085>
  11. Michael Hampel. *Beitrag zur Eigenschaftsbewertung von feuerfesten Magnesiakohlenstoffzeugnissen*: Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg. Freiberg, 2010:226.
  12. Andreev K., Luchini B., Rodrigues M.J., Alves J.L. Role of fatigue in damage development of refractories under thermal shock loads of different intensity. *Ceram. INT*. 2020;(46):20707–20716.  
<https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2020.04.235>
  13. Prikhod'ko E.V. Analysis of methods for heating the lining of high-temperature units. *Refractories and industrial ceramics*. 2021;62(4):463–466.  
<https://doi.org/10.1007/S11148-021-00625-1>
  14. Zapol'skii A.S. Detection of water leaks in the cooling system of open ferroalloy furnaces. In: *The Innovation Convention "Kuzbass: education, science, innovation"*. Materials of the XII Innovation Convention. Kemerovo: izd. KEMGU, 2024:599–601. (In Russ.)
  15. *Safety rules for the processes of obtaining or using metals (approved by Rostekhnadzor Order No. 512 dated 09.12.2020)*. The official Internet portal of legal information. URL: <http://pravo.gov.ru> (дата обращения 24.11.2024 г.). (In Russ.)
  16. Fomenko S.M., Akishev A., Tolendiuly S. Thermal flows influence on the change of temperature stresses in surface and inner layers of refractories. *Materials Today: Proceedings*. 2020;33(4):1853–1858.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.198>
  17. Zapol'skaya E.M., Temlyantsev M.V., Grigor'ev A.V. Investigation of the influence of temperature regimes on the parameters of thermal operation of heating stands for lining steel ladles. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2019;2(28):7–10. (In Russ.)
  18. Zapol'skaya E.M., Temlyantsev M.V., Kostyuchenko K.E. Assessment of the effect of the capacity of steel filling buckets on the thermal efficiency of heating stands. In: *Metallurgy: technology, management, innovation, quality. Proceedings of the XVII All-Russian Scientific and Practical Conference*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2013:18–23. (In Russ.)
  19. Zapol'skaya E.M., Temlyantsev M.V., Kostyuchenko K.E. The influence of the geometric dimensions and capacity of steel ladles on the thermal efficiency of high-temperature heating stands. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2013;2(4):28–32. (In Russ.)
  20. Zapol'skaya E.M., Feoktistov A.V., Temlyantsev M.V. Evaluation of the thermal efficiency of stands for high-temperature heating of steel ladles of various capacities. In: *The state and prospects of development of electrical and thermal technology (XIX Benardos readings)*. Materials of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 175th anniversary of the birth of N.N. Benardos. 2017:162 – 165. (In Russ.)
  21. Ryazanov V.T., Shul'gin S.S., Nabokikh A.A., Shestakov S.B. Experience in the implementation of drying stands for ladles heated with ferroalloy gas. *Stal'*. 2020;5:24–25. (In Russ.)
  22. Zapol'skii A.S., Temlyantsev M.V. The strategy of energy saving of ferroalloy production. In: *Science and Youth: problems, searches, solutions. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference of Students, postgraduates and Young Scientists*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2024:63–70. (In Russ.)
  23. Temlyantsev M.V., Matveev M.V., Temlyantseva E.N. Investigation of the influence of various factors on decarbonization of periclase-carbon bucket refractories. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2011;10:32–36. (In Russ.)

24. Bershitskii I.M., Tararyshkin A.V. Energy-saving and environmentally safe installations for electric drying and heating of bucket linings. *Stal'*. 2010;2:24–25. (In Russ.).
25. Bershitskii I.M., Sivak B.A., Kats Ya.L. Development and implementation of highly efficient electric installations for drying and heating lining ladles for ferrous and non-ferrous metallurgy. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2018;5:14–18. (In Russ.).
26. Krasnyanskii M.V., Kats Ya.L., Bershitskii I.M. Efficiency of electric heating of lining of steel ladles. *Metallurg*. 2012;5:48–53. (In Russ.).
27. Krasnyanskii M.V. *Research and improvement of the energy regime of non-furnace steel processing in small-capacity buckets*: autoref. dis. Candidate of Technical Sciences – 05.16.02 Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals. Moscow, 2014:21. (In Russ.).
28. Bershitskii I.M., Sivak B.A., Kats Ya.L. Development and implementation of highly efficient electric installations for drying and heating linings of ladles for ferrous and non-ferrous metallurgy. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2018;5:14–18. (In Russ.).
29. Lutsik P.P., Esaulov A.T., Dromenko B.P., Lavrenko S.I., Kirsanov V.M., Kushnir Yu.B. A device for drying the lining of steel ladles. Pat. 1260113 SU. *Byulleten' izobretenii*. 1986;36. (In Russ.).
30. Kuz'min M.G., Kats Ya.L., Rechkalov A.V., An'shakov A.S. The method of drying and heating the lining of a steel ladle. Pat. 2663447 RU. *Byulleten' izobretenii*. 2018;22. (In Russ.).
31. *A stand for drying and heating casting buckets*. URL: <https://epos-nsk.ru/plazmennye-tehnologii/plazmennyy-podogrev-i-sushkakovshey/> (accessed: 07.06.2024).

#### **Сведения об авторах**

**Андрей Сергеевич Запольский**, заместитель начальника службы ОТиПБ, АО «Кузнецкие ферросплавы», магистрант кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

**Email:** zapolskiyas@mail.ru

**SPIN-код:** 9509-6687

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

**E-mail:** uchebn\_otdel@sibsiu.ru

**ORCID:** 0000-0001-7985-5666

**SPIN-код:** 6169-5458

#### **Information about the authors**

**Andrei S. Zapol'skii**, Deputy Head of the OTiPB Service, Kuznetsk Ferroalloys JSC, Undergraduate student of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

**Email:** zapolskiyas@mail.ru

**SPIN-код:** 9509-6687

**Mikhail V. Temlyantsev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for the implementation of the strategic project, Siberian State Industrial University

**E-mail:** uchebn\_otdel@sibsiu.ru

**ORCID:** 0000-0001-7985-5666

**SPIN-код:** 6169-5458

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 20.06.2024

После доработки 08.07.2024

Принята к публикации 16.07.2024

Received 20.06.2024

Revised 08.07.2024

Accepted 16.07.2024

**Оригинальная статья**

УДК 669.017

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-92-99

**ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МИНИ-ЗАВОДОВ**

© 2024 г. И. В. Строкина, В. С. Маринич, А. Д. Трофимова

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

**Аннотация.** В настоящее время развитие черной металлургии идет по пути строительства мини-заводов, работающих на основе электросталеплавильного производства с использованием лома в качестве основного сырья. Рассматриваемый формат радикально отличается от классической схемы интегрированных заводов. Новая схема дает специалистам относительную свободу действий, позволяет эффективно конкурировать с гигантами, выходя на тот же или более низкий уровень себестоимости продукции. Представлен обзор существующих мини-заводов в Российской Федерации. Рассмотрены промышленный опыт и достигнутые показатели работы Оскольского электрометаллургического комбината, который является первым предприятием бездоменной металлургии, работающим с использованием предварительно металлизированного сырья. Приведены экономические предпосылки строительства электросталеплавильных мини-заводов в России, основанные на сопоставлении характеристик интегрированных металлургических заводов и мини-заводов, работающих с использованием металлолома. Кратко охарактеризован процесс получения железа прямого восстановления «Мидрекс», на долю которого приходится около половины мощностей по производству металлизированных окатышей и брикетов, отмечены его основные достоинства. Процесс получения металлизированного сырья для электросталеплавильного производства осуществляется с использованием конвертируемого природного газа, проанализирована динамика цен в сравнении с ценами на электроэнергию. Предлагается оптимальная схема отечественного электросталеплавильного производства с предварительным восстановленным обжигом окатышей из железорудных концентратов и буроугольного полукокса. Описан вариант переплава богатых железных руд при производстве чугуна и высокоуглеродистых сталей, которые находят широкое применение в горнодобывающей, химической и металлургической промышленности.

**Ключевые слова:** металлургия, мини-заводы, твердофазное восстановление железа, сталь, чугун, металлургический комплекс

**Для цитирования:** Строкина И.В., Маринич В.С., Трофимова А.Д. Оценка перспектив развития металлургических мини-заводов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;(4(50)):92–99. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-92-99](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-92-99)

**Original article**

**ASSESSMENT OF THE PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF METALLURGICAL MINI-FACTORIES**

© 2024 I. V. Strokina, V. S. Marinich, A.D. Trofimova

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

**Abstract.** Currently, the development of ferrous metallurgy is moving towards the construction of mini-factories operating on the basis of electric steelmaking with the use of scrap as the main raw material. The format under consideration differs radically from the classical scheme of integrated plants. The new scheme gives specialists a relative freedom of action, allows them to effectively compete with giants, reaching the same or lower level of production costs. An overview of existing mini-factories in the Russian Federation is presented. The industrial

experience and the achieved performance indicators of the Oskol Electro-Metallurgical Combine, which is the first enterprise of non-mining metallurgy operating using pre-metallized raw materials, are reviewed. The economic prerequisites for the construction of mini-electric steelmaking plants in Russia are presented, based on a comparison of the characteristics of integrated metallurgical plants and mini-plants operating on scrap metal. The process of obtaining direct reduction iron by Midrex, which accounts for about half of the production capacity of metallized pellets and briquettes, is briefly described, and its main advantages are noted. The process of obtaining metallized raw materials for electric steelmaking is carried out using convertible natural gas, the dynamics of prices in comparison with electricity prices is analyzed. An optimal scheme of domestic electric steelmaking production is proposed using metallized iron ore concentrate, steel scrap and liquid cast iron as raw materials. A variant of remelting rich iron ores in the production of cast iron and high-carbon steels, which are widely used in the mining, chemical and metallurgical industries, is described.

**Keywords:** metallurgy, mini-plants, solid-phase reduction of iron, steel, cast iron, metallurgical complex

**For citation:** Strokina I.V., Marinich V.S., Trofimova A.D. Assessment of the prospects for the development of metallurgical mini-factories. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;(4(50)):92–99. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-92-99](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-92-99)

### Введение

В настоящее время наблюдается тенденция перехода на технологии электросталеплавильного производства в условиях мини-заводов [1].

Мини-заводы – компактные комплексы, выпускающие продукцию массового сортамента из стального лома, использующие электродуговые сталеплавильные печи высокой производительности, высокоскоростную непрерывную разливку стали и прокатку [2]. Для понимания концепции развития и создания отечественных металлургических мини-заводов необходимо изучить предпосылки их появления и эволюцию в других странах [3].

### Развитие металлургических мини-заводов

Сравнительно небольшие размеры мини-заводов дают преимущества перед предприятиями полного цикла, среди которых экономия капиталовложений и удельных затрат [4], увеличение производительности труда, уменьшение количества вредных выбросов, быстрая реакция на меняющийся спрос на различные виды продукции и возможность выполнения мелких заказов применительно к конкретному заказчику. Энергоемкость производства стального проката на мини-заводе почти в 4 раза ниже [5], а производительность труда в 3 – 5 раз выше, чем на интегрированных предприятиях [6]. Считается, что российские сталеплавильные заводы, построенные в эпоху советского гигантизма, крайне неэффективны в силу низкой производительности на одного работающего (в среднем 500 кг/человека в год), при этом самые неэффективные из мини-заводов имеют примерно 2000 – 5000 кг/человека и выше.

В настоящее время в мире действуют более тысячи мини-заводов с объемами выпуска от 40 тыс. до 2,5 млн т /год. На их долю приходится около 20 % мирового производства электро-

стали. В ближайшие годы ожидается увеличение количества мини-заводов, что не противоречит общим тенденциям прироста объемов производства электростали в мире. Примерами таких предприятий, находящиеся на территории Российской Федерации, являются Абинский электрометаллургический завод ООО «АЭМЗ» (производительность до 1,2 млн т/год); Тюменский металлургический завод «Электросталь Тюмени» (производительность 550 тыс. т/год); Нижнесергинский метизно-металлургический завод в г. Ревда Свердловской обл. (производительность 2 млн т/год); металлургический завод ОАО «Амурсталь» в г. Комсомольск-на-Амуре (производительность до 2,2 млн т/год); Ашинский металлургический завод (производительность до 1,3 млн т/год) [7].

Предполагается, что в 2024 г. в России сохранится достигнутый в 2023 г. рекордный уровень выплавки стали (75,6 млн т /год) (рис. 1). Россия остается в пятерке крупнейших мировых производителей стали [9] (первое место с гигантским отрывом занимает Китай, за ним следуют Индия, Япония и США). Соединенные Штаты увеличили производство стали в 2023 г. до 80,7 млн т (в 2022 г. – 80,5 млн т) [10].

Сейчас реализуются проекты по строительству электрометаллургических заводов в Нижегородской и Ростовской обл., в перспективе ожидается строительство мини-заводов в Свердловской, Воронежской, Новосибирской и Ленинградской обл. Для окупаемости таких проектов необходимо учитывать следующие факторы: наличие лома в достаточном количестве и потребителей производимого сортамента. При производстве стали не только из лома, но и из предварительно металлизированного железорудного концентрата, необходимо иметь до ступ к месторождению

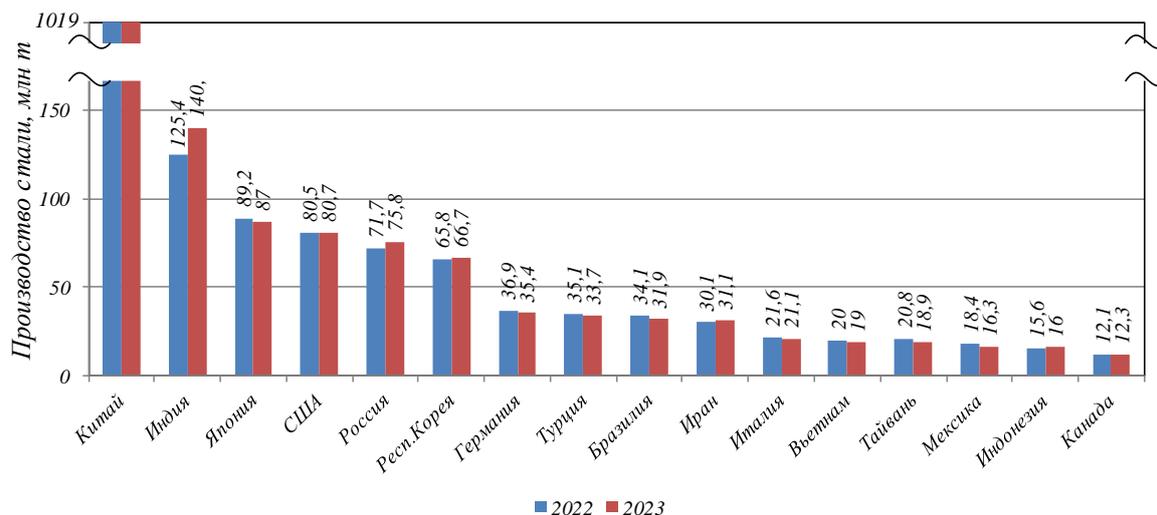


Рис. 1. Производство стали в 2022 – 2023 гг.  
Fig. 1. Steel production in 2022 – 2023

железной руды и энергетическим ресурсам по приемлемой цене.

Энергосбережение на любом предприятии является актуальной проблемой, связанной с ростом стоимости энергоносителей [11].

На современном рынке металлопродукции существует тенденция к улучшению качества и производству металлопродукции со специальными свойствами. Это объясняется ориентированием предприятий на потребности рынка [12], а также дефицитом качественного лома, так как с увеличением оборота лома в производстве содержание загрязняющих его элементов тоже увеличивается, что сильно влияет на качество готовой стали [13]. Поэтому все чаще лом или его часть заменяют железом прямого восстановления (DRI, губчатое или горячбрикетированное железо), производство которого постоянно растет, но находится еще на относительно низком уровне по сравнению с чугуном. Высокие цены на металлолом, обусловленные большим объемом мирового производства стали (1,88 млрд т в 2023 г.), способствуют развитию цехов прямого восстановления. Традиционными производителями DRI по технологии, базирующейся на использовании газа-восстановителя, являются Венесуэла, Иран и Мексика, в Индии примерно 50 % железа прямого восстановления производится по технологии с использованием углетермических процессов в маломощных вращающихся обжиговых печах. Основными достоинствами технологии прямого восстановления железа являются устранение агломерационных и коксохимических производств; возможность получения чистого железа без нежелательных добавок (сера, фосфор); резкое сокращение выбросов оксида CO<sub>2</sub> (так как восстановителем является водород); использование разных видов

железородного сырья (руды, концентраты, пыли, шламы, окалины, стальная стружка) без предварительной обработки; сокращение материала и энергоемкости.

Примером металлургического комплекса, включающего установку прямого восстановления железа, может служить мини-завод, запущенный в производство в 2008 г. в г. Абу-Даби (ОАЭ). Он задуман и создан для использования специфических местных конкурентоспособных энергетических и сырьевых ресурсов. Сталеплавильный цех (производительность 1,4 млн т/год) максимально использует горячее железо прямого восстановления. Оно подается по системе пневматического транспорта непосредственно с установки, где его производят. Новая электродуговая печь типа “FastArk” (136 МВ·А) емкостью 150 т работает на переменном токе с непрерывной загрузкой. Рафинирование стали проводится в установке печь-ковш (24 МВ·А). Непрерывная разливка обеспечивается шестьюручьевой МНЛЗ типа “Fast Cast”. Расход электроэнергии на плавку 1 т стали составляет 350 кВт·ч/т [14], тогда как в мощных сталеплавильных печах минимальный расход достигает 410 кВт·ч/т [15].

Первым крупным отечественным предприятием бездоменной металлургии, на котором была предусмотрена принципиально новая технология производства металла, основанная на прямом получении металла из руды, является Осковский электрометаллургический комбинат (ОЭМК) [5]. В 1984 г. на ОЭМК был запущен процесс металлизации шихты в шахтных печах. В основу прямого восстановления железа заложен процесс «Мидрекс», который позволяет осуществить восстановление оксидов железа в шахтных печах с использованием конвертируемого природного газа [16]. Конверсия заключа-

ется в превращении углеводородов путем их разложения на водород и углерод с последующим дожиганием углерода до оксида СО при помощи  $\text{CO}_2$  и водяных паров по следующим реакциям:  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{CO} + 2\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$  [17].

В результате выполненных мероприятий на Оскольском металлургическом предприятии производительность установок металлизации увеличилась на 15 – 20 % [18]. Суточная производительность одной печи составляет в настоящее время 1000 т железа при расходе природного газа до  $550 \text{ м}^3/\text{т}$  [5]. Степень восстановления достигает 95 %, металлизации – более 70 %. В качестве железорудной базы для металлургического комбината используют богатые железные руды Лебединского месторождения. Эти руды содержат 56,9 % железа, 8,0 % кремнезема, 0,19 % серы, 0,09 % фосфора. Получаемый на их основе концентрат содержит более 70 % железа. При плавке на холодной шихте расход электроэнергии на 1 т стали составляет 500 кВт·ч/т.

Оскольский электрометаллургический комбинат – единственное в России металлургическое предприятие полного цикла, на котором реализованы технология прямого восстановления железа и плавка в электропечах, позволяющие с минимальным воздействием на окружающую среду производить сталь высокого качества. Показатель прямой и косвенной эмиссии парниковых газов на ОЭМК самый низкий среди крупных металлургических компаний РФ – 1,2 т  $\text{CO}_2$ -эквивалента на тонну продукции [19].

Необходимо отметить, что установки прямого восстановления железа могут работать эффективно только в регионах с недорогими источниками энергии. Учитывая то, что свыше 90 % металлизированного сырья получают при использовании газообразного топлива (природного газа), становится ясно, что чем выше цена природного газа, тем менее эффективны эти процессы [5].

Анализ (за пять лет) динамики цен в России на энергоносители показал, что за последние два года существует следующая тенденция: повышение цен на электроэнергию оказывается ниже официальной инфляции и составляет в среднем 6 % [20], тогда как цена природного газа ежегодно индексируется на 8,5 % [21]. Учитывая этот факт, можно предположить, что переход предприятий с полным металлургическим циклом на мини-заводы пока не представляется возможным. Однако, этореализуемо при условии, что на каждом из металлургических переделов интегрированных предприятий будут постоянно внедрять инновационные технологии [22] для увеличения производительности и уменьшения себестоимости продукции: получе-

ние высокометаллизированного сырья с использованием твердого восстановителя (буроугольного полукокса), а не природного газа [23]. Комплексное восстановление является достаточно эффективным как по термодинамическим, так и по кинетическим показателям. Полукокк из бурого угля имеет ряд специфических и положительных особенностей как углеродистый восстановитель для прямого восстановления железа (высокая реакционная способность, развитая система микро- и мезопор, значительная удельная поверхность, достаточное для процесса содержание углерода и водорода). Доказано, что при содержании 10 – 15 % водорода в газовой фазе температура начала восстановления снижается примерно на 70 °С, а скорость реакций возрастает в несколько раз [24]. На рис. 2 представлен вариант технологической схемы восстановительного обжига рудоугольных окатышей в герметичной шахтной печи.

Нагрев шихты осуществляется за счет сжигания газов ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ), образующихся в процессе восстановления. Горячий газ, выходящий из реакционной зоны, сжигается в камере 4 при смешивании с воздухом, подогреваемым в камере 7 в зоне охлаждения шихты 6, при этом выделяется достаточное количество тепла для нагрева шихты и осуществления реакций восстановления в шахте 2. Загрузка шихты и выгрузка материала осуществляется в герметичном режиме, что позволяет использовать в качестве восстановителя водород. Необходимую температуру процесса можно регулировать избытком воздуха, подаваемого в зону горения 5. Использование газов, получаемых в процессе восстановления, позволяет исключить расходы на природный газ. Это при электроплавке стали с использованием горячих металлизированных окатышей приведет к уменьшению потребления энергоресурсов на 20 – 30 %. Восстановительный обжиг окатышей, состоящих из железорудного концентрата и буроугольного полукокса, позволяет достигать степени металлизации железа 90 – 92 % при температуре 950 °С и продолжительности процесса около 1 ч [25].

### Выводы

Оптимальным вариантом для российского электросталеплавильного производства является следующая схема: прямое твердофазное восстановление железа из окомкованных рудных концентратов – плавка стали в электропечах с использованием газообразного топлива и кислорода, при непосредственной загрузке горячего металлизированного железа, лома и жидкого чугуна – внепечная обработка жидкой стали в печь-ковше, при этом удельный расход электроэнергии

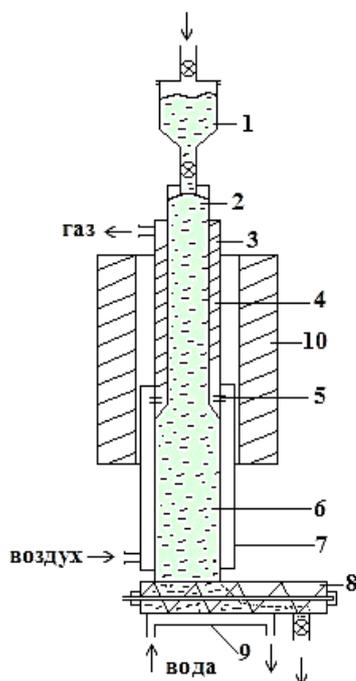


Рис. 2. Схема восстановительного обжига окатышей в герметичной шахтной печи:

- 1 – бункер загрузочный; 2 – шахта реакционная;  
3 – радиатор; 4 – камера сжигания печных газов;  
5 – горелки; 6 – камера охлаждения окатышей; 7 – камера подогрева воздуха; 8 – транспортер – шнек для выгрузки окатышей; 9 – рубашка охлаждения шнека;  
10 – футеровка шахты печи

Fig. 2. Scheme of reduction firing of pellets in a sealed shaft furnace:

- 1 – loading hopper; 2 – reaction shaft; 3 – radiator;  
4 – combustion chamber of furnace gases; 5 – burners;  
6 – pellet cooling chamber; 7 – air heating chamber;  
8 – conveyor – auger for unloading pellets; 9 – screw cooling jacket; 10 – furnace shaft lining

может сократиться на 20 – 25 % (250 – 300 кВт·ч/т). Единичная мощность ДСП может достичь 1,5 – 1,7 млн т/год при работе на такой шихте. Удельная электрическая мощность ДСП увеличивается до 0,9 – 1,0 МВ·А/т. Продолжительность плавки уменьшается до 55 – 60 мин, под током – до 45 мин.

Может оказаться выгодным непосредственный переплав богатых железных руд без обогащения в руднотермических печах с получением чугуна и высокоуглеродистых сталей. При этом часть чугуна может использоваться в электросталеплавильном переделе, а другая часть, как товарная продукция высокого качества. Например, высокоуглеродистые стали, в том числе марганцовистые, используют в больших количествах для изготовления стрелок железнодорожных путей; защитной брони в дробилках, применяемых в горнодобывающей, химической и металлургической промышленности; в устройствах, работающих на ударно-механический износ (гусеничные траки, ножи бульдозеров, экскаваторов и т.д.). В этом случае целесообразно создавать

отдельный цех в составе 1 – 2 руднотермических печей, работающих на угольной или оксидной футеровке.

В условиях повышения цен на природный газ оптимальным вариантом получения металлizedованного сырья является восстановительный обжиг окатышей из железорудного концентрата и буроугольного полукокса. При этом степень металлзации железа может достигнуть 92 % при температуре 950 °С. Для эффективного процесса металлзации предлагается использовать герметичную шахтную печь, обогреваемую теплом от сжигаемых газов, образующихся при восстановлении оксидов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Danieli group. Danieli Innovation meeting. Strategies for managing successfully during “new normal”. *DaNews*. 2018;177. URL: <https://www.danieli.com/en/news/danews.htm#/>. (Дата обращения: 15.06.2024).
2. Danieli group. Danieli undisputed leadership in minimill technology. *DaNews*. 2016;173. URL: <https://www.danieli.com/en/news/danews.htm#/>. (Дата обращения: 17.06.2024).
3. Куберский С.В. Реализация стратегии создания микро- и мини- заводов в условиях металлургического комплекса России. В кн.: *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. Алчевск: изд. ДонГТУ, 2020; 18(61):61–70.
4. Шинкаренко А.В. Концепция металлургических мини-заводов как формат развития экономики регионов и металлургической отрасли промышленности. В кн.: *Трансформация экономики и финансового сектора России: вызовы и тренды. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции*. Москва: Синегерия, 2023:488–491.
5. Минаев А.А. Особенности развития макси- и мини-заводов. *Вестник Донецкого национального технического университета*. 2021;4(26):3–9
6. Рожков Г.К., Левандовский С.А., Саранча С.Ю., Моллер А.Б., Кинзин Д.И., Тулупов О.Н. Разработка современной ресурсосберегающей технологии производства арматурного проката и мелящих шаров. *Моделирование и развитие процессов ОМД*. 2019;3(30): 18–22.
7. Ишметьев М.Е., Назаров Д.А., Левандовский С.А., Моллер А.Б., Тулупов О.Н. Пример мини-завода с использованием в качестве сырья вторичной стали. *Вестник Магнитогорского государственного технического*

- ского университета им. Г.И. Носова. 2022;20(2):53–61.  
<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-53-61>
8. Производство стали в России. URL: <https://refru.ru/steel.html> (дата обращения 25.11.2024).
  9. Modrzyk A. *Ekonomika kryzysu codzienności. Kultura i Społeczeństwo*. 2023;67(4):151–180. <https://doi.org/10.35757/kis.2023.67.4.8>. EDN: EDPSXY.
  10. Sklyar A.V., Marinchenko T.E. Modernization of the energy system of an enterprise. *American Journal of Agriculture and Forestry*. 2019;7(4):133–138. <https://doi.org/10.11648/j.ajaf.20190704.12>. EDN: WBKMEQ
  11. Мингазов С. Выплавка стали в России в 2023 году приблизилась к рекордному уровню 2021 года. *Forbes*. URL: <https://www.forbes.ru/biznes/504988-vyplavka-stali-v-rossii-v-2023-godu-priblizilas-k-rekordnomu-urovnu-2021-goda>. (Дата обращения 19.06.2024).
  12. *Russian economy in 2012. Trends and Outlooks*. GAIDAR INSTITUTE FOR ECONOMIC POLICY. Moscow: Gaidar Institute Publishers. 2013:548.
  13. Смирнов Е.Н., Смирнов А.Н., Скляр В.А. Сквозная оценка качества продукции в условиях интегрированного специализированного металлургического микрозавода. *Сталь*. 2021;(4):31–37.
  14. The 7 Best Steel Manufacturers in UAE 2024: A Comprehensive Guide. *News*. URL: <https://crunchdubai.com/best-steel-manufacturers-uae-2024/> (Дата обращения 18.06.2024).
  15. Коноваленко С.В. Оптимизация технологии выплавки стали в электросталеплавильном цехе. *Сталь*. 2021;(2):27–29.
  16. Sadatshojaei E., Esmaeilzadeh F., Fathikaljahi J. Regeneration of the Midrex Reformer Catalysts Using Supercritical Carbon Dioxide. *Chemical Engineering Journal*. 2018:748–758.
  17. Yadav, S., Srishilan C., Shukla A.K. Thermodynamic Model of MIDREX Ironmaking Process Using FactSage™ and Macro Facility. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2023;54(6):3508–3525.
  18. Мехряков Д.В., Грезнев В.Г., Малей И.В. Комплексная модернизация шахтных печей металлизации по технологии "Мидрекс" на Оскольском электрометаллургическом комбинате В кн.: *Сборник докладов международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию основания кафедры ТИИМ, УрФУ и 85-летию основания ОАО «ВНИИМТ», Екатеринбург: изд. УрФУ. 2015:216–222.*
  19. *ОЭМК отмечает полувековой юбилей*. URL: [https://www.metalloinvest.com/media/press-releases/898858/?utm\\_source=google.com&utm\\_medium=organic&utm\\_campaign=google.com&utm\\_referrer=google.com](https://www.metalloinvest.com/media/press-releases/898858/?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com) (дата обращения 26.11.2024).
  20. Энергоцены отстали от инфляции. *Коммерсантъ*. 2024. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6480365> (Дата обращения 26.08.2024).
  21. Цены на газ в России будут расти ближайšie два года. Как изменятся тарифы для потребителей. ФАС запланировала повышение стоимости газа в России на 8 % в июле 2024 года. *Газета.ru*. 2024. URL: <https://www.gazeta.ru/business/2023/07/07/17247974.shtml?updated> (Дата обращения 26.08.2024).
  22. Бигеев В.А., Столяров А.М., Валиахметов А.Х. *Металлургические технологии в высокопроизводительном электросталеплавильном цехе*. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2020:320 с.
  23. Страхов В.М., Аникин А.Е., Строкина И.В. и др. Получение металлизированных окатышей с использованием бурогоугольного полукокса. *Кокс и химия*. 2015;1:20–25. EDN: TGLUPD.
  24. Строкина И.В., Якушевич Н.Ф., Полях О.А. Интенсификации процесса металлизации железорудного сырья. В кн.: *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество. Труды Всероссийской научно-практической конференции*, Новокузнецк, 09-11 ноября 2011 г. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2011:134–139. EDN: RUYLXJ.
  25. Строкина И.В., Ноздрин И.В., Полях О.А., Якушевич Н.Ф. Оценка перспектив использования новых месторождений Сибирского региона в металлургии. В кн.: *Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов. Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*, 20-21 апреля 2022 года. Иркутск: изд. Иркутского национального исследовательского технического университета, 2022:36–39. EDN: WOPDDG.

#### REFERENCES

1. Danieli group. Danieli Innovation meeting. Strategies for managing successfully during

- “new normal”. *DaNews*. 2018;177. URL: <https://www.danieli.com/en/news/danews.htm#/>. (Accessed: 15.06.2024).
2. Danieli group. Danieli undisputed leadership in minimill technology. *DaNews*. 2016;173. URL: <https://www.danieli.com/en/news/danews.htm#/>. (Accessed: 17.06.2024).
  3. Kuberskii S.V. Implementation of the strategy of creating micro- and mini-plants in the conditions of the metallurgical complex of Russia. In: *Collection of scientific papers of the Donbass State Technical University*. Alchevsk: izd. DonGTU, 2020; 18(61):61–70. (In Russ.).
  4. Shinkarenko A.V. The concept of metallurgical mini-plants as a format for the development of the economy of regions and the metallurgical industry. In: *Transformation of the Russian Economy and Financial Sector: challenges and trends. Collection of materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Moscow: Sinergiya, 2023:488–491. (In Russ.).
  5. Minaev A.A. Features of the development of maxi- and mini-factories. *Vestnik Donetskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021;4(26):3–9. (In Russ.).
  6. Rozhkov G.K., Levandovskii S.A., Sarancha S.Yu., Moller A.B., Kinzin D.I., Tulupov O.N. Development of modern resource-saving technology for the production of rebar rolled products and grinding balls. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD*. 2019;3(30):18–22. (In Russ.).
  7. Ishmetev M.E., Nazarov D.A., Levandovskii S.A., Moller A.B., Tulupov O.N. An example of a mini-plant using secondary steel as a raw material. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2022;20(2):53–61. (In Russ.). <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-53-61>.
  8. *Steel production in Russia*. URL: <https://refru.ru/steel.html> (Accessed 25.11.2024). (In Russ.).
  9. Modrzyk A. *Ekonomika kryzysu codzienności. Kultura i Społeczeństwo*. 2023;67(4):151–180. <https://doi.org/10.35757/kis.2023.67.4.8>. EDN: EDPSXY.
  10. Sklyar A.V., Marinchenko T.E. Modernization of the energy system of an enterprise. *American Journal of Agriculture and Forestry*. 2019;7(4):133–138. <https://doi.org/10.11648/j.ajaf.20190704.12>. EDN: WBKMEQ
  11. Mingazov S. Steel smelting in Russia in 2023 approached the record level of 2021. *Forbes*. URL: <https://www.forbes.ru/biznes/504988-vyplavka-stali-v-rossii-v-2023-godu-priblizilas-k-rekordnomu-urovnu-2021-goda>. (Accessed: 19.06.2024). (In Russ.).
  12. *Russian economy in 2012. Trends and Outlooks. GAIDAR INSTITUTE FOR ECONOMIC POLICY*. Moscow: Gaidar Institute Publishers. 2013:548.
  13. Smirnov E.N., Smirnov A.N., Sklyar V.A. End-to-end product quality assessment in an integrated specialized metallurgical micro-plant. *Stal'*. 2021;(4):31–37. (In Russ.).
  14. The 7 Best Steel Manufacturers in UAE 2024: A Comprehensive Guide. *News*. URL: <https://crunchdubai.com/best-steel-manufacturers-uae-2024/> (Accessed: 18.06.2024).
  15. Konovalenko S.V. Optimization of steel smelting technology in an electric steelmaking shop. *Stal'*. 2021;(2):27–29. (In Russ.).
  16. Sadatshojaei E., Esmaeilzadeh F., Fathikaljahi J. Regeneration of the Midrex Reformer Catalysts Using Supercritical Carbon Dioxide. *Chemical Engineering Journal*. 2018:748–758.
  17. Yadav, S., Srishilan C., Shukla A.K. Thermodynamic Model of MIDREX Ironmaking Process Using FactSage™ and Macro Facility. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2023;54(6):3508–3525.
  18. Mekhryakov D.V., Greznev V.G., Malei I.V. Complex modernization of mine metallization furnaces using the Midrex technology at the Oskola Electrometallurgical Combine. In: *Collection of documents of the international scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of the founding of the Department of TIM, UrFU and the 85th anniversary of the founding of JSC VNIIMT, Yekaterinburg: UrFU*. 2015:216–222. (In Russ.).
  19. *OEMK celebrates its half-century anniversary*. URL: [https://www.metalloinvest.com/media/press-releases/898858/?utm\\_source=google.com&utm\\_medium=organic&utm\\_campaign=google.com&utm\\_referrer=google.com](https://www.metalloinvest.com/media/press-releases/898858/?utm_source=google.com&utm_medium=organic&utm_campaign=google.com&utm_referrer=google.com) (Accessed 26.11.2024). (In Russ.).
  20. Energy prices have lagged behind inflation. *Komersant'*. 2024. URL: <https://www.komersant.ru/doc/6480365> (Accessed: 26.08.2024). (In Russ.).
  21. Gas prices in Russia will rise in the next two years. How tariffs for consumers will change. The Federal Antimonopoly Service has planned to increase the cost of gas in Russia by 8 % in July 2024. *Gazeta.ru*. 2024. URL: <https://www.gazeta.ru/business/2023/07/07/17247974.shtml?updated> (Accessed: 26.08.2024). (In Russ.).

22. Bigeev V.A., Stolyarov A.M., Valiakhmetov A.Kh. *Metallurgical technologies in a high-performance electric steelmaking shop*. Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriya, 2020:320 с. (In Russ.).
23. Strakhov V.M., Anikin A.E., Strokina I.V. etc. Production of metallized pellets using brown coal semi-coke. *Koks i khimiya*. 2015;1:20–25. (In Russ.). EDN: TGLUPD.
24. Strokina I.V., Yakushevich N.F., Polyakh O.A. Intensification of the metallization process of iron ore raw materials. In: *Metallurgy: technology, management, innovation, quality. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*, Novokuznetsk, November 09-11. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2011:134–139. (In Russ.). EDN: RUYLXJ.
25. Strokina I.V., Nozdrin I.V., Polyakh O.A., Yakushevich N.F. Assessment of prospects for the use of new deposits of the Siberian region in metallurgy. In: *Prospects for the development of technology for processing hydrocarbon and mineral resources. Materials of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation*, April 20-21, 2022. Irkutsk: izd. Irkutskogo natsional'nogo issledovatel'skogo tekhnicheskogo universiteta, 2022:36–39. (In Russ.). EDN: WOPDDG.

**Сведения об авторах**

**Ирина Владимировна Строкина**, к.т.н., старший преподаватель кафедры обработки металлов давлением и материаловедения. ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID**: 0000-0003-3719-8949  
**E-mail**: chuzhinova.iv@yandex.ru  
**SPIN-код**: 3928-1409

**Виталий Сергеевич Маринич**, обучающийся кафедры обработки металлов давлением и материаловедения. ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail**: marinich\_vs@mail.ru

**Трофимова Арина Денисовна**, обучающийся кафедры обработки металлов давлением и материаловедения. ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail**: arinaatrva/053@mail.ru

**Information about the authors**

**Irina V. Strokina**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department Forming and Materials Science. EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University  
**ORCID**: 0000-0003-3719-8949  
**E-mail**: chuzhinova.iv@yandex.ru  
**SPIN-код**: 3928-1409

**Vitaly S. Marinich**, student of the Department Forming and Materials Science. EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University  
**E-mail**: marinich\_vs@mail.ru

**Arina D. Trofimova**, student of the Department Forming and Materials Science. EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University  
**E-mail**: arinaatrva/053@mail.ru

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 30.08.2024  
После доработки 16.09.2024  
Принята к публикации 23.09.2024

Received 30.08.2024  
Revised 16.09.2024  
Accepted 23.09.2024

**Оригинальная статья**

УДК 669

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-100-109

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОДУВКЕ  
КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ**

© 2024 г. Е. В. Протопопов, А. А. Уманский, Е. А. Беленецкий, С. С. Фатьянов

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

**Аннотация.** С использованием методики «горячего» моделирования для условий комбинированной продувки конвертерной ванны с подачей через днище перемешивающего нейтрального газа изучены особенности химической и температурной неоднородности расплава, особенности параметров образующихся реакционных зон и механизмы макрофизических процессов, возникающих при продувке металла. При обработке полученных экспериментальных данных получены численные значения эффективных коэффициентов диффузии и коэффициентов теплопроводности как характеристик, определяющих возможности повышения эффективности продувки и перемешивания конвертерной ванны. Установленные особенности поведения конвертерной ванны, особенности процессов в реакционной зоне и других участках ванны при комбинированной продувке подтверждают возможность повышения эффективности продувки и перемешивания расплава, а, следовательно, снижения химических и температурных градиентов.

**Ключевые слова:** конвертер, комбинированная продувка, горячее моделирование, тепломассообмен, температурная и химическая неоднородности

**Для цитирования:** Протопопов Е.В., Уманский А.А., Беленецкий Е.А., Фатьянов С.С. Высокотемпературное моделирование процессов тепломассообмена при комбинированной продувке конвертерной ванны. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):100–109. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-100-109](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-100-109)

**Original article**

**HIGH-TEMPERATURE MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES  
IN COMBINED PURGING**

© 2024 E. V. Protopopov, A. A. Umansky, E. A. Belenetsky, S. S. Fatyanov

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

**Abstract.** Using hot modeling technique for conditions of combined blowing of the converter bath with feeding of stirring neutral gas through the bottom, the features of chemical and temperature heterogeneity of the melt, features of parameters of the reaction zones formed and mechanisms of macro-physical processes occurring during metal blowing were studied. When processing the obtained experimental data, numerical values of effective diffusion coefficients and thermal diffusivity coefficients were obtained as characteristics determining the possibilities of increasing the efficiency of blowing and mixing of the converter bath. The established features of the converter bath behavior, features of processes in the reaction zone and other areas of the bath during combined blowing confirm the possibility of increasing the efficiency of blowing and mixing of the melt, and, consequently, reducing chemical and temperature gradients.

**Keywords:** converter, combined purging, hot modeling, heat and mass transfer, temperature and chemical heterogeneity

**For citation:** Protopopov E.V., Umansky A.A., Belenetsky E.A., Fatyanov S.S. High-temperature modeling of heat and mass transfer processes in combined purging. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):100–109. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-100-109](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-100-109)

### Введение

По возможностям получения новой информации при изучении конвертерного процесса высокотемпературное моделирование остается непревзойденным методом исследования механизма процессов, сопровождающих продувку расплава в конвертере различными технологическими газами.

Достигнутый на настоящий момент уровень развития техники высокотемпературного моделирования позволяет при соответствующей организации экспериментов получать необходимую информацию о гидродинамических [1 – 6] и тепломассообменных процессах при различных способах верхней и комбинированной продувки конвертерной ванны [7 – 12].

В настоящей работе с использованием отработанных ранее методик «горячего» моделирования выполнены исследования, которые позво-

ляют уточнить данные о структуре и параметрах образующихся реакционных зон в условиях комбинированной продувки кислородом сверху и донным перемешиванием расплава нейтральным газом и возникающими при этом в различных участках ванны температурных и химических градиентах [12; 13].

Эксперименты были выполнены на 60-кг многоцелевом конвертере, оснащенный необходимой контрольно-измерительной и регулирующей аппаратурой с использованием методик фиксации через прозрачную стенку конвертера, фотографической пирометрии и фото- и киносъемки происходящих при продувке макрофизических явлений.

Продувка кислородом передельного чугуна с содержанием 4,1 – 4,4 % С, 0,10 – 0,12 % Мп, 0,5 – 0,8 % Si осуществлялась с интенсивностью 3,5 – 4,0 м<sup>3</sup>/(т·мин) при использовании 4-сопловых

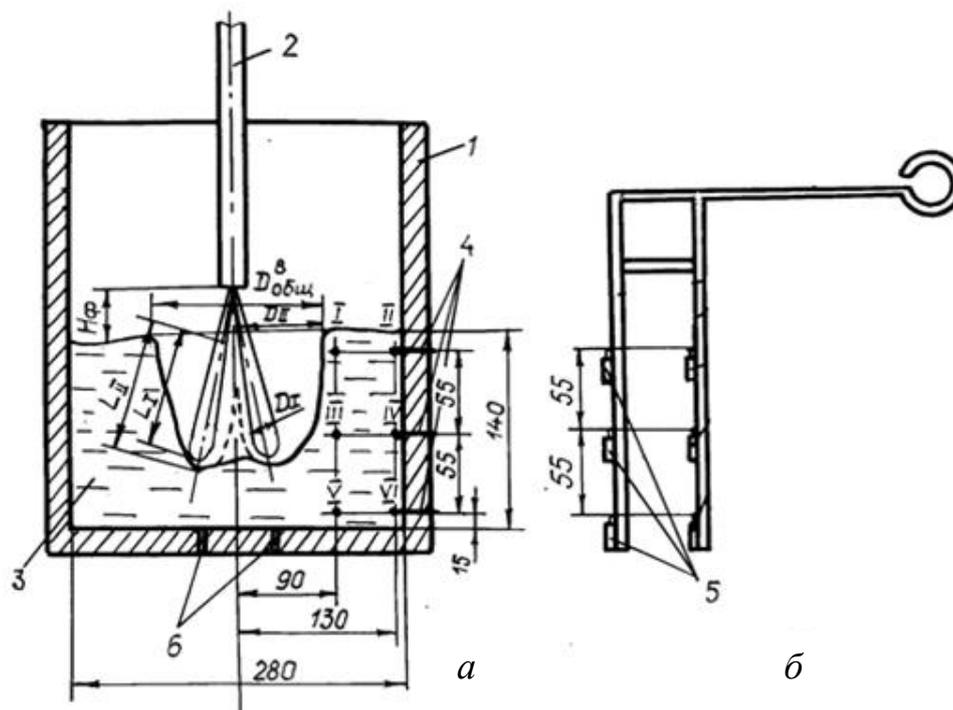


Рис. 1. Схемы основных параметров процесса, отбора проб металла и замера температуры из различных участков конвертерной ванны (размеры в мм) (а) и устройства пробоотборника (б):

1 – конвертер; 2 – кислородная фурма; 3 – металлическая ванна; 4 – стационарные термопары ПР 30/6; I, II, III, IV, V, VI – точки отбора проб и замеров (II, IV, VI) температуры ванны; 5 – кварцевые пробницы; 6 – донные фурмы (подача азота)

Fig. 1. Diagrams of the main process parameters, metal sampling (a) and the device/sampler (b):

I – converter; 2 – oxygen tuyere; 3 – metal bath; 4 – stationary thermocouples PR 30/6; I, II, III, IV, V, VI – sampling points and measuring (II, IV, VI) bath temperature; 5 – quartz probes; 6 – bottom tuyeres (nitrogen supply)

верхних кислородных фурм с цилиндрическими соплами диаметром 1,7 и 1,3 мм, расположенными под углом 15 и 20° к вертикали, и с двумя одноканальными трубчатыми соплами диаметром 0,001 м, симметрично расположенными в днище при подаче азота с расходом 0,10 – 0,15 м<sup>3</sup>/(т·мин). Во время продувки верхняя фурма фиксировалась на высоте  $H_{\phi} = 20 \div 90$  калибров относительно уровня спокойной ванны (рис. 1). При проведении экспериментов в определенный период операции специальный пробоотборник вводился на 5 – 10 с в конвертер со смещением по радиусу относительно термопар вдоль стенки, что обеспечивало взятие проб металла и замер температуры в фиксированных горизонтах ванны.

Изменение содержания кремния, углерода и температуры по ходу продувки расплава в конвертере представлено на рис. 2, где по результатам шести точек взятия проб, соответствующих донному, среднему и поверхностному уровням, отображена информация по изменению параметров расплава на трех горизонтах ванны вдоль стенки агрегата.

По аналогии с верхней продувкой [5; 6; 9; 14] и в соответствии с рис. 1 в условиях исследуемого дутьевого режима комбинированной продувки расплава зафиксированные с использованием фото- и кино съемки геометрические параметры образующейся реакционной зоны в период интенсивного обезуглероживания ванны имели следующие максимальные значения, мм:  $D_I = 25$ ;

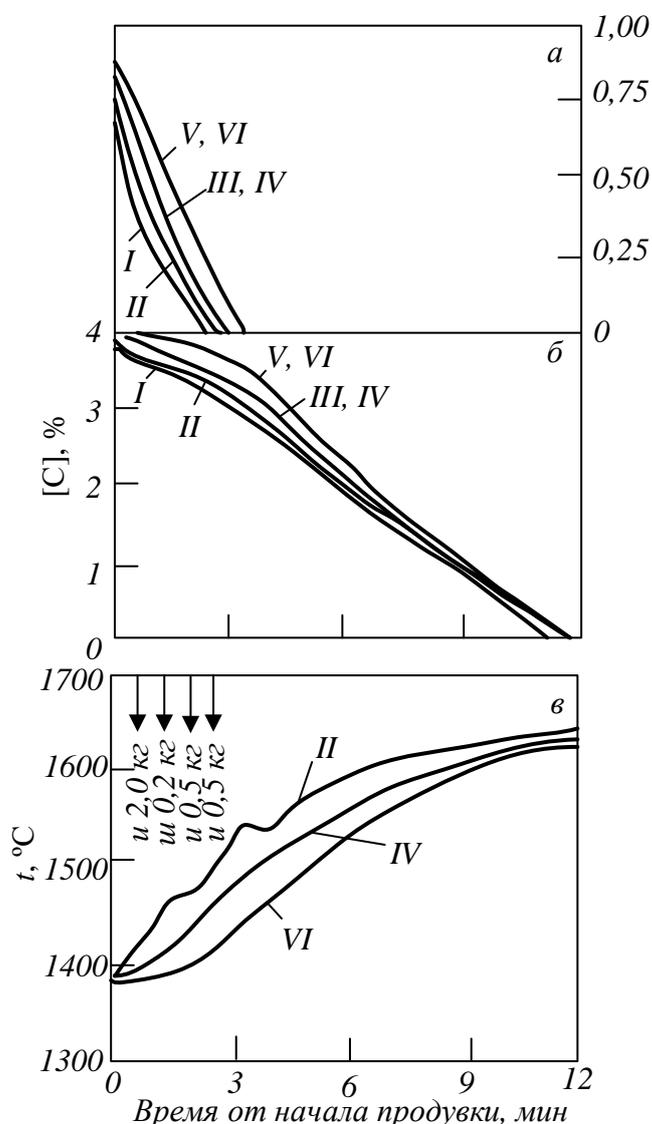


Рис. 2. Усредненные значения содержания кремния (а), углерода (б) и температур (в) на различных горизонтах конвертерной ванны по ходу операции при интенсивности продувки кислородом 3,8 м<sup>3</sup>/т·мин через 4-сопловую фурму (высота фурмы – 30 калибров; продувка азотом через два сопловых блока в днище с расходом 0,1 м<sup>3</sup>/т·мин.):

и, ш – присадки извести и плавикового шпата

Fig. 2. Average values of silicon (a), carbon (б) and temperatures (в) at different horizons of the converter bath during purging at an oxygen purge intensity of 3.8 м<sup>3</sup>/т·мин through a 4-nozzle tuyere (tuyere height – 30 calibers; nitrogen purge through two nozzle blocks in the bottom with with a flow rate of 0.1 м<sup>3</sup>/т·мин.): i, w – additives of lime and fluorspar

$D_{II} = 90$ ;  $D_{\text{общ}}^6 = 185$ ;  $L_I = 80$ ;  $L_{II} = 92$ . В данных условиях при общем повышении температуры металла в диапазоне 1350 – 1650 °С определенная методом фотографической пирометрии температура [15] в пределах первичной и вторичной реакционных зон составляла 1800 – 2000 и 1650 – 1850 °С соответственно (рис. 3 – 5).

Установлено, что концентрация кремния в поверхностных горизонтах ванны (рис. 2, а) значительно меньше, чем в нижних горизонтах,

в особенности в начальный период продувки. Приблизительно через 30 с после начала операции перепад концентрации по содержанию кремния составлял 0,25 – 0,35 %. Вследствие низкого содержания марганца в используемом чугуна перепад его концентраций по высоте ванны практически не зафиксирован.

В начальный период продувки характерный вид кривых, отражающих изменение концентрации углерода на различных горизонтах ванны

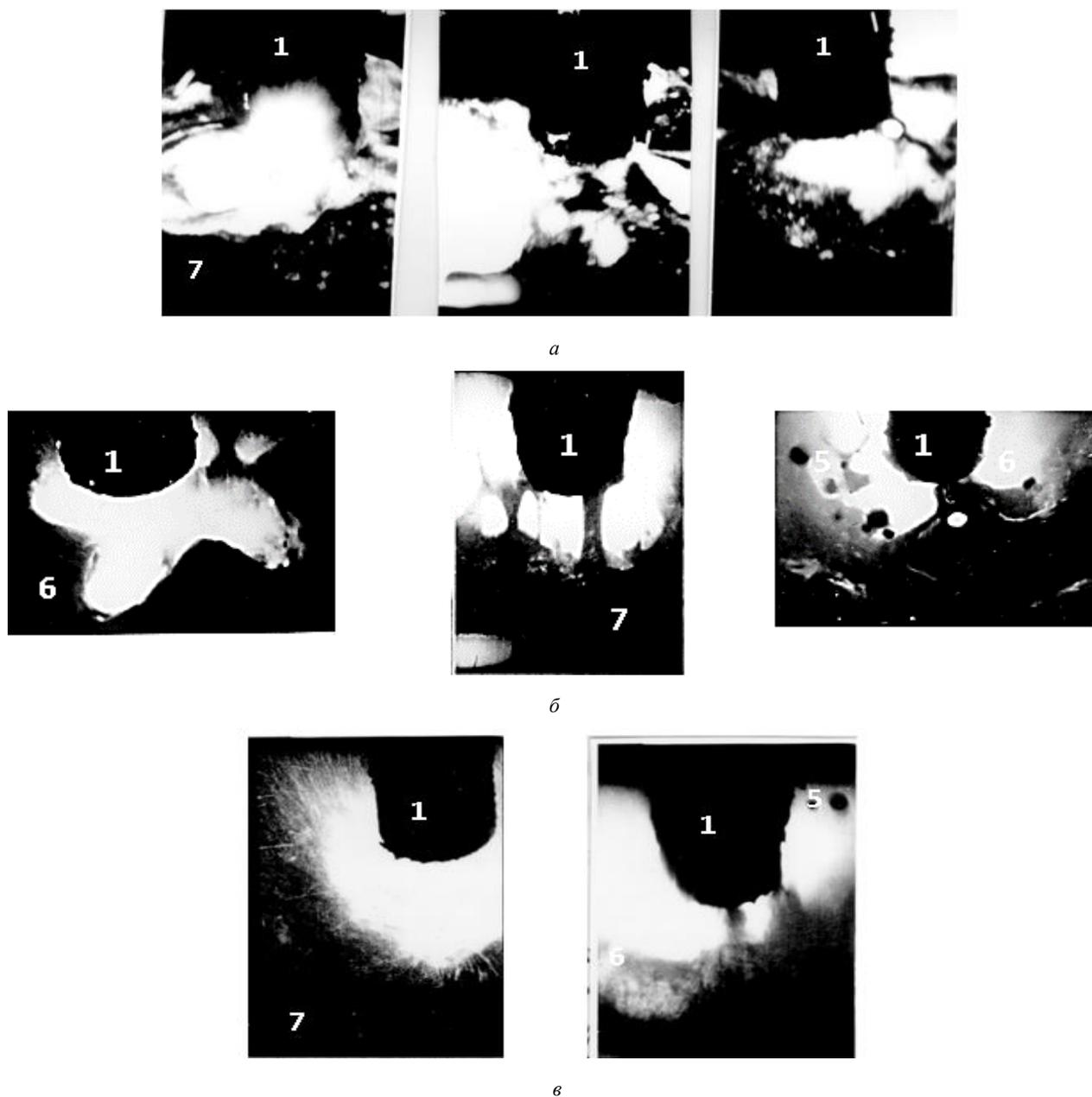


Рис. 3. Картина комбинированной продувки расплава ( $C/S = 3,2 \div 3,4 \%$ ) в соответствии с рис. 2 ( $P_{O_2} = 1,0 \div 1,3$  МПа;  $H_{\Phi} = 30 \div 50$  калибров; интервал между кадрами 0,5 с):

а – в режиме глубокого проникновения кислородных струй; б – в режиме наводки шлака «заглубленной» струей; в – при «свернутом» шлаке

Fig. 3. The picture of combined melt purging ( $C/S = 3.2 \div 3.4 \%$ ) in accordance with Fig. 2 ( $P_{O_2} = 1.0 \div 1.3$  MPa;  $H_{\Phi} = 30 \div 50$  calibers; interval between frames 0.5 s):

а – in the mode of deep penetration of oxygen jets; б – in the mode of slag aiming with a "buried" jet; в – with the slag "rolled up"

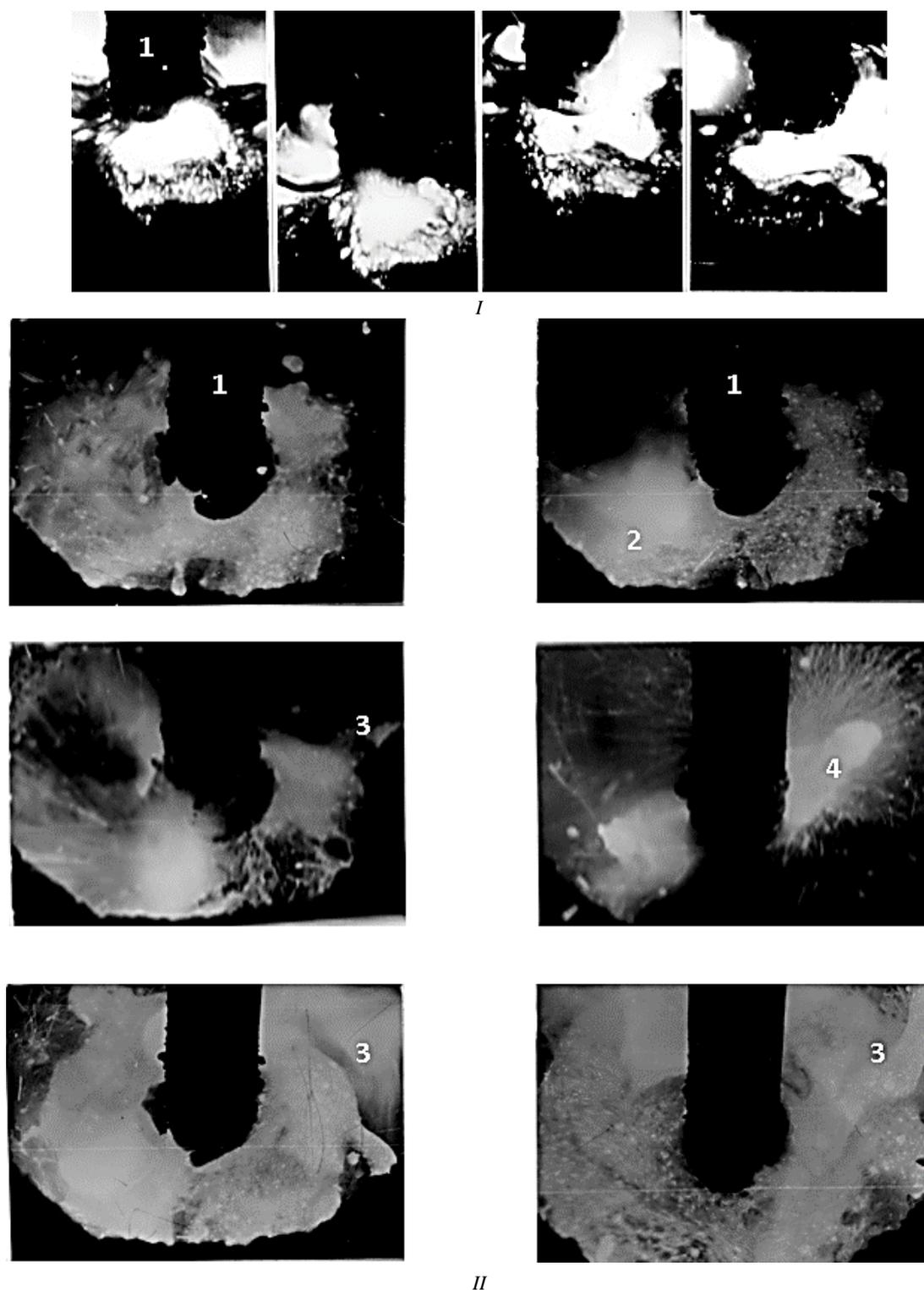


Рис. 4. Картина выхода на поверхность конвертерной ванны газообразных продуктов реакции обезуглероживания (I) (интервал между кадрами 0,5 с) и образование выбросов в условиях мягкой продувки (II) (в соответствии с рис. 3): I – фурма; 2 – пузыри CO, выходящие на поверхность шлака; 3 – выбросы металла и шлака; 4 – выход CO из реакционной зоны; 5 – корольки металла; 6 и 7 – формирующийся и «свернутый» шлак

Fig. 4. The picture of the release of gaseous products of the decarburization reaction to the surface of the converter bath (I) (the interval between frames is 0.5 s) and the formation of emissions under soft purge conditions (II) (in accordance with Fig. 3): I – tuyere; 2 – CO bubbles coming out onto the slag surface; 3 – metal and slag emissions; 4 – CO exit from the reaction zone; 5 – metal kings; 6 and 7 – forming and "rolled" slag

(рис. 2, б), имеет практически горизонтальный участок, что свидетельствует о некотором замедлении обезуглероживания до момента снижения содержания кремния в расплаве, что, оче-

видно, связано с быстрым окислением последнего при более высоком химическом сродстве к кислороду. После окисления кремния и нагреве ванны до температуры 1400 – 1450 °С практически

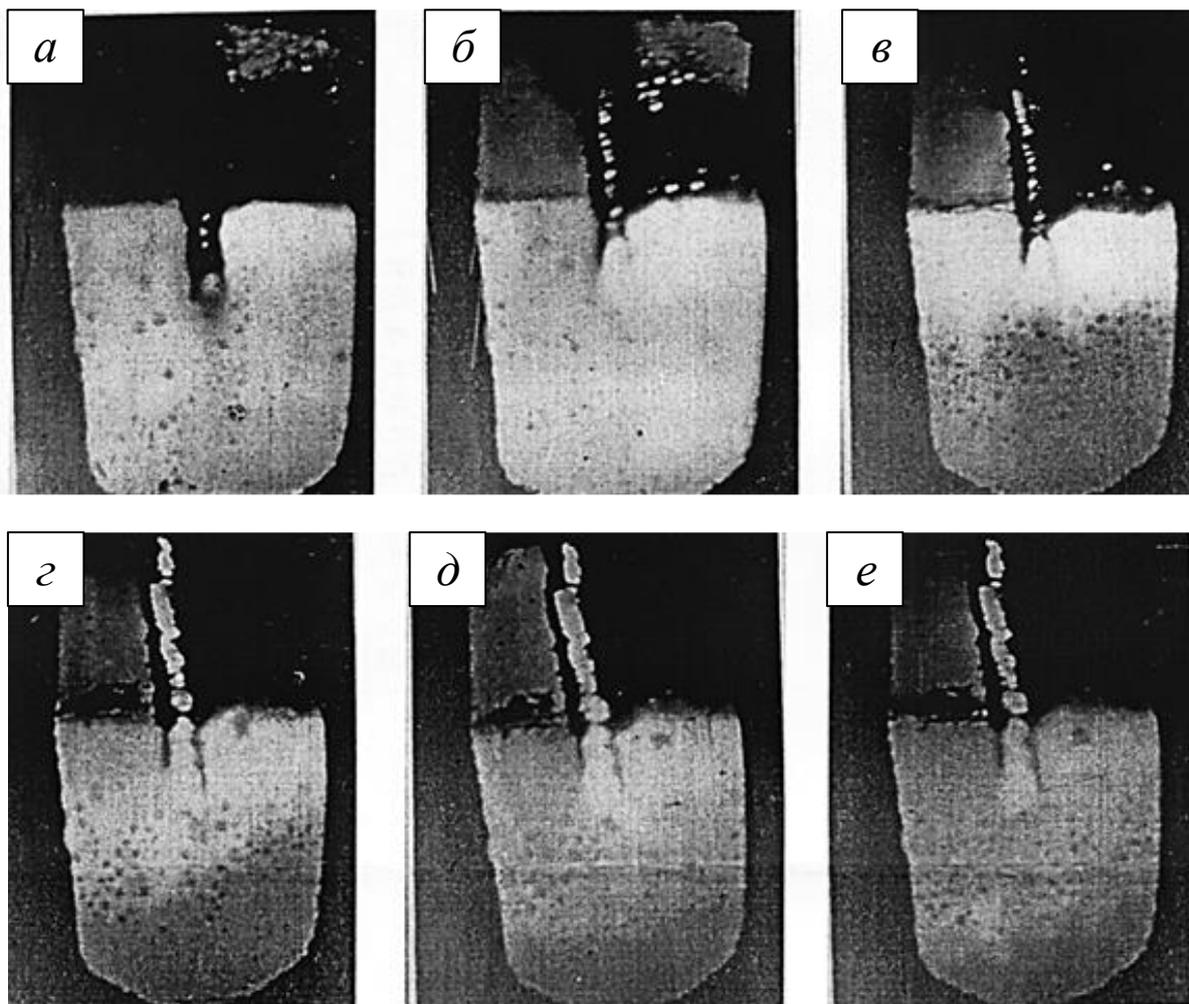


Рис. 5. Картина перемещения перегретых объемов металла из реакционной зоны в объем ванны (*a – e*) при расходе кислорода сверху  $3,5 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{мин}$  и расходе азота через два донных сопла –  $0,09 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{мин}$ , интервал между кадрами 8 с  
 Fig. 5. The picture of the movement of superheated volumes of metal from the reaction zone into the volume of the bath (*a – e*) with an oxygen consumption of  $3.5 \text{ m}^3/\text{t}\cdot\text{min}$  from above, nitrogen consumption through two bottom nozzles –  $0.09 \text{ m}^3/\text{t}\cdot\text{min}$ , the interval between frames is 8 s

через несколько секунд развивается интенсивное обезуглероживание расплава. При этом концентрация углерода в верхних участках ванны в течение значительного времени операции меньше на  $0,05 - 0,45 \%$  по сравнению с придонной зоной металла. Следует отметить, что разница по содержанию углерода и кремния в точках отбора *III* и *IV*, а также *V* и *VI* (рис. 1), как правило, находилась в пределах точности химического анализа.

Подобно зафиксированной химической неоднородности металла (рис. 2, *a, б*) при комбинированной продувке расплава также установлена температурная неоднородность конвертерной ванны (рис. 2, *в*). Так, с началом операции продувки температура расплава интенсивно растет прежде всего в поверхностных горизонтах ванны, при этом отмечается кратковременное снижение температуры ванны у поверхности после присадки шлакообразующих материалов в металл.

Как установлено (рис. 5), наблюдается существенное различие в скорости нагрева расплава вблизи поверхности ванны и у дна (рис. 2, *в*). В течение некоторого времени операции практически не фиксируется значительное повышение температуры расплава у дна конвертера, в то же время верхние горизонты ванны интенсивно нагревались, зона перегрева расплава постепенно расширялась по направлению к дну за счет развития циркуляции, что также зафиксировано кино съемкой через прозрачную стенку конвертера (рис. 5).

Как и в более ранних работах [5; 6; 8] в условиях верхней продувки при рабочей высоте фурмы  $25 \div 35$  калибров основные реакции рафинирования металла происходят преимущественно в области обобщенной реакционной зоны, поэтому зафиксированный перепад концентраций углерода и кремния в различных горизонтах ванны может быть представлен как своеобразный индикатор диффузионных затрудне-

ний в поставке окисляемых примесей к месту протекания реакций, то есть в реакционную зону [14; 16; 17]. При этом можно предполагать, что градиент концентраций указанных химических элементов будет определяться соотношением скорости окисления примесей в реакционной зоне, скорости доставки примесей с новыми порциями металла в эту зону циркуляционными потоками и расходом перемешивающегося газа, подаваемого через днище конвертера.

Зафиксированные особенности температурной и химической неоднородностей конвертерной ванны при комбинированной продувке позволяют предположить следующую схему развития процессов тепломассопереноса в расплаве. Преимущественное окисление углерода и шлакообразующих примесей, прежде всего кремния, марганца и железа в пределах обобщенной реакционной зоны, а также преобладающее выделение в ней тепла вследствие экзотермических реакций окисления этих химических элементов приводят к значительному перегреву (до 600 – 800 °С) данной зоны по отношению к остальному объему расплава. В дальнейшем перегретые и лишённые части окислившись примесей объемы металла из реакционной зоны распространяются в отдаленные участки ванны. При этом за счет интенсивного всплывания газовых пузырей создается замкнутая направленная циркуляция потоков расплава, поднимающихся вверх в пределах периферии вторичной реакционной зоны и по поверхности радиально отсесняющихся и далее опускающихся вдоль стенок конвертера. Зафиксировано, что наиболее интенсивная циркуляция происходит в пределах высоты ванны, соответствующей глубине проникновения верхних кислородных струй в металл в период интенсивного обезуглероживания, а характер упорядоченной циркуляции, прежде всего, будет определяться выходящим из реакционной зоны потоком оксида углерода CO. В условиях опытных плавов (рис. 2 – 5) экспериментально по скорости и кадрам киносъемки определены значения скорости перемещения перегретых потоков расплава из реакционной зоны в глубь ванны. Скорость составляла 0,05 – 0,8 м/с при интенсивности продувки кислорода 3,5 – 4,0 м<sup>3</sup>/т·мин при высоте расположения фурмы 20 – 90 калибров и расходе перемешивающего газа через днище 0,1 м<sup>3</sup>/т·мин.

Установленные особенности химических, температурных градиентов и развития циркуляционных потоков в конвертерной ванне при комбинированной продувке свидетельствуют о том, что для снижения неоднородности расплава по ходу операции эффективным приемом можно считать варьирование режимов верхнего и

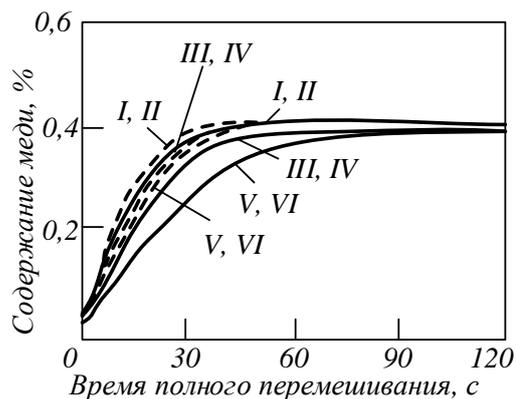


Рис. 6. Кривые изменения концентрации индикатора на различных горизонтах конвертерной ванны при верхней (—) и комбинированной (-----) продувке (обозначения у кривых – точки отбора проб в соответствии с рис. 1; ввод меди во время интенсивного обезуглероживания ванны на 5-й мин продувки)

Fig. 6. Curves of changes in the concentration of the indicator at different horizons of the converter bath during upper (—) and combined (-----) purging (the designations of the curves are sampling points in accordance with Fig. 1; copper injection during intensive decarbonization of the bath at the 5th minute of purging)

донного дутья и периодическое распространение объединенной реакционной зоны на всю глубину ванны.

Уменьшить химическую и температурную неоднородности конвертерной ванны, повысить интенсивность направленной циркуляции расплава удастся при комбинированной донной подаче перемешивающего нейтрального газа. В условиях экспериментов при подаче нейтрального газа через два трубчатых сопла, расположенных осесимметрично в днище конвертера с расходом 0,10 – 0,15 м<sup>3</sup>/т·мин под основания верхних реакционных зон, температура расплава верхних горизонтов ванны превышает таковую для нижних горизонтов примерно на 10 – 30 °С. В то же время при кратковременном отключении подачи нейтрального газа (60 – 120 с) в результате ухудшения перемешивания ванны фиксируется более значительный температурный перепад (до 90 – 100 °С) на указанных участках [11].

Анализом отобранных проб металла с момента ввода неокисляемого индикатора (навески жидкой меди) зафиксирован практически один и тот же вид кривых выравнивания (отклика) трассера по объему ванны, состоящих из плавного восходящего, а после достижения максимума концентрации индикатора практически прямолинейного участков (рис. 6). Обращает на себя внимание тот факт, что интенсивное распространение индикатора в значительной степени происходит в основном только в пределах объема ванны, где циркулируют перегретые потоки расплава с расширением зоны циркуляции при интенсивной

подаче перемешивающего нейтрального газа [15]. Это приводит к значительному перепаду концентрации меди между верхними и нижними горизонтами ванны, особенно на начальном этапе операции (рис. 6). Повышение «жесткости» верхнего дутья и применение комбинированной продувки, а, следовательно, улучшение перемешивания ванны способствуют уменьшению времени усреднения концентрации введенного индикатора в расплаве.

Полученные экспериментальные данные были использованы для определения эффективных коэффициентов диффузии ( $D_3$ ) и температуропроводности ( $a_3$ ). Для установленного вида кривых отклика на введенный индикатор (рис. 6) в случае определения значений  $D_3$  использовали известное выражение [18]:

$$D_3' = \frac{r^2(\tau_2 - \tau_1)}{9,2\tau_1\tau_2 \lg[C_2/C_1(\tau_2/\tau_1)^{3/2}]}, \quad (1)$$

где  $r$  – расстояние от точки ввода индикатора;  $\tau_1, \tau_2$  – время отбора проб;  $C_1, C_2$  – концентрация индикатора в моменты отбора проб.

С учетом скорости  $U$  направленных циркуляционных потоков металла для определения  $D_3$  возможно применение также другого уравнения [18]:

$$D_3^2 = U^2(\tau_3 - \tau_2) / (9,2\{\tau_2/(\tau_2 - \tau_1)\} \cdot \lg[C_2/C_1(\tau_2/\tau_1)^{3/2}] - \{\tau_3/(\tau_3 - \tau_1)\} \cdot \lg[C_3/C_1(\tau_3/\tau_1)^{3/2}]); \quad (2)$$

здесь  $C_3, \tau_3$  – концентрация индикатора ( $C_3$ ) в момент отбора ( $\tau_3$ ).

Для экспериментов в условиях комбинированной продувки расчеты значений  $D_3$  по выражениям (1) и (2) определяют значение в пределах  $(10 \div 36) \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. При этом наблюдается достаточно хорошая сходимость полученных значений  $D_3^1$  и  $D_3^2$  при скорости циркуляционных потоков металла порядка 0,08 – 0,20 м/с.

При использовании данного подхода увеличение эффективного коэффициента диффузии ( $D_3$ ) по мере увеличения садки агрегата для промышленных 160-т конвертеров следует ожидать изменения значений  $D_3$  в диапазоне 0,12 – 0,28 м<sup>2</sup>/с [19].

Экспериментальные данные о фиксируемом температурном градиенте в конвертерной ванне при различных условиях продувки позволили получить количественную информацию об эффективном коэффициенте температуропроводности ( $a_3$ ). Согласно описанной выше модели процесса теплопереноса для определения значения  $a_3$  можно использовать выражение [19]:

$$\Delta t = \frac{Q}{C\rho_M} \left( \frac{1}{2\sqrt{\pi D_3 \tau}} \right)^3 e^{-\frac{r^2}{4D_3 \tau}}, \quad (3)$$

где  $\Delta t$  – изменение температуры металла в фиксируемой точке под действием теплового источника;  $Q$  – мощность теплового источника;  $C$  и  $\rho_M$  – теплоемкость и плотность жидкого металла;  $r$  – расстояние.

Согласно выполненным расчетам для условий эксперимента величина  $a_3$  составляет  $(10 \div 25) \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с. По аналогии с работой [20] перенос полученных данных на условия работы промышленных агрегатов определяет значения  $a_3$  на уровне 0,03 – 0,05 м<sup>2</sup>/с.

### Выводы

Установленные особенности поведения конвертерной ванны, особенности процессов в реакционной зоне и других участках ванны при комбинированной продувке подтверждают возможность повышения эффективности продувки и перемешивания расплава, а, следовательно, снижения химических и температурных градиентов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rote F.E., Flinn R.A. Experimental observation of chemical and thermal gradients in an experimental BOF. *Met. Trans.* 1972;3(6):1973–1984.
2. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я. К вопросу горячего моделирования кислородно-конвертерного процесса. *Известия вузов. Черная металлургия.* 1978;(4):40–46.
3. Чернятевич А.Г. Высокотемпературное моделирование кислородно-конвертерного процесса. *Известия вузов. Черная металлургия.* 1991;(12):16–18.
4. Galloway S.M., Green M.J., Balafce S.R. Improvement in furnace performance at inland. *Iron and Steelmaker.* 1992;(1):38–43.
5. Баптизманский В.И., Охотский В.Б. *Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса.* Киев-Донецк: Вища школа, 1981:183.
6. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Лаврик Д.А., Мастеровенко Е.Л. Исследование структуры и параметров реакционных зон при верхней продувке применительно к проектированию многоцелевых конвертерных фурм. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2002;(12):16–21.
7. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. *Теория продувки сталеплавильной ванны.* Москва: Металлургия, 1974:495.
8. Зарвин Е.Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И. О месте преимущественного окисления

шлакообразующих примесей при продувке металла кислородом. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1975;(2):22–27.

9. Зарвин Е.Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И., Никитин Ю.П., Дорошенко В.А. Изучение процесса продувки конвертерной ванны с использованием фотокиносъемки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1974;(12):33–37.
10. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Условия подобия при высокотемпературном моделировании конвертерных процессов. Аэрогидродинамическое подобие. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1997;(8):26–31.
11. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В., Ганзер Л.А. О некоторых особенностях окисления примесей в конвертерной ванне при комбинированной продувке. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1987;(4):25–29.
12. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Исследование взаимодействия кислородных струй с отходящими конвертерными газами. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1996;(10):5–9.
13. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Юдин С.В. Исследование химических и температурных градиентов в конвертерной ванне с использованием высокотемпературного моделирования. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1997;(10):20–24.
14. Зарвин Е.Я., Соломон Г.М., Волович М.И. Особенности массопереноса элементов в условиях верхней кислородной продувки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1982;(6):29–34.
15. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Экспериментальное изучение параметров реакционной зоны конвертерной ванны в условиях комбинированной продувки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991;(6):17–22.
16. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Юдин С.В. Гидродинамические особенности поведения конвертерной ванны при различных способах продувки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1998;(8):23–29.
17. Мокринский А.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Гидродинамические режимы взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2005;(4):14–17.
18. Скребцов А.М. *Радиоактивные изотопы в сталеплавильных процессах*. Москва: Металлургия, 1972:304.
19. Тихонов А.Н., Самарский А.А. *Уравнения математической физики*. Москва: Наука, 1966:548.
20. Охотский В.Б., Пейзанский А.Д. Теплоперенос в конвертерной ванне. В кн.: *Сталеплавильное производство: Темат. отрас. сб. МЧМ СССР*. Москва: Металлургия, 1974;(3):85–87.

#### REFERENCES

1. Rote F.E., Flinn R.A. Experimental observation of chemical and thermal gradients in an experimental BOF. *Met. Trans.* 1972;3(6): 1973–1984.
2. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya. On the issue of hot modeling of the oxygen converter process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1978;(4):40–46. (In Russ.).
3. Chernyatevich A.G. High-temperature modeling of the oxygen converter process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991;(12):16–18. (In Russ.).
4. Galloway S.M., Green M.J., Balafce S.R. Improvement in furnace performance at inland. *Iron and Steelmaker*. 1992;(1):38–43.
5. Baptizmansky V.I., Okhotsky V.B. *Physico-chemical bases of the oxygen converter process*. Kiev-Donetsk: Vishcha shkola, 1981:183. (In Russ.).
6. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Lavrik D.A., Masterovenko E.L. Investigation of the structure and parameters of reaction zones during upper purging applied to the design of multi-purpose converter tuyeres. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002;(12):16–21. (In Russ.).
7. Yavoysky V.I., Dorofeev G.A., Povkh I.L. *The theory of purging a steelmaking bath*. Moscow: Metallurgiya, 1974:495. (In Russ.).
8. Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I. On the place of predominant oxidation of slag-forming impurities during metal purging with oxygen. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1975;(2):22–27. (In Russ.).
9. Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I., Nikitin Yu.P., Doroshenko V.A. Studying the process of purging a converter bath using photographic photography. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1974;(12):33–37. (In Russ.).
10. Similarity conditions in high-temperature modeling of converter processes. Aerohydrodynamic similarity. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997;(8):26–31. (In Russ.).
11. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V., Ganzer L.A. On some features of the oxidation of impurities in a converter bath during combined purging. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1987;(4):25–29. (In Russ.).
12. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Investigation of the interaction of oxygen jets with waste converter gases. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1996;(10):5–9. (In Russ.).
13. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. Investigation of chemical and temperature gradients in a converter bath using high-temperature

- modeling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997;(10):20–24. (In Russ.).
14. Zarvin E.Ya., Solomon G.M., Volovich M.I. Features of mass transfer of elements in conditions of upper oxygen purging. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982;(6):29–34. (In Russ.).
  15. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Experimental study of the parameters of the reaction zone of a converter bath under conditions of combined purging. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991;(6):17–22. (In Russ.).
  16. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. Hydrodynamic features of the behavior of a converter bath with various purging methods. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1998;(8):23–29. (In Russ.).
  17. Mokrinisky A.V., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Hydrodynamic modes of interaction of oxygen jets with a converter bath. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2005;(4):14–17. (In Russ.).
  18. Skrebtsov A.M. *Radioactive isotopes in steelmaking processes*. Moscow: Metallurgy, 1972:304. (In Russ.).
  19. Tikhonov A.N., Samarsky A.A. *Equations of mathematical physics*. Moscow: Nauka, 1966:548. (In Russ.).
  20. Okhotsky V.B., Pezansky A.D. *Heat transfer in a converter bath*. In the book: *Steelmaking: Temat. branch of the USSR Ministry of Emergency Situations*. Moscow: Metallurgy, 1974;(3):85–87. (In Russ.).

#### Сведения об авторах

**Евгений Валентинович Протопопов**, д.т.н., профессор, профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0002-7554-2168  
**E-mail:** protopopov@sibsiu.ru

**Александр Александрович Уманский**, д.т.н., доцент, профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

**ORCID:** 0000-0003-4403-9006

**E-mail:** umanskii@bk.ru

**Евгений Анатольевич Беленецкий**, магистрант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** info@vpk-oil.ru

**Сергей Сергеевич Фатянов**, магистрант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** ssfatianov@mail.ru

#### Information about the authors

**Evgenii V. Protopopov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0002-7554-2168  
**E-mail:** protopopov@sibsiu.ru

**Aleksandr A. Umanskii**, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0003-4403-9006  
**E-mail:** umanskii@bk.ru

**E. A. Belenetsky**, undergraduate student of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University  
**E-mail:** info@vpk-oil.ru

**Sergei S. Fatianov**, undergraduate student of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University  
**E-mail:** ssfatianov@mail.ru

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

Поступила в редакцию 26.08.2024  
После доработки 10.09.2024  
Принята к публикации 13.09.2024

Received 26.08.2024  
Revised 10.09.2024  
Accepted 13.09.2024

**Оригинальная статья**

УДК 669.187

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-110-119

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ  
КУЗБАССА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ФЛЮСОВ  
ДЛЯ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ**

© 2024 г. А. А. Уманский, Е. В. Протопопов, С. А. Полежаев

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

**Аннотация.** С целью обоснования возможности и целесообразности производства из местного сырья магнийсодержащих флюсов, присаживаемых в конвертерный шлак при использовании технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку кислородных конвертеров, проведен комплекс исследований. Изучен процесс кислотного выщелачивания оксида магния из отходов обогащения серпентин-магнетитовых руд Абагурской аглофаборики (закономерности влияния вида применяемых кислот, их концентрации, температуры пульпы и гранулометрического состава исходных отходов). Согласно полученным закономерностям степень извлечения оксида магния из серпентина при использовании для выщелачивания соляной, серной и азотной кислот увеличивается при повышении их концентрации с 5 до 20 %, а при дальнейшем росте концентрации указанных кислот – изменяется незначительно и, в ряде случаев, разнонаправленно. При этом абсолютные значения степени выщелачивания оксида магния имеют высокие значения уже при концентрации перечисленных кислот на уровне 5 %. Показано, что повышение температуры пульпы с 30 до 80 °С значительно увеличивает степень извлечения окиси магния из серпентина при прочих равных условиях, а дальнейшее повышение температуры пульпы вплоть до 110 °С уже не оказывает значимого влияния на степень извлечения оксида магния. Установлено влияние повышения степени измельчения серпентина на степень извлечения из него оксида магния вне зависимости от вида применяемой кислоты при прочих равных условиях. Дополнительно проведенными исследованиями кинетики рассматриваемого процесса кислотного выщелачивания подтверждено значимое влияние повышения температуры на увеличение степени извлечения оксида магния из серпентина. Установлено влияние увеличения продолжительности рассматриваемого процесса на его эффективность. На основании проведенных исследований предложен вариант технологических схем комплексной переработки серпентин-магнетитовых руд, включающий в себя выщелачивание оксида магния из серпентина с последующей нейтрализацией маточного раствора и извлечением из него ценных компонентов.

**Ключевые слова:** магнезиальные флюсы, горячие ремонты футеровки, кислородный конвертер, отходы обогащения руд, кислотное выщелачивание

**Для цитирования:** Уманский А.А., Протопопов Е.В., Полежаев С.А. Перспективы использования минерально-сырьевой базы Кузбасса при производстве магнезиальных флюсов для конвертерной плавки. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2024;4(50):110–119. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-110-119](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-110-119)

**Original article**

**PROSPECTS FOR THE USE OF THE KUZBASS MINERAL RESOURCE BASE IN THE  
PRODUCTION OF MAGNESIA FLUXES FOR CONVERTER MELTING**

© 2024 A. A. Umanskii, E. V. Protopopov, S. A. Polezhaev

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

**Abstract.** In order to substantiate the possibility and expediency of producing magnesium-containing fluxes from local raw materials, which are embedded in converter slag using the technology of applying slag garnishing to the lining of oxygen converters, a set of studies has been conducted. The indicators of the process of acidic leaching of magnesium oxide from the waste of the enrichment of serpentine-magnetite hands of the Abagur sintering plant, including the patterns of influence of the type of acids used, their concentration, pulp temperature and granulometric composition of the initial waste, are studied. According to the obtained patterns, the degree of extraction of magnesium oxide from serpentine when used for leaching hydrochloric, sulfuric and nitric acids increases with an increase in their concentration from 5% to 20%, and with a further increase in the concentration of these acids changes slightly and, in some cases, in different directions. It is shown that an increase in pulp temperature from 30 °C to 80 °C significantly increases the degree of extraction of magnesium oxide from serpentine, all other things being equal, and a further increase in pulp temperature up to 110 °C no longer has a significant effect on the degree of extraction of magnesium oxide. A significant effect of increasing the degree of grinding of serpentine on the degree of extraction of magnesium oxide from it, regardless of the type of acid used, other things being equal, has been established. Additionally, studies of the kinetics of the acid leaching process under consideration confirmed the significant effect of an increase in temperature on an increase in the degree of extraction of magnesium oxide from serpentine, and also established the effect of an increase in the duration of the process under consideration on its effectiveness. Based on the conducted research, variants of technological schemes for the complex processing of serpentine-magnetite ores are proposed, including the leaching of magnesium oxide from serpentine, followed by neutralization of the mother liquor and extraction of valuable components from it.

**Keywords:** magnesia fluxes, hot lining repairs, oxygen converter, ore dressing waste, acid leaching

**For citation:** Umanskii A.A., Protopopov E.V., Polezhaev S.A. Prospects for the use of the Kuzbass mineral resource base in the production of magnesia fluxes for converter melting. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):110–119. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-110-119](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-110-119)

### Введение

В последние десятилетия широкое применение в отечественных и зарубежных кислородно-конвертерных цехах находит технология нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертерных агрегатов [1 – 3]. Применение указанного метода горячих ремонтов футеровки кислородных конвертеров позволяет значительно (до 15 – 20 %) повысить стойкость рабочего слоя футеровки [4 – 6], а, следовательно, и увеличить продолжительность кампании конвертера, повысить производительность кислородно-конвертерных цехов [7 – 9].

Технология нанесения шлакового гарнисажа заключается в раздуве специально подготовленного конечного шлака на стенки конвертера пу-

тем подачи азота через верхнюю фурму. При этом одним из основных требований к применяемому шлаку является повышенное содержание в нем оксида MgO (до 8 – 12 %) [10 – 12]. На практике увеличение содержания MgO в конвертерном шлаке добиваются путем присадки по ходу плавки специальных магнезиальных флюсов [13 – 15]. При этом для быстрого растворения указанных флюсов в формирующихся конвертерных шлаках разработан ряд составов с повышенным содержанием оксидов магния и потерь при прокаливании ( $\Delta m_{\text{прк}}$ ) [16; 17]. Ввод флюсов за счет повышенных потерь при прокаливаемости (табл. 1) приводит к разрыву флюсов, позволяя им быстро усваиваться шлаком [18 – 20].

Т а б л и ц а 1

### Кинетика выщелачивания серпентина 20 %-ым раствором серной кислоты (фракция серпентина 0,4 мм)

Table 1. Kinetics of serpentine leaching with 20% sulfuric acid solution (0.4 mm serpentine fraction)

$t_{\text{пуль}}, ^\circ\text{C}$	Продолжительность процесса, ч	Степень извлечения компонентов, %			
		MgO	NiO	CoO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
80	2	84	92,0	94,0	58
90	4	83	97,0	99,0	58
	6	92	98,0	99,4	71
100	2	95	99,7	99,7	70

Необходимо отметить, что высокомагнезиальные флюсы имеют достаточно высокую стоимость, что в значительной степени обусловлено удаленностью производителей рассматриваемого вида продукции от основных потребителей, то есть значительными транспортными расходами. Это особенно актуально для АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») в силу географических особенностей месторасположения. Одним из эффективных способов решения этой проблемы является организация производства высокомагнезиальных флюсов в Кузбассе с использованием местных материалов.

Одним из перспективных источников оксида MgO для производства высокомагнезиальных флюсов являются серпентин-магнетитовые руды или хвосты обогащения таких руд. Серпентины предоставляют собой силикатные минералы (магнево-железистые гидросиликаты) [21 – 23]. На сегодняшний день в хвостохранилище Абагурской агломерационно-обогащительной фабрики накоплены значительные запасы серпентина (порядка 4 млн т) в отходах обогащения серпентин-магнетитовых руд Тейского месторождения. Переработка таких отходов с извлечением оксида MgO является перспективным направлением как с точки зрения организации производства высокомагнезиальных флюсов из местного сырья, так и с точки зрения уменьшения экологического ущерба от деятельности горно-металлургических предприятий.

#### Методика проведения исследований

С целью обоснования оптимальной технологической схемы извлечения оксида MgO из хвостов обогащения серпентин-магнетитовых руд Тейского месторождения проведены лабораторные исследования по извлечению ценных компонентов из серпентина.

Необходимо отметить, что схема в общем виде включает в себя следующие стадии:

1 – выделение серпентина из хвостов обогащения Абагурской фабрики;

2 – разложение серпентина минеральными кислотами;

3 – фракционное извлечение ценных компонентов из маточных растворов;

4 – переработка побочных растворов на удобрения, их рециркуляция и регенерация;

5 – переработка и использование кремнеземистого остатка.

В ходе проведения исследований выщелачивание проводили в стеклянном реакторе с обратным холодильником, применение которого

обусловлено необходимостью сохранения постоянного объема пульпы и отношения жидкой и твердой фаз. Выщелачивание серпентина проводили без и с нагреванием пульпы, при этом фактически выщелачивание без нагрева протекало при повышенных (до 30 – 35 °С) температурах. Для регулирования температуры в реакционной зоне применяли ультратермостат. Проводили интенсивное перемешивание реакционной массы механической мешалкой.

При определении количества выщелачивающего реагента, необходимого для полного разложения серпентина, исходили из условия, что все содержащиеся в серпентине оксиды металлов переходят в раствор. По окончании процесса проводили фильтрацию пульпы в горячем состоянии. Полученные кремнеземистые отходы промывали водой до отрицательной реакции на кислотный анион, затем высушивали. Расчеты степени извлечения компонента проводили на основании данных химического анализа отходов и содержания компонентов в исходном серпентине:

$$n = \frac{g}{G} 100 \%,$$

где  $g$  и  $G$  – количество компонента, перешедшего в раствор, и его количество в исходном серпентине.

Для выщелачивания серпентина использовали серную, соляную и азотную кислоты, а также сульфат аммония, являющийся побочным продуктом коксохимического производства. В ходе проведения исследований анализировали влияние на степень выщелачивания оксида MgO из серпентина следующих параметров: концентрация кислоты, температура пульпы, гранулометрический состав (степень измельчения) серпентина.

При рассмотренном методе кислотного выщелачивания серпентина проводится первичное разделение растворимой и нерастворимой частей, которые отделяются друг от друга фильтрацией или декантацией. Полученный маточный раствор содержит смесь солей магния, а также оксиды железа, алюминия, никеля, кобальта, содержащихся в исходном серпентине. Кроме перечисленных компонентов маточные растворы содержат до 50 г/л остаточной свободной кислоты, в результате с точки зрения дальнейшей переработки необходимо провести ее нейтрализацию. С целью обоснования оптимального метода нейтрализации маточного раствора проведены исследования с использованием различных компонентов (нейтрализаторов).

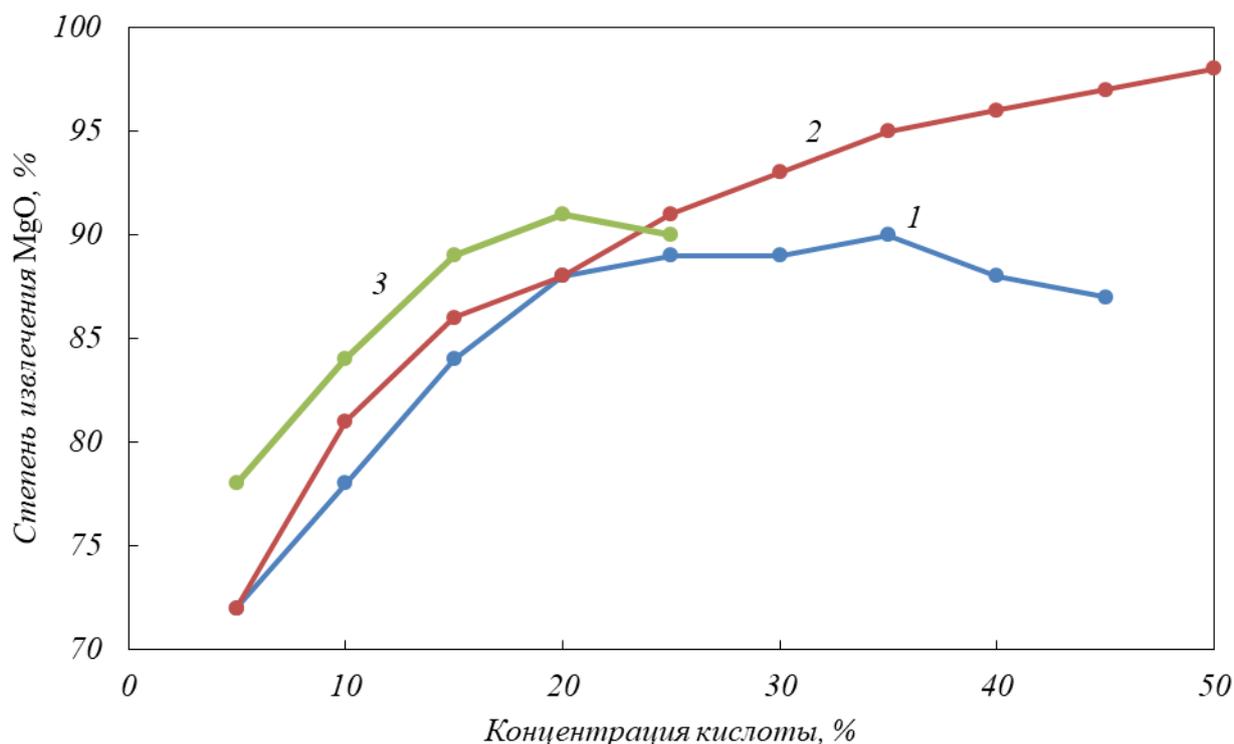


Рис. 1. Влияние концентрации кислот на степень извлечения оксида MgO из серпентина при выщелачивании:  
1 – 3 – серная, азотная, соляная кислоты

Fig. 1. Effect of acid concentration on the degree of extraction of MgO oxide from serpentine during leaching:  
1 – 3 – sulfuric acid, nitric acid, hydrochloric acid

Исследования применения для нейтрализации кислоты обожженного серпентина проводили при нормальной температуре и температуре кипения пульпы. В процессе нейтрализации пульпу подвергали интенсивному перемешиванию. Проведены исследования по нейтрализации свободной кислоты маточного раствора следующими компонентами: газообразный или водный раствор 25 % аммиака и 1n раствор карбоната аммония.

#### Результаты исследований и их обсуждение

По полученным данным (рис. 1) степень извлечения оксида MgO из серпентина для всех видов кислот, используемых при выщелачивании, имеет тенденцию к увеличению при повышении их концентрации с 5 до 20 %, а при дальнейшем росте концентрации указанных кислот степень извлечения возрастает на небольшую величину или несколько снижается. Необходимо отметить, что абсолютные значения степени выщелачивания оксида MgO достаточно высоки уже при концентрации кислот примерно 5 %.

Установлено, что при повышении температуры пульпы  $t_{\text{пул}}$  в диапазоне от 30 до 80 °C при прочих равных условиях имеет место интенсивное увеличение степени извлечения окиси магния из серпентина вне зависимости от вида используемой кислоты и ее концентрации (рис. 2). Дальнейшее повышение температуры пульпы

вплоть до 110 °C уже не оказывает значимого влияния на степень извлечения оксида MgO.

Определено, что увеличение степени измельчения серпентина обуславливает значительное повышение степени извлечения из него оксида магния вне зависимости от вида применяемой кислоты (рис. 3).

С целью формирования более полного представления о механизмах выщелачивания оксида MgO из серпентина проведены дополнительные исследования кинетики рассматриваемого процесса, в результате чего подтверждено влияние повышения температуры и продолжительности выщелачивания на увеличение степени извлечения оксида MgO из серпентина (табл. 1, 2).

В рамках исследований нейтрализации свободной кислоты в маточном растворе показано (табл. 3), что с увеличением добавленного в раствор количества серпентина концентрация свободной кислоты значительно уменьшается. При этом маточный раствор обогащается магниевыми солями, а также никелем и кобальтом. Кроме того, в раствор переходит кальций, что загрязняет продукт. Определено, что замена сырого серпентина обожженным не приводит к заметному улучшению процесса.

При исследовании нейтрализации свободной кислоты (табл. 4) установлено, что железо во всех случаях полностью выделяется в виде гидроксида, а основная часть никеля и кобальта реаги-

Т а б л и ц а 2

**Кинетика выщелачивания серпентина серной кислотой ( $t_{\text{пл}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ )**  
**Table 2. Kinetics of leaching of serpentinite with sulfuric acid ( $t_{\text{пл}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ )**

Продолжительность процесса, ч	Концентрация кислоты, %	Степень извлечения компонентов, %				Степень использования кислоты, %
		MgO	NiO	CoO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
1	10	82	82	81	59	65
2		84	87	82	64	77
3		88	83	83	71	82
1	20	87	86	82	73	77
2		90	88	85	76	83
3		92	88	90	84	84
1	30	87	88	91	73	84
2		89	87	93	84	86
3		93	84	93	86	88

Т а б л и ц а 3

**Результаты нейтрализации солянокислотного маточного раствора необожженным серпентином**  
**Table 3. Results of neutralization of hydrochloric acid mother liquor with unfired serpentinite**

Концентрация свободной кислоты, г/л		Масса серпентина, г	Состав раствора, %					
до нейтрализации	после нейтрализации		до нейтрализации			после нейтрализации		
			MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
40	7	100	98	19	1,0	118	16	1,3
36	9	50	98	19	0,8	112	17	1,2
40	20	30	97	19	0,8	105	19	1,1

Т а б л и ц а 4

**Результаты исследований фракционного осаждения компонентов на первой стадии нейтрализации аммиаком**  
**Table 4. The results of studies of fractional precipitation of components at the first stage of ammonia neutralization**

Концентрация свободной кислоты, г/л	pH осаждения	Масса сухого осадка, г	Состав осадка, %					
			MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	NiO	CoO	
<i>Маточный раствор, полученный выщелачиванием серпентина азотной кислотой</i>								
12	5,1	3,4	0,5	68,5	0,05	0,5	0,13	
15	4,9	5,8	0,4	65,3	0,09	0,2	0,12	
21	5,4	7,6	0,4	62,9	0,12	0,1	0,12	
22	5,5	6,1	0,7	63,7	0,22	0,2	0,11	
23	5,1	6,9	0,7	66,1	0,12	0,3	0,08	
27	5,6	8,6	0,7	61,3	0,11	0,1	0,12	
44	4,9	7,6	0,2	66,7	0,06	0,2	0,11	
<i>Маточный раствор, полученный после предварительного выщелачивания серпентина соляной кислотой</i>								
4	7,0	5,7	12,0	49,3	0,18	0,07	0,26	
4	7,2	4,1	9,8	53,8	0,14	0,12	0,30	
7	7,6	7,4	7,4	51,4	0,04	0,06	0,10	
9	7,0	9,6	13,6	51,4	0,13	0,04	0,13	
21	9,8	10,2	10,2	50,5	0,24	0,04	0,13	

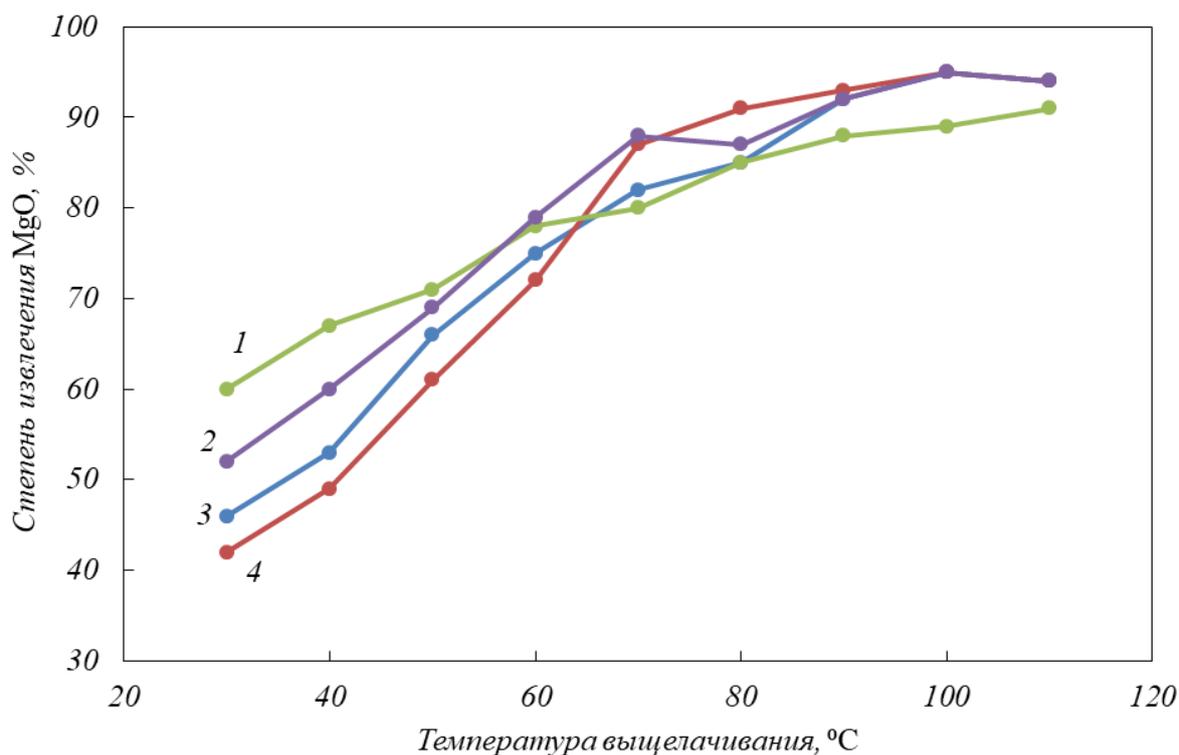


Рис. 2. Влияние температуры выщелачивания на степень извлечения оксида MgO из серпентина в зависимости от вида используемой кислоты:

1 – 20 % соляной кислоты; 2 и 4 – 45 и 25 % азотной кислоты; 3 – 20 % серной кислоты

Fig. 2. Influence of the leaching temperature on the degree of extraction of MgO oxide from serpentine, depending on the type of acid used:

1 – 20 % hydrochloric acid; 2 and 4 – 45 and 25 % nitric acid; 3 – 20 % sulfuric acid

рует с гидратом оксида железа, образуя нерастворимые гидроферриты  $MeO - Fe_2O_3 - nH_2O$ .

На основании результатов проведенных исследований предложена технологическая схема

комплексной переработки серпентин-магнетитовых руд.

Согласно разработанной технологической схеме (рис. 4) выщелачивание осуществляется

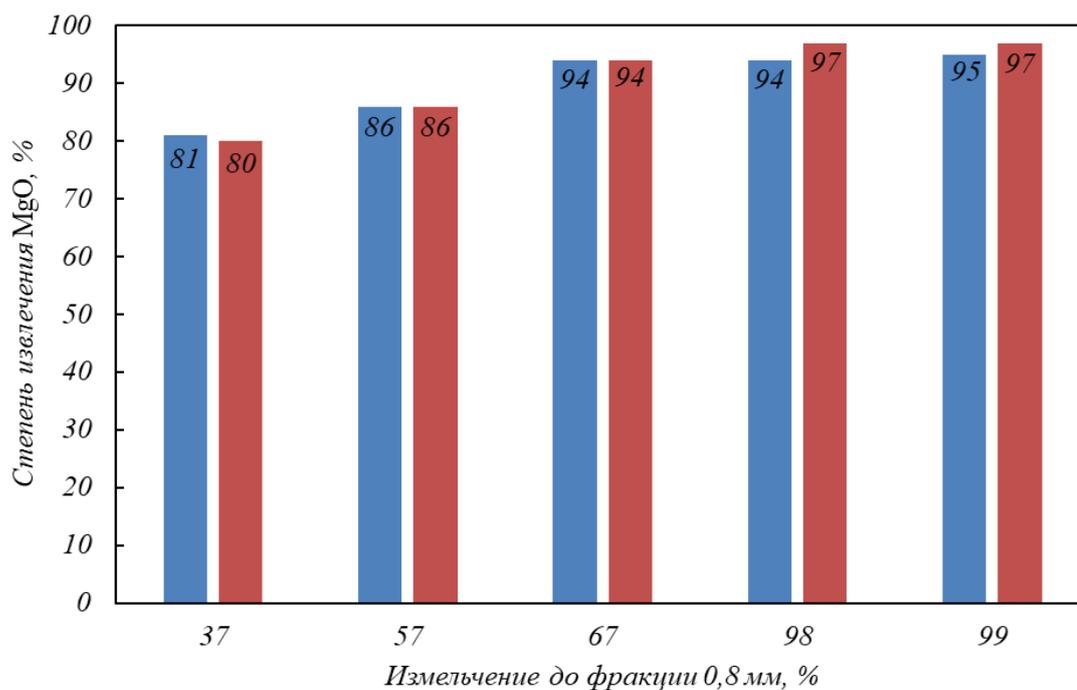


Рис. 3. Влияние степени извлечения исходного серпентина на степень извлечения оксида MgO при выщелачивании

Fig. 3. The effect of the degree of extraction of the initial serpentine on the degree of extraction of MgO oxide during leaching

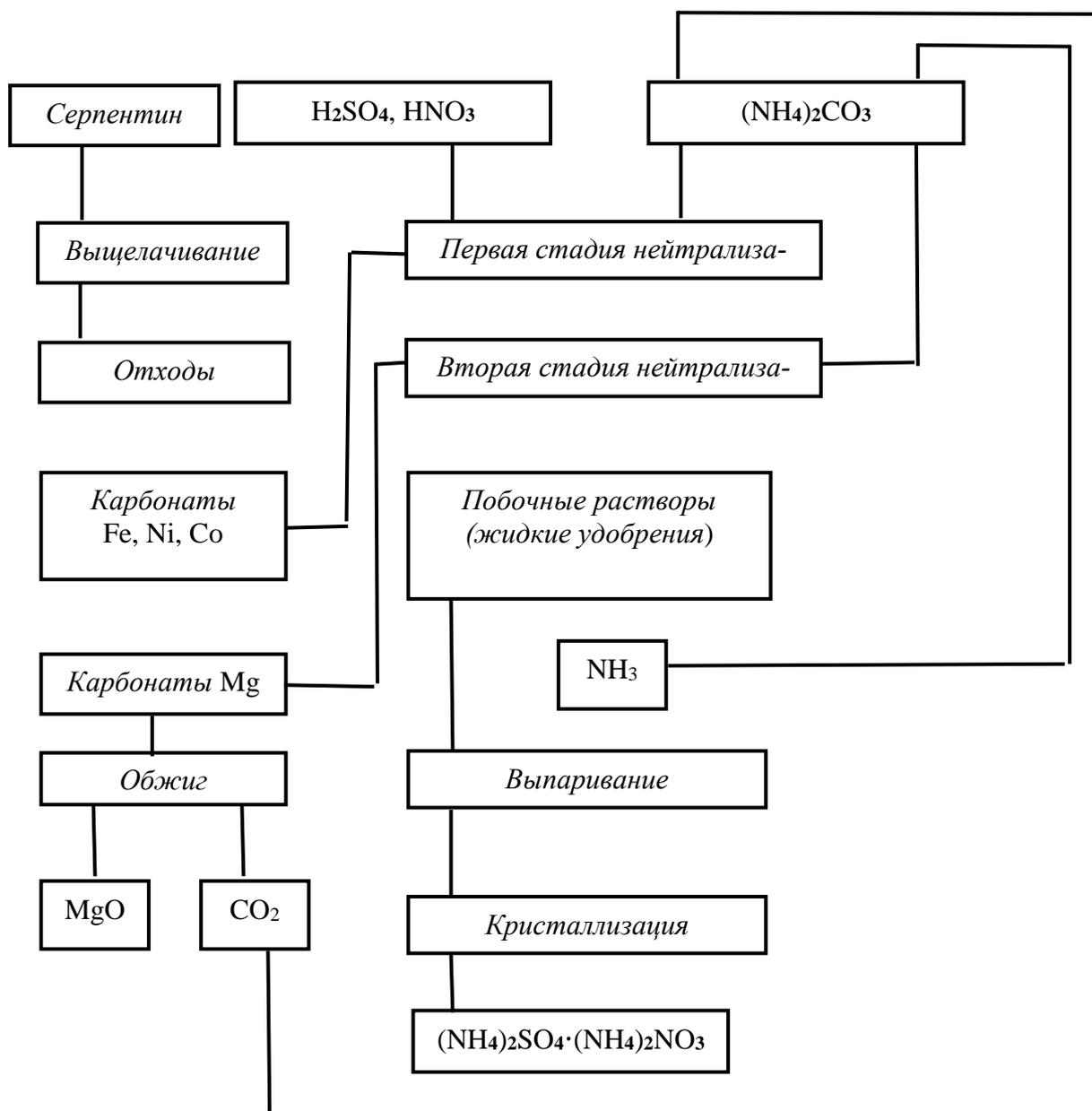


Рис. 4. Технологическая схема переработки серпентина  
 Fig. 4. Technological scheme of serpentine processing

серной или азотной кислотами, а в качестве осадителя полезных компонентов из маточного раствора рекомендуется 2н раствор карбоната аммония, изготовленного на водном растворе аммиака и углекислого газа из промышленного дыма. В рассматриваемом варианте из побочных растворов получают после соответствующей переработки удобрения (сульфата или нитрата аммония). Также предусматривается возвращение в цикл переработки аммиака, излишне расходуемого в процессе нейтрализации, что сокращает расход этого компонента. Нейтрализацию маточного раствора предполагается проводить избытком карбоната аммония. При этом из маточного раствора на первой стадии выпадают карбонаты железа, никеля и кобальта, а на второй – карбонат магния в объеме 50 – 70 %,

остальная часть остается в растворе в виде двойных магниевых-аммонийных солей. В случае избытка карбоната аммония в осадок выпадает до 98 % карбоната магния. Оставшиеся растворы являются высокоэффективным комплексным удобрением с необходимыми микрокомпонентами, которые возможно использовать в жидком виде или после соответствующего выпаривания и кристаллизации (в твердом виде).

#### Выводы

В рамках развития направления по обоснованию эффективности производства магниевых флюсов для конвертерной плавки из местного сырья проведены исследования показателей процесса кислотного выщелачивания оксида магния из отходов обогащения серпентин-

магнетитовых руд Абагурской аглофаборики. Определены закономерности влияния вида применяемых кислот, их концентрации, температуры пульпы и гранулометрического состава исходных отходов на степень извлечения оксида магния из указанных отходов, что послужило основанием для разработки технологической схемы комплексной переработки серпентин-магнетитовых руд, включающей в себя выщелачивание оксида магния из серпентина с последующей нейтрализацией маточного раствора и извлечением из него ценных компонентов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Zou Q., Hu J., Yang Sh., Wang H., Deng Ge. Investigation of the splashing characteristics of lead slag in side-blown bath melting process. *Energies*. 2023;16(2):1007.
- Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Чернятевич И.В., Чубин К.И., Чубина Е.А. Нетрадиционные технологии и фурменные устройства для нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера. *Сталь*. 2017;(6):15–20.
- Yang G., Li B., Sun M., Qin D., Zhong L. Numerical simulation of the slag splashing process in a 120 ton top-blown converter. *Metals*. 2023;13(5):940.
- Chen G.J., He S.P. Effect of MgO content in slag on dephosphorisation in converter steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*. 2015;42(6):433–438.
- Калиногорский А.Н., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В., Багрянцев В.И. Исследование особенностей применения вихревых технологий для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Сообщение 2. Характеристики и параметры движения капель шлака. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015;58(12):896–900.
- Chen L., Diao J., Wang G., Qiao Y., Xie B. Experimental study on slag splashing with modified vanadium slag. *Ironmaking and Steelmaking*. 2019;46(2):165–168.
- Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Протопопов Е.В., Михайлова Л.Ю. Теоретические основы и технология выплавки стального полупродукта в конвертерах и ДСП под магнезиальными шлаками. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(7):491–498.
- Zhang H., Yuan Zh., Mei L., Peng X., Liu K., Zhao H. The behavior of CO<sub>2</sub> supersonic jets in the converter slag-splashing process. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2022;8(4):1803–1815.
- Wang R.F., Zhang Bo., Liu Ch.Ju., Jiang M.Fa. Review on monitoring and prevention technologies of splashing induced by inappropriate slag foaming in BOF. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2023;30(9):1661–1674.
- Zhang H., Liu Ke., Zhao H., Tian Yu., Liang J., Yuan Zh. Numerical simulation of innovative slag splashing process in a converter using a nozzle-twisted oxygen lance. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2024;10(2):864–879.
- Qi F., Zhou Sh., Zhang L., Huo H., Liu Zh., Cheung Sh.C.P., Li B. Numerical study on droplet splashing behavior of slag-splashing for converter protection using volume of fluid-discrete phase model two-way conversion model. *Steel Research International*. 2024:202400289.  
<https://doi.org/10.1002/srin.202400289>
- Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В., Сигарев Е.Н. Новые технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014;57(6):7–12.
- Манашев И.Р., Степанова А.А. Практика применения магнезиальных флюсов в кислородно-конвертерном процессе на предприятиях России. *Теория и технология металлургического производства*. 2017;(4(23)):18–22.
- Смирнов Л.А., Ровнушкин В.А., Смирнов А.Л. Особенности формирования и фазово-минералогический состав конвертерных шлаков. *Металлы*. 2015;(2):26–34.
- Кожухов А.А. Исследование влияния вязкости и температуры плавления конвертерного шлака на его вспенивание. *Сталь*. 2014;(2):15–18.
- Zhang H., Yuan Zh., Zhao H., Zhao L., Kong D., Lu Yi. Thermodynamic simulation of slag-refractories interactions in innovative slag-splashing processes in converters. *Ironmaking and Steelmaking*. 2024;51(8).  
<https://doi.org/10.1177/03019233241262579>
- He L., Chen M. Study on slag splashing behavior in a 120 t converter based on physical and mathematical simulation. *Steel Research International*. 2023;94(12):202300227.  
<https://doi.org/10.1002/srin.202300227>
- Zhang H., Yuan Zh.Fu., Zhao H.X., Xu B.Sh., Liu Ke., Mei Lu., Ma Bo.W. Numerical simulation of co2 used for slag splashing process in converter. *Steel Research International*. 2023;94(10):202300025.  
<https://doi.org/10.1002/srin.202300025>
- Wang R., Zhang Bo., Hu Ch., Liu Ch., Jiang M. Study on splashing mechanism in basic oxygen furnace based on slag foaming modeling. *Steel Research International*. 2022;

93(1):202100318.

<https://doi.org/10.1002/srin.202100318>

20. Sinelnikov V., Szucki M., Merder T., Pieprzycza J., Kalisz D. Physical and numerical modeling of the slag splashing process. *Materials*. 2021;14(9):2289. <https://doi.org/10.3390/ma14092289>
  21. Очур-оол А.П., Манзырыкчы Х.Б., Зырянова В.Н. Кристаллическая структура минералов группы серпентина (хризотил-асбест). *Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки*. 2021;(4(86)):14–22.
  22. Орлов А.А., Аверина Г.Ф., Ульрих Д.В., Черных Т.Н. Исследование возможности получения жаростойких бетонов на основе серпентин-фосфатных композиций. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2022;(1(45)):71–78.
  23. Лихачева А.Ю., Горяинов С.В., Ращенко С.В., Сафонов О.Г. Особенности разложения серпентина в присутствии щелочных хлоридов: КР-исследование при высоком давлении и температуре. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2019;83(6):750–752.
- REFERENCES**
1. Zou Q., Hu J., Yang Sh., Wang H., Deng Ge. Investigation of the splashing characteristics of lead slag in side-blown bath melting process. *Energies*. 2023;16(2):1007.
  2. Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Chernyatevich I.V., Chubin K.I., Chubina E.A. Non-traditional technologies and tuyere devices for applying slag garnishing to the lining of the converter. *Stal'*. 2017;(6):15–20. (In Russ.).
  3. Yang G., Li B., Sun M., Qin D., Zhong L. Numerical simulation of the slag splashing process in a 120 ton top-blown converter. *Metals*. 2023;13(5):940.
  4. Chen G.J., He S.P. Effect of MgO content in slag on dephosphorisation in converter steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*. 2015;42(6):433–438.
  5. Kalinogorskii A.N., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Feiler S.V., Bagryantsev V.I. Investigation of the features of the application of vortex technologies for applying refractory coatings to the lining of converters. Message 2. Characteristics and parameters of movement of slag droplets. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2015;58(12):896–900. (In Russ.).
  6. Chen L., Diao J., Wang G., Qiao Y., Xie B. Experimental study on slag splashing with modified vanadium slag. *Ironmaking and Steelmaking*. 2019;46(2):165–168.
  7. Babenko A.A., Smirnov L.A., Protopopov E.V., Mikhailova L.Yu. Theoretical foundations and technology of smelting steel intermediates in converters and chipboard under magnesia slags. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2020;63(7):491–498. (In Russ.).
  8. Zhang H., Yuan Zh., Mei L., Peng X., Liu K., Zhao H. The behavior of CO<sub>2</sub> supersonic jets in the converter slag-splashing process. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2022;8(4):1803–1815.
  9. Wang R.F., Zhang Bo., Liu Ch.Ju., Jiang M.Fa. Review on monitoring and prevention technologies of splashing induced by inappropriate slag foaming in BOF. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2023;30(9):1661–1674.
  10. Zhang H., Liu Ke., Zhao H., Tian Yu., Liang J., Yuan Zh. Numerical simulation of innovative slag splashing process in a converter using a nozzle-twisted oxygen lance. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2024;10(2):864–879.
  11. Qi F., Zhou Sh., Zhang L., Huo H., Liu Zh., Cheung Sh.C.P., Li B. Numerical study on droplet splashing behavior of slag-splashing for converter protection using volume of fluid-discrete phase model two-way conversion model. *Steel Research International*. 2024:202400289. <https://doi.org/10.1002/srin.202400289>
  12. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Feiler S.V., Sigarev E.N. New technologies for applying slag garnishing to the lining of converters. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2014;57(6):7–12. (In Russ.).
  13. Manashev I.R., Stepanova A.A. The practice of using magnesia fluxes in the oxygen converter process at Russian enterprises. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2017;(4(23)):18–22. (In Russ.).
  14. Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Smirnov A.L. Features of formation and phase-mineralogical composition of converter slags. *Metally*. 2015;(2):26–34. (In Russ.).
  15. Kozhukhov A.A. Investigation of the effect of viscosity and melting point of converter slag on its foaming. *Stal'*. 2014;(2):15–18. (In Russ.).
  16. Zhang H., Yuan Zh., Zhao H., Zhao L., Kong D., Lu Yi. Thermodynamic simulation of slag-refractories interactions in innovative slag-splashing processes in converters. *Ironmaking and Steelmaking*. 2024;51(8). <https://doi.org/10.1177/03019233241262579>
  17. He L., Chen M. Study on slag splashing behavior in a 120 t converter based on physical and

mathematical simulation. *Steel Research International*. 2023;94(12):202300227.  
<https://doi.org/10.1002/srin.202300227>

18. Zhang H., Yuan Zh.Fu., Zhao H.X., Xu B.Sh., Liu Ke., Mei Lu., Ma Bo.W. Numerical simulation of co2 used for slag splashing process in converter. *Steel Research International*. 2023;94(10):202300025.  
<https://doi.org/10.1002/srin.202300025>
19. Wang R., Zhang Bo., Hu Ch., Liu Ch., Jiang M. Study on splashing mechanism in basic oxygen furnace based on slag foaming modeling. *Steel Research International*. 2022;93(1):202100318.  
<https://doi.org/10.1002/srin.202100318>
20. Sinelnikov V., Szucki M., Merder T., Pieprzyca J., Kalisz D. Physical and numerical modeling of the slag splashing process. *Materials*. 2021;14(9):2289.  
<https://doi.org/10.3390/ma14092289>
21. Ochur-ool A.P., Manzyrykchy Kh.B., Zyryanova V.N. Crystal structure of serpentine group minerals (chrysotile asbestos). *Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*. 2021;(4(86)):14–22. (In Russ.).
22. Orlov A.A., Averina G.F., Ul'rikh D.V., Chernykh T.N. Investigation of the possibility of obtaining heat-resistant concretes based on sulfur-pentene phosphate compositions. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*. 2022;(1(45)):71–78. (In Russ.).
23. Likhacheva A.Yu., Goryainov S.V., Rashchenko S.V., Safonov O.G. Features of serpentine decomposition in the presence of alkaline chlorides: a CD study at high pressure and temperature. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2019;83(6):750–752. (In Russ.).

#### Сведения об авторах

**Александр Александрович Уманский**, д.т.н., доцент, 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

**Евгений Валентинович Протопопов**, д.т.н., профессор, 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

**Полежаев Сергей Александрович**, магистрант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

#### Information about the authors

**Aleksandr A. Umanskii**, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., 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:** указать

**Evgenii V. Protopopov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., 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

**Sergey A. Polezhaev**, undergraduate student of the Department of Ferrous Metallurgy 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 10.10.2024  
После доработки 15.10.2024  
Принята к публикации 18.10.2024

Received 10.10.2024  
Revised 15.10.2024  
Accepted 18.10.2024

**Оригинальная статья**

УДК 669.58: 621.45.038.72

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-120-128

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В РАСПЛАВЕ ТЕХНИГАЛЬВА**

© 2024 г. О. С. Бондарева

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

**Аннотация.** При горячем цинковании так называемых «реактивных» сталей, содержащих около 0,1 % (по массе) кремния, наблюдается образование цинкового покрытия разной толщины и оттенка. Для контроля толщины цинкового покрытия на сталях широко используется технология Технигальва, представляющая собой микролегирование расплава цинка никелем в количестве 0,05 % (по массе). Несмотря на популярность рассматриваемой технологии, в некоторых случаях на поверхности покрытия образуются дефекты в виде налипших «крупинок». Целью настоящей работы было исследование структуры и фазового состава дефектов покрытия, образующихся в расплаве цинка с микродобавками никеля, а также анализ причин возникновения и поиск способов предотвращения их образования. Микроструктуру покрытия в области дефектов исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии. Показано, что качественное покрытие состоит из стандартных интерметаллических  $\Gamma$ -,  $\delta$ - и  $\zeta$ -фаз, покрытых твердым раствором цинка  $\eta$ -фазой. В области дефекта в  $\eta$ -фазе наблюдаются включения правильной геометрической формы, расположение и размеры которых говорят о том, что они налипают на покрытие в момент извлечения изделия из расплава. Идентификацию фазового состава включений проводили с помощью EDS (energy-dispersive X-ray spectroscopy) и EBSD (Electron backscatter diffraction) анализов. Установлено, что включения представляют собой  $\zeta$ -фазу (изоморфную  $\text{FeZn}_{13}$ ), содержащую около 0,8 % (по массе) никеля. Показано, что основными причинами образования дефекта «крупинки» является появление в расплаве плавающих частиц отхода-дросса, вызванных загрязнением расплава цинка железом, а также локальное превышение рекомендуемой концентрации никеля. Предложены способы предотвращения дефектов рассматриваемого вида при горячем цинковании.

**Ключевые слова:** горячее цинкование, цинковое покрытие, дросс, интерметаллид, Технигальва, система Fe – Zn – Ni, EDS-анализ, EBSD-анализ

**Для цитирования:** Бондарева О.С. Исследование структуры поверхностных дефектов цинкового покрытия, образующихся в расплаве Технигальва. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;(4(50)):120–128. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-120-128](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-120-128)

**Original article**

**STUDY OF THE STRUCTURE OF ZINC COATING SURFACE DEFECTS FORMED IN THE TECHNIGALVA MELT**

© 2024 O. S. Bondareva

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

**Abstract.** During hot-dip galvanizing of so-called "reactive" steels containing about 0.1 % (by weight) of silicon, the formation of a zinc coating is observed. To control the thickness of the zinc coating on steels, the Technigalva technology is widely used, which is the microalloying of the zinc melt with nickel in an amount of 0.05 % (by weight). Despite the popularity of the technology in question, in some cases defects form on the surface of the coating in the form of a stuck "grain". The purpose of this work was to study the structure and phase composition of zinc coating defects formed in a zinc melt with nickel microadditives, as well as to analyze the causes of their

occurrence and find ways to prevent their formation. The microstructure of the coating in the area of defects was studied using a scanning electron microscopy. It is shown that the high-quality coating consists of standard intermetallic  $\Gamma$ -,  $\delta$ - and  $\zeta$ -phases, coated with a solid zinc solution with the  $n$ -phase. In the area of the defect in the  $n$ -phase, inclusions of regular geometric shape are observed, the location and dimensions of which indicate that they adhere to the coating at the moment of attraction of the product from the melt. The identification of the phase composition of inclusions was carried out using EDS (energy-dispersive X-ray spectroscopy) and EBSD (Electron backscatter diffraction) analysis. It was found that the inclusions are a  $\zeta$ -phase (isomorphic to  $\text{FeZn}_{13}$ ), containing about 0.8% (by weight) nickel. It is shown that the main causes of the formation of the "grain" defect are the appearance of floating waste particles in the melt caused by contamination of the zinc melt with iron, as well as a local excess of the recommended nickel concentration. Methods of preventing defects of the considered type of species during hot galvanizing are proposed.

**Keywords:** Hot-dip galvanizing, zinc coating, dross, intermetallic compounds, Technigalva, Fe – Zn – Ni system, EDS-analysis, EBSD-analysis

**For citation:** Bondareva O.S. Study of the structure of zinc coating surface defects formed in the Technigalva melt. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;(4(50)):120–128. (In Russ.) [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-120-128](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-120-128)

### Введение

Особенности горячего цинкования кремний-содержащих сталей изучены довольно глубоко. Кремний, присутствующий в стали, оказывает значительное влияние на взаимную диффузию железа и цинка, определяет морфологию и толщину основных интерметаллических фаз покрытия [1]. Предложено несколько успешных способов контроля реактивности кремния при горячем цинковании [2]. Одним из таких способов является легирование цинкового расплава микродобавками никеля – процесс Technigalva. Он оказался эффективным для «реактивных» сталей, содержащих около 0,1 % (здесь и далее по массе) кремния, на которых цинковое покрытие имеет большую разнотолщинность [3; 4]. При использовании этой технологии микродобавка никеля в ванну от 0,05 до 0,06 % позволяет получать равномерную толщину покрытия на рассматриваемых сталях [5; 6]. Никель выступает диффузионным барьером и блокирует влияние кремния на толщину покрытия [7 – 9].

Разработчики технологии особое внимание уделяют верхнему пределу содержания никеля в ванне, показывая, что при содержании никеля более 0,06 % начинается интенсивное образование донного отхода-дросса, представляющего  $\text{Zn} - \text{Ni} - \text{Fe}$  интерметаллид ( $\Gamma_2$ -фазу). В этот отход уносится значительное количество никеля, так как его содержание в дрессе достигает 3 – 5 %. Есть данные о влиянии концентрации никеля в ванне цинкования на размеры частиц дросса. Отмечается, что по мере увеличения концентрации никеля выше 0,07 % форма дисперсной фазы меняется от удлиненных прямоугольных частиц до глобулярных полигональных частиц [10]. Изучены структура и химический состав интерметаллических фаз дросса, образу-

ющихся при температуре 450 °С в цинковых ваннах, содержащих 0 – 0,1% никеля, а также термодинамические условия их образования [11 – 13]. В работе [14] была построена подрешеточная модель  $\Gamma_2$ -фазы и предпринята попытка анализа области ее гомогенности. Хронология исследования тройной системы  $\text{Zn} - \text{Ni} - \text{Fe}$  наиболее полно представлена в работе [15].

Для учета влияния кремния, содержащегося в стали, на фазовые превращения, происходящие при образовании покрытия, были предприняты попытки построения изотермического разреза четвертичной фазовой диаграммы  $\text{Zn} - \text{Fe} - \text{Ni} - \text{Si}$  при температуре 450 °С с 93 % (атом.) Zn. Четвертичное соединение не было установлено, но были уточнены области гомогенности основных фаз [16]. Следует отметить, что практически все легирующие элементы цинкового расплава, формирующие интерметаллиды с железом, участвуют в образовании дросса [17; 18]. При многокомпонентной системе механизмы образования дросса усложняются, небольшие частицы дросса могут не оседать на дно, поэтому требуется уточнение предельных концентраций легирующих элементов в ваннах цинкования [19 – 21].

На сегодняшний день рекомендация по предельному содержанию никеля в цинковой ванне базируется на тройной диаграмме  $\text{Zn} - \text{Ni} - \text{Fe}$  как точка равновесия жидкости,  $\zeta$ - и  $\Gamma_2$ -фаз, которая составляет 0,06 % [22]. При содержании никеля в ванне менее 0,05 % на покрытии часто образуются дефекты в виде налипших «крупинок», которые могут представлять собой частицы дросса, не осевшие на дно ванны [23].

Целью настоящей работы было исследование структуры и фазового состава дефектов цинкового покрытия в виде «крупинки», образующихся в расплаве цинка с микродобавками никеля, а

также анализ причин возникновения и поиск способов предотвращения рассматриваемого дефекта.

### Методы исследования и оборудование

Для исследования были отобраны образцы изделий из стали марки СтЗпс с содержанием кремния 0,12 %, оцинкованные в расплаве Технигальва Zn – 0,05 % Ni, с дефектами покрытия в виде «крупинки». Перед цинкованием сталь обезжировали в 20 %-ом растворе NaOH, травили в 10 %-ом растворе HCl, флюсовали в растворе соли ZnCl<sub>2</sub>/NH<sub>4</sub>Cl и сушили при температуре 100 °С. Цинковый расплав был легирован с помощью никелевых таблеток, содержащих никелевый порошок, специальный флюс, способствующий растворению оксидной пленки, и специальный воск, воспламеняющийся при контакте с расплавом и обеспечивающий локальное повышение температуры [24; 25]. Химический состав ванны определялся на оптикоэмиссионном анализаторе Foundry-Master XPR по результатам измерений пяти проб расплава. Уточнено, что расплав цинка в ванне содержал 0,045 % никеля. Горячее цинкование проводили при стандартной температуре 450 °С и времени погружения 4 мин.

Для выявления микроструктуры были изготовлены шлифы, которые травили 4 %-ым раствором HNO<sub>3</sub> в спирте. Структуру покрытия исследовали на сканирующем электронном микроскопе TESCAN LYRA 3 GMH с системой EBSD AZtecHKL и EDS-детектором энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа INCAx-act. Для EBSD анализа шлифы подвергали ионной полировке на установке LINDA SEMPrep 2. Тип кристаллической решетки определяли методом дифракции отраженных элек-

тронов (EBSD), заключающемся в расшифровке картин Кикучи (ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 0,5 нА, угол наклона образца 70°, время экспозиции 1 с/кадр). Полученную с образца информацию сравнивали со встроенными базами данных для идентификации фаз. Метод дифракции отраженных электронов (EBSD-анализ) успешно используется для идентификации фаз и включений в различных многокомпонентных системах [26].

### Обсуждение результатов

Исследования показали, что дефект «крупинки» на покрытии расположен только на той стороне изделия, которая обращена вверх при подъеме изделия из расплава. Этот факт позволяет предположить, что в расплаве присутствуют плавающие частицы, которые могут налипать на покрытие при извлечении. Для подтверждения этой версии исследовали микроструктуру покрытия в поперечном сечении.

Установлено, что цинковое покрытие без дефекта «крупинки» состоит из основных железо-цинковых фаз, обычно образующихся при температуре цинкования 450 °С (Γ-фаза в виде тонкой темной полосы на границе со стальной основой; плотная δ-фаза; разветвленная ζ-фаза) [27]. Интерметаллические слои покрыты цинком – η-фазой, которая выравнивает толщину покрытия за счет поверхностного натяжения жидкого металла. Толщина слоя составляет около 100 мкм (рис. 1, а). Толщина покрытия в области дефекта «крупинки» достигает 400 – 500 мкм. В микроструктуре покрытия наблюдаются все основные фазы. Однако сверху ζ-фазы расположен наплыв, представляющий собой η-фазу с включениями правильной геометрической формы (рис. 1, б).

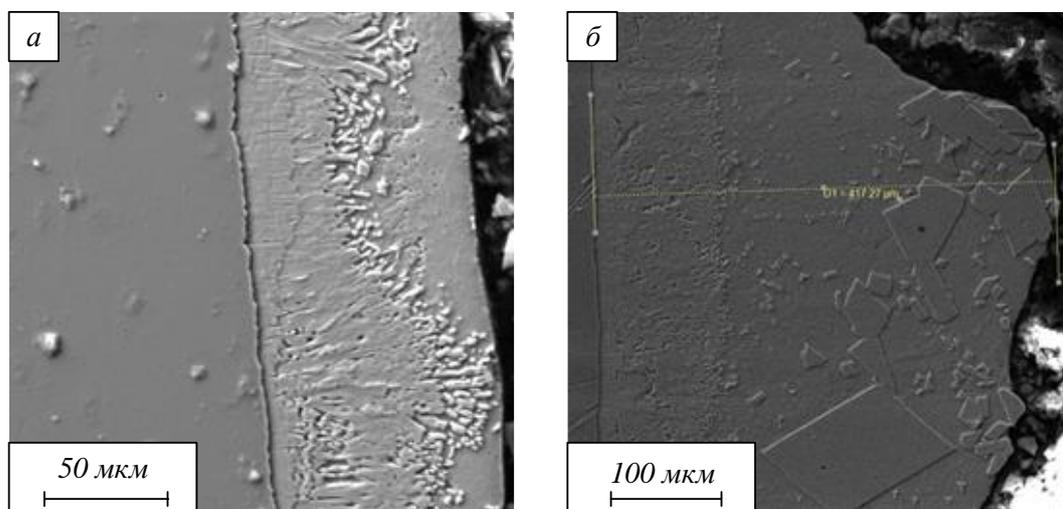


Рис. 1. СЭМ-фотография структуры цинкового покрытия без дефектов (а) и с дефектом «крупинка» (б)  
Fig. 1. SEM photograph of the structure of zinc coating without defects (a) and with a «grain» defect (б)

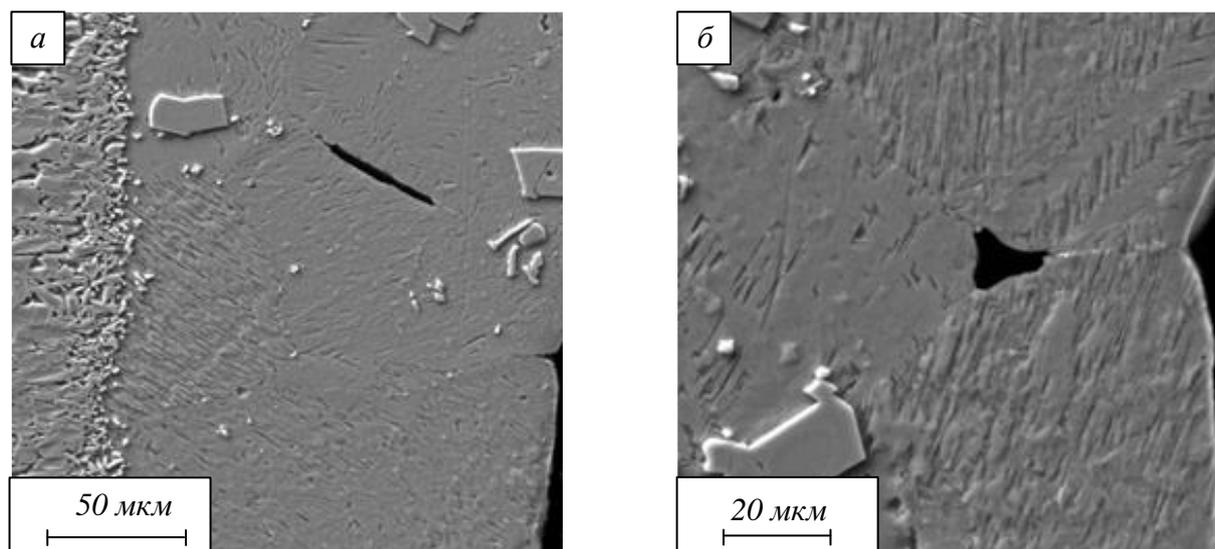


Рис. 2. Микроструктура  $\eta$ -фазы с усадочными порами  
 Fig. 2. Microstructure of the  $\eta$ -phase with shrinkage pores

В местах напыла хорошо видны границы зерен  $\eta$ -фазы, имеющей равноосную структуру (рис. 2). Это указывает на то, что поверхностный слой покрытия формируется в условиях сравнительно медленного охлаждения. Размеры зерна  $\eta$ -фазы составляют от 60 до 150 мкм. В покрытии наблюдаются единичные усадочные поры, расположенные по границам зерен размерами до 50 мкм (рис. 2, а) или в месте соединения трех зерен размерами  $15 \times 15$  мкм (рис. 2, б). Размеры включений в  $\eta$ -фазе составляют от 5 до 400 мкм. Они расположены обособленно от интерметаллических фаз и со всех сторон окружены  $\eta$ -фазой. Такой размер кристаллитов говорит о том, что они зарождаются и растут в расплаве цинка, а не при кристаллизации покрытия. Во время извлечения стальных изделий из расплава частицы налипают на формирующееся покрытие, вокруг частиц за счет поверхностного натяжения расплава образуется локальное утолщение  $\eta$ -фазы.

Карты распределения примесных элементов цинкового расплава (железа и никеля) в поперечном сечении цинкового покрытия показаны на рис. 3.

Распределение железа в покрытии визуализируется контрастно. В  $\eta$ -фазе железо практически отсутствует, в кристаллитах включений его количество сопоставимо с интерметаллическими слоями покрытия.

Карта распределения никеля не так контрастна, тем не менее, очевидно, что никель активно диффундирует во все слои покрытия и участвует в формировании всех фаз. Результаты количественного рентгеноспектрального микроанализа представлены на рис. 4.

Установлено, что при концентрации никеля в расплаве 0,045 % содержание его в  $\zeta$ -фазе покрытия на порядок больше (до 0,45 %), а в кристаллитах налипших включений концентрация никеля достигает 0,8 %, содержание железа 4,11 – 5,78 %, остальное цинк. Концентрация никеля в  $\delta$ - и  $\eta$ -фазах находится в том же диапазоне, что и в цинковом расплаве (около 0,05 %).

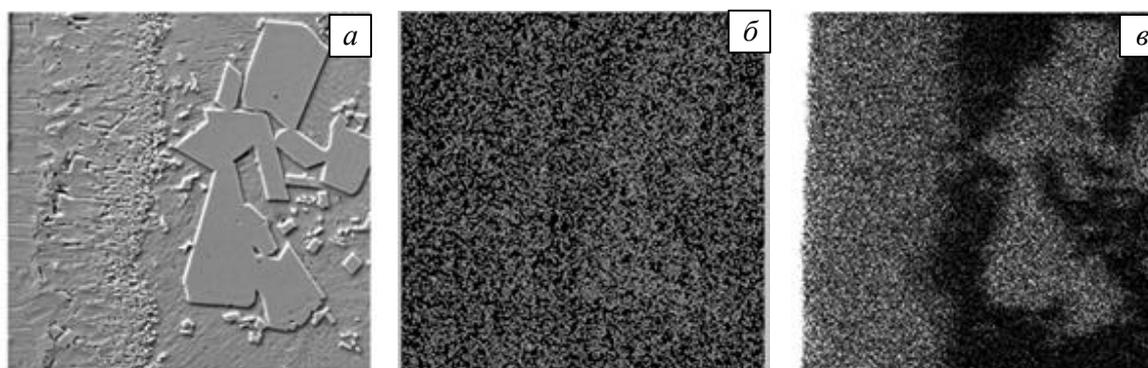


Рис. 3. Результаты картирования в поперечном сечении дефектной области покрытия:  
 а – электронное изображение; б и в – распределение никеля и железа  
 Fig. 3. Results of mapping in the cross-section of the defective area of the coating:  
 а – electron image; б and в – nickel and distribution iron

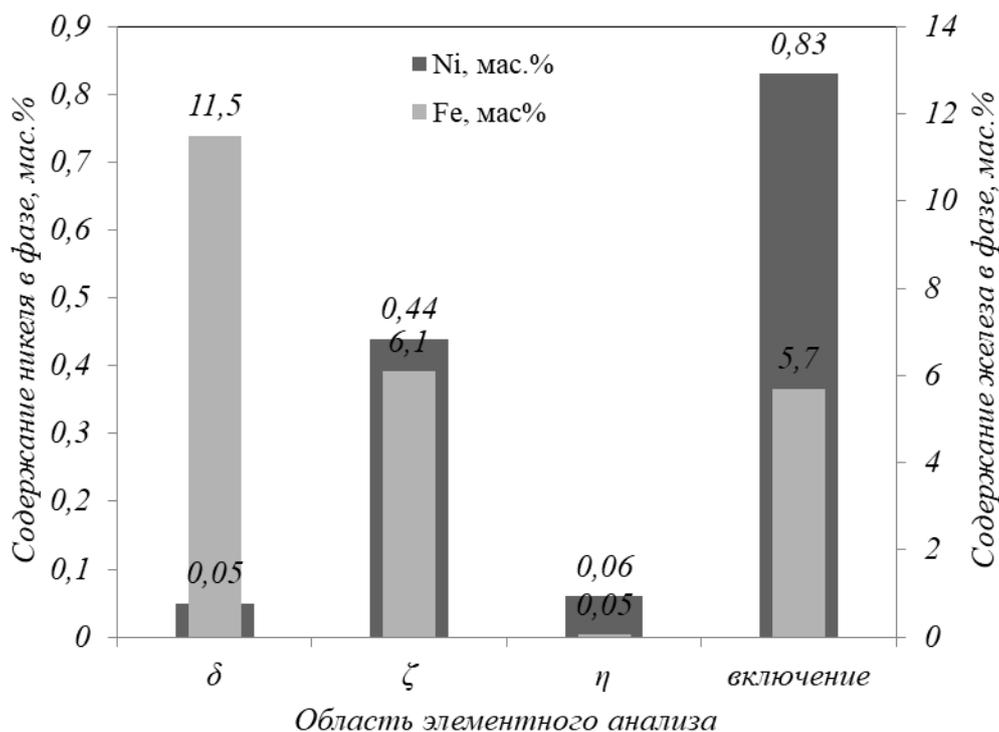


Рис. 4. Содержание никеля и железа в фазах покрытия по данным EDS-анализа  
 Fig. 4. Nickel and iron content in the coating phases according to EDS analysis

Скачок концентрации никеля до 0,8 % во включении по сравнению с содержанием (0,045 %) никеля в расплаве говорит об образовании трехкомпонентной Fe – Ni – Zn фазы. С целью идентификации новой фазы проводили EBSD-анализ. Картины дифракции электронов (картины Кикучи) позволяют установить структурный тип отдельных зерен покрытия. Согласно полученным результатам совпадение картин Кикучи (девять полос с малым средним угловым отклонением 0,76) говорит о соответствии структурного типа  $\zeta$ -фазе интерметаллиду  $FeZn_{13}$  с моноклинной

кристаллической решеткой, в которой 0,4 – 0,8 % железа замещены никелем (рис. 5).

Известно, что на выпадение вторичных фаз в расплаве существенное влияние оказывает присутствие в нем железа, которым загрязняется в процессе нанесения покрытия. В расплаве цинка без легирующих элементов донный дросс интенсивно образуется при концентрации железа более 4,7 % (атом.) [28]. Анализ изотермического сечения тройной диаграммы Fe – Zn – Ni при температуре 450 °С показал, что  $\zeta$ -фаза (изоморфная  $FeZn_{13}$ ) кристаллизуется из расплава

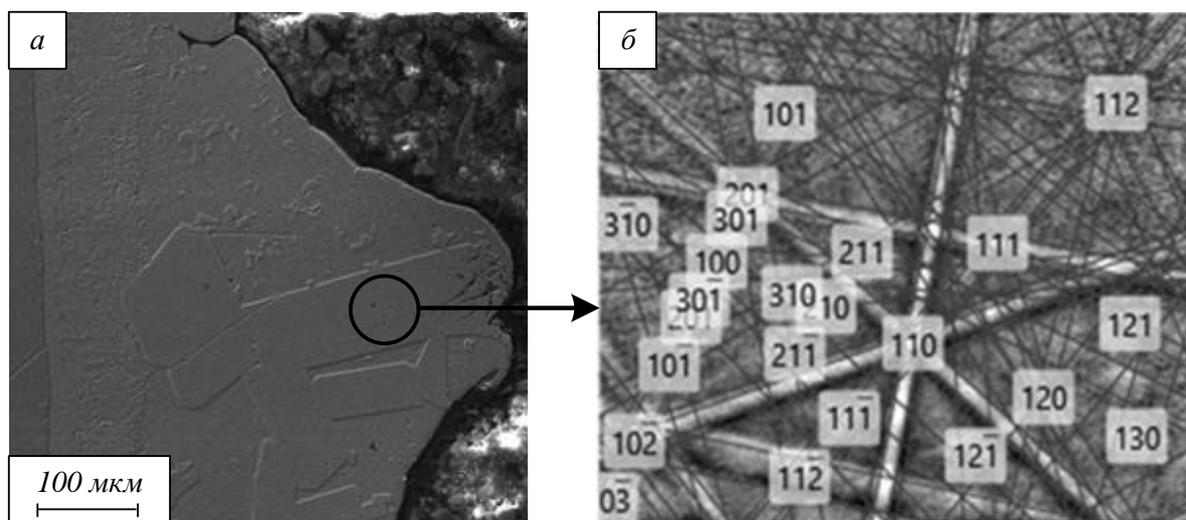


Рис. 5. СЭМ-изображение поперечного сечения Zn + 0,05 % Ni покрытия с дефектом «крупинка» на стали марки Ст3сп (а), картины Кикучи с наложенными симуляциями решения в области дефекта (б)

Fig. 5. SEM image of the cross-section of Zn + 0.05 % Ni coating with a “grain” defect on St3sp steel (a), Kikuchi patterns with superimposed simulations of the solution from the defect area (b)

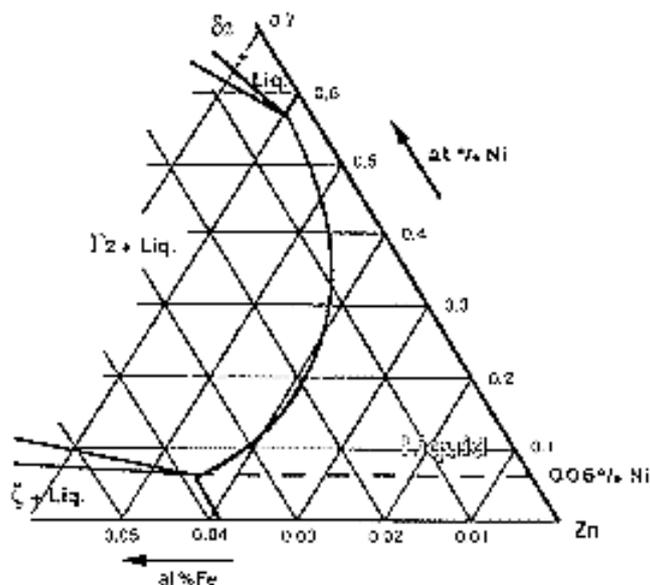


Рис. 6. Угол диаграммы системы Fe – Zn – Ni при температуре 450 °С [22]  
 Fig. 6. The angle of the Fe – Zn – Ni system diagram at temperature at 450 °С [22]

цинка при температуре 450 °С, если содержание никеля в расплаве составляет 0,045 % (атом.), а содержание железа – более 0,04 % (атом.) (рис. 6). Использование микродобавок никеля ужесточает требования к контролю загрязнения расплава железом.

Если никель вводится в расплав в виде порошка или порошковой лигатуры, то возможно локальное перенасыщение никелем области вокруг каждой частицы никеля. Следовательно, она может являться центром начала кристаллизации частиц Ni – Zn – Fe дросса. Известно, что ζ-фаза образуется в ванне с содержанием никеля менее 0,06 %. При содержании никеля в ванне более 0,09 % интерметаллическая фаза дросса в основном представляет собой Γ<sub>2</sub>-фазу. В ваннах, содержащих 0,06 – 0,09 % никеля, присутствуют как ζ-фаза, так и Γ<sub>2</sub>-фаза [29 – 31].

Предложено кратковременно повысить температуру расплава для растворения плавающих в расплаве интерметаллидов. Диссоциация Ni – Zn – Fe дросса происходит при нагреве выше 480 °С. В производственных условиях повышение температуры расплава до 480 °С с перемешиванием и выдержкой в течение 60 мин позволило усреднить его химический состав. В результате рассматриваемый дефект был устранен.

### Выводы

Исследование структуры дефекта цинкового покрытия «крупинки» показало, что он состоит из покрывного цинка (η-фаза) с налипшими включениями (5 – 400 мкм) кристаллов правильной геометрической формы, которые со всех сторон окружены η-фазой.

Комплексный EDS + EBSD анализ позволил идентифицировать интерметаллические вклю-

чения ζ-фазы, содержащей около 0,8 % никеля, 4,11 – 5,78 % железа, остальное цинк, соответствующую интерметаллиду FeZn<sub>13</sub> с моноклинной кристаллической решеткой.

Основными причинами образования кристаллитов в расплаве являются загрязнение расплава цинка железом (более 0,04 %), локальное превышение концентрации никеля (более 0,06 %), а также неравномерное распределение порошка никеля в расплаве.

Для предотвращения дефекта покрытия «крупинки» рекомендуется следить за содержанием железа в расплаве, регулярно проводить очистку ванны от донного дросса, а также добиваться максимально равномерной концентрации никеля по объему ванны с помощью выдерживания расплава при повышенной (480 °С) температуре с перемешиванием.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Che C. et al. Role of silicon in steels on galvanized coatings. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2009;22(2):138–145. [https://doi.org/10.1016/S1006-7191\(08\)60081-2](https://doi.org/10.1016/S1006-7191(08)60081-2)
2. Tang N.-Y. Control of Silicon Reactivity in General Galvanizing. *J. Phys Equil and Diff.* 2008;29(4):337–344. <https://doi.org/10.1007/s11669-008-9321-0>
3. Kong G. et al. Review on progress of technological. *Chinese Journal of Chemical Physics*. 2001;13:223–225.
4. Kania H. et al. Development of Bath Chemical Composition for Batch Hot-Dip Galvanizing – A Review. *Materials*. 2020;13(18):4168. <https://doi.org/10.3390/ma13184168>

5. Lewis G.P., Pedersen J.G. *Optimizing The Nickel-Zinc Process for Hot Dip Galvanizing*. 2000:8.
6. He Z.-R. et al. Comparative on microstructure and properties of Zn and Zn-0.05Ni alloy coatings by hot-tip galvanizing. *Cailiao Rechuli Xuebao/Transactions of Materials and Heat Treatment*. 2013;34:152–156.
7. Shibli S.M.A., Manu R., Dilimon V.S. Effect of nickel-rich barrier layer on improvement of hot-dip zinc coating. *Applied Surface Science*. 2005;245(1-4):179–185. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.10.007>
8. Lee H.-J., Kim J.-S. Effect of Ni addition in zinc bath on formation of inhibition layer during galvannealing of hot-dip galvanized sheet steels. *Journal of Materials Science Letters*. 2001;20(10):955–957. <https://doi.org/10.1023/A:1010953505679>
9. Bondareva O.S., Rosenstein E.O., Dobychnina O.S. Effect of a 0.05 % Nickel Addition to Zinc Melt on the Mutual Diffusion Coefficient of Iron and Zinc in the Formation of a Zinc Coating. *J. Surf. Investig.* 2023;17(6):1282–1286. <https://doi.org/10.1134/S102745102306006X>
10. 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>
11. Chen W. Dross Phases Formed in Galvanizing Baths Containing (0-0.1 wt%, Nickel at 450°C. *ISIJ International*. 1993;33:307–312.
12. Perrot P., Reumont G. Thermodynamic description of dross formation when galvanizing silicon steels in zinc-nickel baths. *JPE*. 1994;15(5):479–482. <https://doi.org/10.1007/BF02649398>
13. Tang N.-Y. An alternative description of dross formation when galvanizing silicon steels in zinc-nickel baths. *JPE*. 1995;16(2):110–112. <https://doi.org/10.1007/BF02664847>
14. Tang N.-Y., Su X., Toguri J.M. Experimental study and thermodynamic assessment of the Zn – Fe – Ni system. *Calphad*. 2001;25(2):267–277. [https://doi.org/10.1016/S0364-5916\(01\)00048-7](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(01)00048-7)
15. Bochvar N., Rokhlin L. Iron – Nickel – Zinc. *Springer Materials*. 2009;337–351. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-70890-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-540-70890-2_17)
16. Xuping Su et al. The zinc-rich corner of the Zn-Fe-Ni-Si quaternary system at 450 °C. *Journal of Phase Equilibria*. 2002;23(5):424–431. <https://doi.org/10.1361/105497102770331370>
17. Khaliq A. et al. Iron Intermetallic Compounds (IMCs) Formation Mechanism in the Molten Aluminium Zinc (Al-Zn) Coating Alloy. *Teh. vjesn.* 2024;31(2):460–465. <https://doi.org/10.17559/TV-20230523000660>
18. Konishi T. et al. Structural and Mechanical Characterizations of Top Dross in a Molten Zinc Bath. *ISIJ Int.* 2021;61(3):937–944. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJIN T-2020-487>
19. Chu R. et al. Fundamental research on recovering metals from hot-dip Zn – Al – Mg dross by supergravity separation. *J. Iron Steel Res. Int.* 2023;30(7):1324–1333. <https://doi.org/10.1007/s42243-023-00989-3>
20. Liu Q. et al. Hot-Dip Galvanizing Process and the Influence of Metallic Elements on Composite Coatings. *J. Compos. Sci.* 2024;8(5):160. <https://doi.org/10.3390/jcs8050160>
21. Bellini C. et al. Bath chemical composition influence on intermetallic phases damage in hot dip galvanizing. *Procedia Structural Integrity*. 2022;39:574–581. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.03.131>
22. Reumont G., Perrot P., Foct J. Fractal evaluation of liquidus in the Fe-Zn-Ni system at 450 C. *J Mater Sci Lett.* 1992;11(23):1611–1613. <https://doi.org/10.1007/BF00740849>
23. Marder A.R., Goodwin F.E. Defect identification and remediation in zinc coated steel sheet. *The Metallurgy of Zinc Coated Steels. Elsevier*. 2023:507–541. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99984-7.00001-4>
24. Пат. 2647066 С1 USA Таблетка для горячего цинкования металлических изделий (варианты) способ ее подготовки / Я.М. Туровский, А.М. Туровский; опубл. 13.03.2018; бюл. № 8.
25. Bondareva O.S., Turovsky A.M., Turovsky Y.M. Application of Nickel Tablets in Hot-Dip Galvanizing for Silicon and Phosphorus Steel Reactivity Control. *MSF*. 2020;992:689–694. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.689>
26. Ånes H. Characterizing minor phases in engineering alloys with averaging and dictionary indexing of EBSD patterns. In: *Proceedings of the European Microscopy Congress 2020. Royal Microscopical Society*. 2021. <https://doi.org/10.22443/rms.emc2020.1441>
27. Han K. et al. Experimental determination of phase diagram in the Zn – Fe binary system. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;737:490–504. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.320>
28. Reumont G., Perrot P., Foct J. Thermodynamic study of the galvanizing process in a Zn – 0.1 % Ni bath. *Journal of materials science*. 1998;33:4759–4768.
29. Reumont G., De Figueiredo R.S., Foct J. Structural comparison between the  $\Gamma_2$ -FeZn<sub>4</sub> compound obtained by mechanical alloying and the

- $\Gamma_2 - \text{Fe}_6\text{Ni}_5\text{Zn}_{89}$  galvanizing dross. *Journal of Materials Science Letters*. 1999;18(22):1879–1882.  
<https://doi.org/10.1023/A:1006628112732>
30. Bondareva O.S. et al. EDS + EBSD Phase Analysis of the Zinc Coating Formed on Steel in a Melt with Nickel Microadditives. *J. Surf. Investig.* 2022;16(6):1069–1073.  
<https://doi.org/10.1134/S1027451022060064>
31. Su X., Tang N.-Y., Toguri J.M. Thermodynamic evaluation of the Fe – Zn system. *Journal of Alloys and Compounds*. 2001;325(1-2):129–136. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)01273-7](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01273-7)
- ### REFERENCES
- Che C. et al. Role of silicon in steels on galvanized coatings. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2009;22(2):138–145.  
[https://doi.org/10.1016/S1006-7191\(08\)60081-2](https://doi.org/10.1016/S1006-7191(08)60081-2)
  - Tang N.-Y. Control of Silicon Reactivity in General Galvanizing. *J. Phs Eqil and Diff.* 2008;29(4):337–344.  
<https://doi.org/10.1007/s11669-008-9321-0>
  - Kong G. et al. Review on progress of technigalva. *Chinese Journal of Chemical Physics*. 2001;13:223–225.
  - Kania H. et al. Development of Bath Chemical Composition for Batch Hot-Dip Galvanizing – A Review. *Materials*. 2020;13(18):4168.  
<https://doi.org/10.3390/ma13184168>
  - Lewis G.P., Pedersen J.G. *Optimizing The Nickel-Zinc Process for Hot Dip Galvanizing*. 2000:8.
  - He Z.-R. et al. Comparative on microstructure and properties of Zn and Zn-0.05Ni alloy coatings by hot-tip galvanizing. *Cailiao Rechuli Xuebao/Transactions of Materials and Heat Treatment*. 2013;34:152–156.
  - Shibli S.M.A., Manu R., Dilimon V.S. Effect of nickel-rich barrier layer on improvement of hot-dip zinc coating. *Applied Surface Science*. 2005;245(1-4):179–185.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.10.007>
  - Lee H.-J., Kim J.-S. Effect of Ni addition in zinc bath on formation of inhibition layer during galvannealing of hot-dip galvanized sheet steels. *Journal of Materials Science Letters*. 2001;20(10):955–957.  
<https://doi.org/10.1023/A:1010953505679>
  - Bondareva O.S., Rosenstein E.O., Dobychnina O.S. Effect of a 0.05 % Nickel Addition to Zinc Melt on the Mutual Diffusion Coefficient of Iron and Zinc in the Formation of a Zinc Coating. *J. Surf. Investig.* 2023;17(6):1282–1286.  
<https://doi.org/10.1134/S102745102306006X>
  - 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>
  - Chen W. Dross Phases Formed in Galvanizing Baths Containing (0-0.1 wt%/, Nickel at 450°C. *ISIJ International*. 1993;33:307–312.
  - Perrot P., Reumont G. Thermodynamic description of dross formation when galvanizing silicon steels in zinc-nickel baths. *JPE*. 1994;15(5):479–482.  
<https://doi.org/10.1007/BF02649398>
  - Tang N.-Y. An alternative description of dross formation when galvanizing silicon steels in zinc-nickel baths. *JPE*. 1995;16(2):110–112.  
<https://doi.org/10.1007/BF02664847>
  - Tang N.-Y., Su X., Toguri J.M. Experimental study and thermodynamic assessment of the Zn – Fe – Ni system. *Calphad*. 2001;25(2):267–277.  
[https://doi.org/10.1016/S0364-5916\(01\)00048-7](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(01)00048-7)
  - Bochvar N., Rokhlin L. Iron – Nickel – Zinc. *Springer Materials*. 2009;337–351.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-540-70890-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-540-70890-2_17)
  - Xuping Su et al. The zinc-rich corner of the Zn-Fe-Ni-Si quaternary system at 450 °C. *Journal of Phase Equilibria*. 2002;23(5):424–431.  
<https://doi.org/10.1361/105497102770331370>
  - Khaliq A. et al. Iron Intermetallic Compounds (IMCs) Formation Mechanism in the Molten Aluminium Zinc (Al-Zn) Coating Alloy. *Teh. vjesn.* 2024;31(2):460–465.  
<https://doi.org/10.17559/TV-20230523000660>
  - Konishi T. et al. Structural and Mechanical Characterizations of Top Dross in a Molten Zinc Bath. *ISIJ Int.* 2021;61(3):937–944.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJIN T-2020-487>
  - Chu R. et al. Fundamental research on recovering metals from hot-dip Zn – Al – Mg dross by supergravity separation. *J. Iron Steel Res. Int.* 2023;30(7):1324–1333.  
<https://doi.org/10.1007/s42243-023-00989-3>
  - Liu Q. et al. Hot-Dip Galvanizing Process and the Influence of Metallic Elements on Composite Coatings. *J. Compos. Sci.* 2024;8(5):160.  
<https://doi.org/10.3390/jcs8050160>
  - Bellini C. et al. Bath chemical composition influence on intermetallic phases damage in hot dip galvanizing. *Procedia Structural Integrity*. 2022;39:574–581.  
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.03.131>
  - Reumont G., Perrot P., Foct J. Fractal evaluation of liquidus in the Fe-Zn-Ni system at 450 C. *J Mater Sci Lett*. 1992;11(23):1611–1613.  
<https://doi.org/10.1007/BF00740849>
  - Marder A.R., Goodwin F.E. Defect identification and remediation in zinc coated steel sheet.

- The Metallurgy of Zinc Coated Steels. Elsevier.* 2023:507–541. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99984-7.00001-4>
24. Pat. 2647066 C1 USA. Tablet for hot dip galvanization of metal products (variants) and method of its preparation. Y.M. Turovskij, A.M. Turovsky; Date of publication: 13.03.2018. *Bulleten izobretanii*;8.
  25. Bondareva O.S., Turovsky A.M., Turovsky Y.M. Application of Nickel Tablets in Hot-Dip Galvanizing for Silicon and Phosphorus Steel Reactivity Control. *MSF.* 2020;992:689–694. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.689>
  26. Ånes H. Characterizing minor phases in engineering alloys with averaging and dictionary indexing of EBSD patterns. In: *Proceedings of the European Microscopy Congress 2020. Royal Microscopical Society.* 2021. <https://doi.org/10.22443/rms.emc2020.1441>
  27. Han K. et al. Experimental determination of phase diagram in the Zn – Fe binary system. *Journal of Alloys and Compounds.* 2018;737:490–504. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.320>
  28. Reumont G., Perrot P., Focit J. Thermodynamic study of the galvanizing process in a Zn – 0.1 % Ni bath. 1998. *Journal of materials science.* 1998;33:4759–4768.
  29. Reumont G., De Figueiredo R.S., Focit J. Structural comparison between the  $\Gamma_2$ -FeZn<sub>4</sub> compound obtained by mechanical alloying and the  $\Gamma_2$  – Fe<sub>6</sub>Ni<sub>5</sub>Zn<sub>89</sub> galvanizing dross. *Journal of Materials Science Letters.* 1999;18(22):1879–1882. <https://doi.org/10.1023/A:1006628112732>
  30. Bondareva O.S. et al. EDS + EBSD Phase Analysis of the Zinc Coating Formed on Steel in a Melt with Nickel Microadditives. *J. Surf. Investig.* 2022;16(6):1069–1073. <https://doi.org/10.1134/S1027451022060064>
  31. Su X., Tang N.-Y., Toguri J.M. Thermodynamic evaluation of the Fe – Zn system. *Journal of Alloys and Compounds.* 2001;325 (1-2):129–136. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(01\)01273-7](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(01)01273-7)

**Сведения об авторах**

**Ольга Сергеевна Бондарева**, к.т.н., доцент кафедры технологий 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 19.09.2024

После доработки 05.11.2024

Принята к публикации 08.11.2024

Received 19.09.2024

Revised 05.11.2024

Accepted 08.11.2024

**Оригинальная статья**

УДК 669.017:539.531:536.425

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-129-136

**СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА AlCrFeCoNi, ОБЛУЧЕННОГО ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

© 2024 г. Л. П. Башенко<sup>1</sup>, М. О. Ефимов<sup>1</sup>, Ю. А. Шлярова<sup>1</sup>, В. Е. Громов<sup>1</sup>,  
С. В. Коновалов<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

**Аннотация.** Методом проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM) изготовлены объемные образцы высокоэнтропийного сплава нестехиометрического состава. В работе методами современного физического материаловедения выполнен анализ элементного и фазового составов, дефектной субструктуры и трибологических свойств поверхностного слоя ВЭС, сформированного в результате облучения импульсным электронным пучком с разной плотностью энергии пучка электронов (10 – 30 Дж/см<sup>2</sup>) в среде аргона. Показано, что облучение не зависит от плотности энергии пучка электронов и приводит к фрагментации поверхности сеткой микротрещин, что свидетельствует о повышенной хрупкости исследуемого сплава. Отмечена гомогенизация сплава и формирование субмикро- и нанокристаллической структуры. Толщина модифицированного слоя увеличивается от 0,8 до 20 мкм при увеличении плотности энергии пучка электронов от 10 до 30 Дж/см<sup>2</sup>. Установлена корреляция изменения нанотвердости и модуля упругости с результатами по измерению микротвердости. Коррелированное уменьшение микро- и нанотвердости и модуля Юнга свидетельствует о релаксации внутренних полей напряжений, сформированных при изготовлении сплава. Обработка электронным пучком незначительно влияет на трибологические свойства, но значительно увеличивает прочность и пластичность материала. Наибольшее значение предела прочности на сжатие 2179 МПа получено в сплаве, обработанном электронным пучком с плотностью энергии 30 Дж/см<sup>2</sup>. Условный предел текучести на сжатие при этом составил 522 МПа, а модуль Юнга 257 ГПа.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийный сплав, электронный пучок, облучение, структура, свойства, фазовый состав

**Для цитирования:** Башенко Л.П., Ефимов М.О., Шлярова Ю.А., Громов В.Е., Коновалов С.В. Структура, фазовый состав и свойства высокоэнтропийного сплава AlCrFeCoNi, облученного импульсным электронным пучком. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;(4(50)):129–136. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-129-136](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-129-136)

**Original article**

**STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND PROPERTIES OF HIGH-ENTROPY AlCrFeCoNi ALLOY IRRADIATED WITH A PULSED ELECTRON BEAM**

© 2024 L. P. Bashchenko<sup>1</sup>, M. O. Efimov<sup>1</sup>, Yu. A. Shlyarova<sup>1</sup>, V. E. Gromov<sup>1</sup>,  
S. V. Kononov<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Samara National Research University (34 Moskovskoe route, Samara, 443086, Russian Federation)

**Abstract.** Volumetric samples of a high-entropy alloy of nonstoichiometric composition were produced by the method of wire-arc additive manufacturing (WAAM). In this work, the methods of modern physical materials science

have been used to analyze the elemental and phase compositions, defective substructure and tribological properties of the HEA surface layer formed as a result of irradiation with a pulsed electron beam with different electron beam energy densities ( $10 - 30 \text{ J/cm}^2$ ) in an argon medium. It is shown that irradiation does not depend on the energy density of the electron beam and leads to fragmentation of the surface by a network of microcracks, which indicates an increased fragility of the alloy under study. The homogenization of the alloy and the formation of a submicro- and nanocrystalline structure are noted. The thickness of the modified layer increases from 0.8 to 20  $\mu\text{m}$  with an increase in the energy density of the electron beam from 10 to 30  $\text{J/cm}^2$ . The correlation of changes in nanohardness and modulus of elasticity with the results of measuring microhardness has been established. The correlated decrease in micro- and nanohardness and Young's modulus indicates relaxation of the internal stress fields formed during the manufacture of the alloy. Electron beam treatment has little effect on tribological properties, but significantly increases the strength and ductility of the material. The highest value of the compressive strength of 2179 MPa was obtained in an alloy treated with an electron beam with an energy density of 30  $\text{J/cm}^2$ . The conditional yield strength for compression was 522 MPa, and the Young's modulus was 257 GPa.

**Keywords:** high-entropy alloy, electron beam, irradiation, structure, properties, phase composition

**For citation:** Bashchenko L.P., Efimov M.O., Shlyarova Yu.A., Gromov V.E., Konovalov S.V. Structure, phase composition and properties of high-entropy AlCrFeCoNi alloy irradiated with a pulsed electron beam. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;(4(50)):129–136. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-129-136](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-129-136)

## Введение

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) представляют собой класс новых материалов, состоящих из не менее пяти элементов в неэквивалентном (или близком к эквивалентному) соотношении, что обеспечивает им (в отличие от традиционных сплавов) уникальные свойства [1]. Концепция ВЭС основана на идее, что высокая энтропия смешения может способствовать образованию стабильных однофазных микроструктур [2], что не противоречит правилу фаз, основанному на законах термодинамики. Эта концепция вызвала беспрецедентный интерес во всем мире к разработке и исследованию ВЭС. Первой работой в этом направлении следует считать исследование [3], в котором атомная концентрация составляющих ВЭС элементов колеблется в пределах от 5 до 35 %. Особенности химического состава и структуры ВЭС приводят к так называемым «основным» эффектам (core effects), которые определяют уникальный комплекс свойств этих материалов [4 – 7]: эффекту высокой энтропии, эффекту сильных искажений кристаллической решетки, эффекту замедленной диффузии и «коктейльному» эффекту. Обобщение обширных оригинальных результатов, разбор и анализ свойств ВЭС, перспективы их применения сделаны в обзорах и монографиях [1; 8; 9].

В последние пять лет несмотря на значительное количество публикаций по ВЭС и существующие при этом серьезные проблемы, рассмотренные в работах [1; 2; 8; 9], наметилось принципиально новое направление в физическом материаловедении высокоэнтропийных сплавов – улучшение свойств поверхности пу-

тем модифицирования различными видами обработки.

Одним из наиболее перспективных и продемонстрировавших высокую эффективность методов поверхностного упрочнения изделий является электронно-пучковая обработка (ЭПО) [10; 11]. Такая обработка обеспечивает сверхвысокие скорости нагрева (до  $10^6 \text{ K/c}$ ) поверхностного слоя до заданных температур и охлаждение поверхностного слоя за счет теплоотвода в основном в объеме материала со скоростями  $10^4 - 10^9 \text{ K/c}$ , в результате чего в поверхностном слое образуются неравновесные субмикро- и нанокристаллические структурно-фазовые состояния [12; 13].

Целью настоящей работы являлся анализ структуры, элементного и фазового составов, дефектной структуры поверхностного слоя высокоэнтропийного сплава AlCrFeCoNi после облучения импульсным электронным пучком.

## Методы и принципы исследования

В качестве материала исследования использован ВЭС элементного состава Al, Cr, Fe, Co, Ni, полученный с помощью проволоочно-дугового аддитивного производства WAAM. Облучение системы наплавка – подложка интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛЮ» при следующих параметрах процесса: энергия ускоренных электронов  $U$  составляла 18 кэВ; плотность ( $E_S$ ) энергии пучка электронов  $10 - 30 \text{ Дж/см}^2$ ; длительность ( $t$ ) импульса пучка электронов 200 мкс; количество ( $N$ ) импульсов 3; частота ( $f$ ) следования импульсов  $0,3 \text{ c}^{-1}$ . Облучение осу-

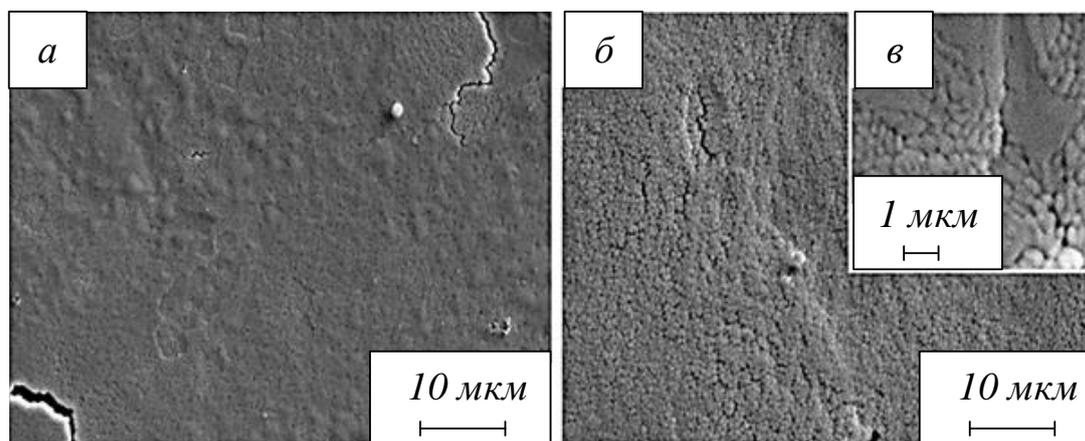


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности ВЭС, облученного импульсным электронным пучком (200 мкс, 3 имп.) при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см<sup>2</sup>

Fig. 1. Electron microscopic image of the surface structure of the VES irradiated with a pulsed electron beam (200  $\mu$ s, 3 imp.) at an electron beam energy density of 30 J/cm<sup>2</sup>

ществляли в вакууме при давлении  $p$  остаточного газа (аргон) в камере установки 0,02 Па.

Исследования элементного и фазового составов проводили методами сканирующей (прибор SEM 515 Philips с микрорентгеноспектральным анализатором EDAX ECON IV) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM 2100F, JEOL) электронной микроскопии. Фазовый состав и состояние кристаллической решетки основных фаз поверхностного слоя образцов изучали методами рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000, Япония). Твердость материала определяли по схеме Виккерса на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н. Исследования трибологических (коэффициент трения и параметр износа) характеристик материала осуществляли на трибометре Pinon Discand Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция).

### Основные результаты

Установлено, что независимо от плотности энергии пучка электронов облучение ВЭС сопровождается фрагментацией поверхности образцов сеткой микротрещин. Размеры фрагментов достигают нескольких сотен микрометров, существенно превышая размеры зерен исходного сплава. Очевидно, что микротрещины образуются в результате релаксации упругих напряжений, возникающих в поверхностном слое материала при высокоскоростном охлаждении, которое наблюдается в условиях облучения импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности воздействия. Релаксация упругих напряжений путем формирования микротрещин характерна для керамических материалов и свидетельствует о повышенной хрупкости исследуемого ВЭС.

Облучение ВЭС импульсным электронным пучком в режиме плавления поверхностного слоя сопровождается гомогенизацией материала. Об этом свидетельствует освобождение границ зерен от выделений второй фазы. Увеличение плотности энергии пучка электронов приводит к интенсификации процесса формирования однородного по элементному составу сплава.

Высокоскоростная кристаллизация расплавленного поверхностного слоя образцов ВЭС сопровождается формированием субмикро- и нанокристаллической структуры (рис. 1).

Существует некоторая вероятность, что облучение сплава импульсным электронным пучком в режиме плавления поверхностного слоя может привести к неконтролируемому изменению элементного состава материала. Выполненные методами микрорентгеноспектрального анализа исследования элементного состава поверхностного слоя ВЭС, облученного импульсным электронным пучком, не подтвердили данное опасение.

Методами сканирующей электронной микроскопии проведены исследования структуры поверхности хрупкого излома образцов ВЭС, модифицированных импульсным электронным пучком. Установлено, что высокоскоростная кристаллизация поверхностного слоя сплава приводит к формированию столбчатой структуры, характерное изображение которой приведено на рис. 2.

Толщина модифицированного слоя ( $H$ ) закономерным образом увеличивается от 0,8 до 20 мкм при увеличении плотности энергии пучка электронов от 10 до 30 Дж/см<sup>2</sup> (табл. 1).

Столбчатая структура сформирована кристаллитами, размеры  $h$  которых закономерным образом увеличиваются с ростом плотности энергии пучка электронов (табл. 1).

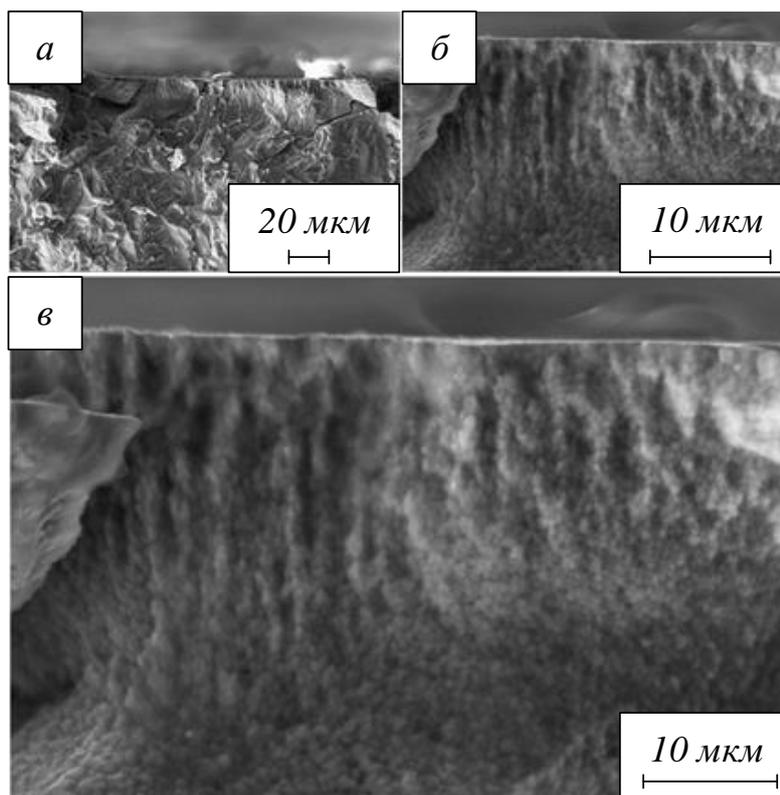


Рис. 2. СЭМ изображение структуры излома ВЭС, обработанного импульсным пучком электронов с плотностью энергии 30 Дж/см<sup>2</sup> (200 мкс, 3 имп.)

Fig. 2. SEM image of the fracture structure of the VES treated with a pulsed electron beam with an energy density of 30 J/cm<sup>2</sup> (200 μs, 3 imp.)

Таким образом, такой параметр, как плотность энергии пучка электронов оказывает влияние как на толщину модифицированного слоя, так и на размеры кристаллитов, формирующихся в результате обработки.

Методами микрорентгеноспектрального анализа поперечных шлифов выполнены исследования элементного состава образцов, облученных импульсным электронным пучком. Установлено, что ЭПО приводит к более однородному распределению элементов в обработанном слое. Так, наблюдаемое в необработанном сплаве обогащение объема зерен алюминием и никелем, а также обогащение границ зерен железом и хромом не наблюдается в модифицированном слое. Картирование поперечного сечения образ-

ца в зависимости от расстояния от поверхности показало, что толщина гомогенизированного слоя достигает 4 мкм. При большем увеличении расстояния от поверхности облучения наблюдается характерное для необработанного образца распределение элементов.

Методами энергодисперсионного спектрального анализа определено, что обработанный слой в среднем имеет следующий элементный состав: 39,05 ат. % Al; 4,88 ат. % Co; 7,92 ат. % Cr; 15,9 ат. % Fe; 32,25 ат. % Ni. Эти данные свидетельствуют об увеличении содержания алюминия и соответствующем уменьшении содержания железа, никеля, кобальта и хрома в рассматриваемом слое.

Т а б л и ц а 1

**Сравнительные данные столбчатой структуры поверхности в зависимости от плотности энергии пучка электронов**

**Table 1. Comparative data of the columnar structure of the surface depending on the energy density of the electron beam**

Характеристики столбчатой структуры	Значение при плотности энергии пучка электронов, Дж/см <sup>2</sup>				
	10	15	20	25	30
<i>H</i> , мкм	0,8 – 1,0	9 – 10	13	13 – 15	20
<i>h</i> , мкм	Не выявлена	0,15 – 0,30	0,30	1,00	2,50 – 3,00

## Результаты трибологических испытаний

Table 2. Results of tribological tests

Состояние, плотность энергии пучка электронов, Дж/см <sup>2</sup>	Скорость износа, 10 <sup>-4</sup> мм <sup>3</sup> /(Н·м)	Коэффициент трения
Без обработки	1,4	0,65
10	1,9	0,65
15	2,3	0,67
20	1,4	0,63
25	2,5	0,65
30	1,9	0,63

Установлено, что электронно-пучковая обработка поверхности образцов сплава при различных плотностях энергии пучка электронов привела к уменьшению микротвердости поверхностного слоя независимо от параметров обработки. Значения уменьшились в среднем на 100 HV в обработанном слое относительно объема материала. Наименьшее значение микротвердости наблюдалось при режиме обработки с плотностью энергии пучка электронов 10 Дж/см<sup>2</sup>, оно составило на поверхности  $368 \pm 1$  HV. Наибольшее значение микротвердости обработанной поверхности  $403 \pm 6$  HV обнаружено в материале, обработанном с плотностью энергии пучка электронов 25 Дж/см<sup>2</sup>. Установлено, что ЭПО приводит к изменению микротвердости поверхностного слоя на глубину до 90 мкм.

Результаты исследования нанотвердости и модуля упругости обработанных образцов выявили корреляцию с данными по изменению микротвердости, а именно, нанотвердость и модуль Юнга поверхностного слоя уменьшаются в среднем на 28 – 30 %. Данный факт свидетельствует о том,

что ЭПО приводит к релаксации внутренних полей напряжений, сформировавшихся в исходном материале при его изготовлении.

Выполненные трибологические испытания образцов в исходном состоянии и после ЭПО в различных режимах показали, что обработка электронным пучком незначительно влияет на коэффициент трения и скорость износа. Скорость износа образца без обработки составляет  $1,4 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/(Н·м), а в обработанных электронным пучком – варьируется от  $1,4 \cdot 10^{-4}$  до  $2,5 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/(Н·м). Коэффициент трения составляет 0,65 для исходных образцов и 0,63 – 0,67 – для модифицированных (табл. 2).

Облучение высокоэнтропийного сплава интенсивным импульсным электронным пучком привело к увеличению прочности и пластичности материала. Так, предел прочности на сжатие увеличился в 1,1 – 1,6 раза (рис. 3). Наибольшее значение предела прочности на сжатие 2179 МПа получено в образце сплава, обработанном электронным пучком с плотностью энергии 30 Дж/см<sup>2</sup>. Услов-

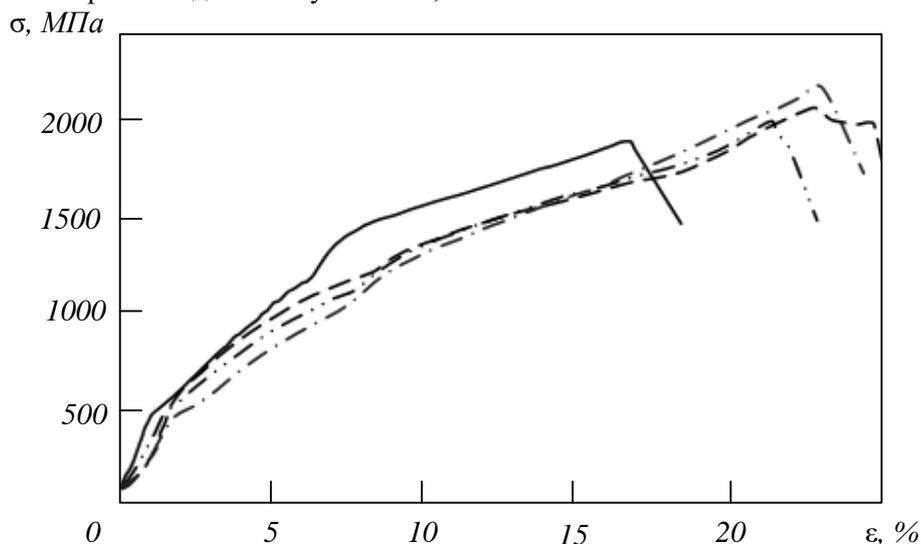


Рис. 3. Диаграммы напряжение – деформация образцов ВЭС в исходном состоянии и обработанных электронным пучком: — — без ЭПО; - - - -  $E_s = 10$  Дж/см<sup>2</sup>; - · - · -  $E_s = 20$  Дж/см<sup>2</sup>; · · · ·  $E_s = 30$  Дж/см<sup>2</sup>

Fig. 3. Stress-strain diagrams of HES samples in the initial state and treated with electron beams: — — without EPO; - - - -  $E_s = 10$  J/cm<sup>2</sup>; - · - · -  $E_s = 20$  J/cm<sup>2</sup>; · · · ·  $E_s = 30$  J/cm<sup>2</sup>

**Выявленные при испытаниях на одноосное сжатие механические свойства образцов до и после ЭПО**

**Table 3. Mechanical properties of samples revealed during uniaxial compression tests before and after the EPOCH**

Состояние, плотность энергии пучка электронов, Дж/см <sup>2</sup>	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$E$ , ГПа	$\varepsilon$ , %
Исходный	512 – 523	1361 – 1899	273 – 372	9 – 18
10	522	2078	310	25
20	474	2000	279	23
30	522	2179	257	25

ный предел текучести на сжатие при этом составил 522 МПа, а модуль Юнга 257 ГПа (табл. 3).

текучести на сжатие при этом составил 522 МПа, а модуль Юнга 257 ГПа.

### Выводы

Осуществлено облучение поверхности образцов ВЭС импульсным электронным пучком в режиме плавления поверхностного слоя. Выявлена фрагментация поверхности образцов сеткой микротрещин. Установлено, что облучение ВЭС импульсным электронным пучком сопровождается освобождением границ зерен от выделений второй фазы, что свидетельствует о гомогенизации материала. Фазовый состав сплава при этом не изменяется. Показано, что высокоскоростная кристаллизация расплавленного поверхностного слоя образцов ВЭС сопровождается формированием столбчатой структуры, имеющей субмикро- и нанокристаллическое строение. Методами микрорентгеноспектрального анализа установлено, что элементный состав поверхностного слоя сплава практически не зависит от плотности энергии пучка электронов и в пределах ошибки измерения соответствует элементному составу исходного материала. Установлено, что электронно-пучковая обработка приводит к снижению микротвердости поверхностного слоя сплава толщиной до 90 мкм, что может быть обусловлено релаксацией внутренних полей напряжений, сформировавшихся в исходном материале при его изготовлении. Показано, что обработка ВЭС импульсным электронным пучком незначительно влияет на коэффициент трения и скорость износа материала. Выявлено, что облучение высокоэнтропийного сплава интенсивным импульсным электронным пучком приводит к увеличению прочности и пластичности материала. Предел прочности на сжатие увеличился в 1,1 – 1,6 раза. Наибольшее значение предела прочности на сжатие 2179 МПа получено в сплаве, обработанном электронным пучком с плотностью энергии 30 Дж/см<sup>2</sup>. Условный предел

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Structure and properties of high-entropy alloys. *Advanced structured materials*. Vol. 107 / V.E. Gromov, S.V. Konovalov, Yu.F. Ivanov, K.A. Osintsev. Springer; 2021:110.
2. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов. *Физика металлов и металловедение*. 2020;121(8):807–841.  
<https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>. EDN: REFBUL.
3. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin T.-S., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*. 2004;6(5):299–303.  
<https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
4. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2014;61:1–93.  
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
5. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*. 2014;16:4749–4768.  
<https://doi.org/10.3390/e16094749>
6. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Mater*. 2017;122:448–511.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
7. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018;61(1):2–22.  
<https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
8. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. High-Entropy Alloys. Second edition. Amsterdam: Elsevier, 2019:374.
9. Zhang Y. High-Entropy Materials: A brief introduction. Singapore: Springer Nature,

- 2019;159. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8526-1>
10. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Prospects for the application of surface treatment of alloys by electron beams in state of the art technologies. *Progress in Physics of metals*. 2020;21(3):345–362. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345>
  11. Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Шлярова Ю.А., Семин А.П. Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2022:230.
  12. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Shliarova Yu.A., Vorobyov S.V., Semin A.P. Structure and properties of CrMnFeCoNi high-entropy alloy irradiated with a pulsed electron beam. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:4258–4269. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.108>
  13. Osintsev K.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Panchenko I.A., Vorobyov S.V. Evolution of structure in AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by pulsed electron beam. *Metals*. 2021;11(8):1228. <https://doi.org/10.3390/met11081228>
- REFERENCES**
1. Structure and properties of high-entropy alloys. Advanced structured materials. Vol. 107 / V.E. Gromov, S.V. Konovalov, Yu.F. Ivanov, K.A. Osintsev. Springer, 2021:110.
  2. Rogachev A.S. Structure, stability and properties of high-entropy alloys. *Physics of metals and metallology*. 2020;121(8):807–841. <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>. EDN: REFBUL. (In Russ.).
  3. Yeh J.-W., Chen S.-K., Lin S.-J., Gan J.-Y., Chin T.-S., Shun T.-T., Tsau C.-H., Chang S.-Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*. 2004;6(5):299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
  4. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2014;61:1–93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
  5. Cantor B. Multicomponent and high entropy alloys. *Entropy*. 2014;16:4749–4768. <https://doi.org/10.3390/e16094749>
  6. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Mater*. 2017;122:448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
  7. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018;61(1):2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
  8. Murty B.S., Yeh J.W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. High-Entropy Alloys. Second edition. Amsterdam: Elsevier, 2019:374.
  9. Zhang Y. High-Entropy Materials: A brief introduction. Singapore: Springer Nature, 2019:159. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8526-1>
  10. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Prospects for the application of surface treatment of alloys by electron beams in state of the art technologies. *Progress in Physics of metals*. 2020;21(3):345–362. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345>
  11. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Shlyakhova Yu.A., Semin A.P. Structure and properties of high-entropy alloys. Novokuznetsk: IC SibGIU, 2022:230. (In Russ.).
  12. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Shliarova Yu.A., Vorobyov S.V., Semin A.P. Structure and properties of CrMnFeCoNi high-entropy alloy irradiated with a pulsed electron beam. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:4258–4269. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.108>
  13. Osintsev K.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V., Panchenko I.A., Vorobyov S.V. Evolution of structure in AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by pulsed electron beam. *Metals*. 2021;11(8):1228. <https://doi.org/10.3390/met11081228>

**Сведения об авторах**

**Людмила Петровна Бащенко**, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** luda.baschenko@gmail.com

**ORCID:** 0000-0003-1878-909X

**SPIN-код:** 5942-8145

**Михаил Олегович Ефимов**, соискатель кафедры естественнонаучных дисциплин им. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** moefimov@mail.ru.

**Юлия Андреевна Шлярова**, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** rubannikova96@mail.ru

**ORCID:** 0000-0001-5677-1427

**SPIN-код:** 7791-1310

**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

**Сергей Валерьевич Коновалов**, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет; профессор кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева  
*E-mail*: konovalov@sibsiu.ru  
*ORCID*: 0000-0003-4809-8660  
*SPIN-код*: 4391-7210

#### *Information about the authors*

**Lyudmila P. Bashchenko**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University  
*E-mail*: luda.baschenko@gmail.com  
*ORCID*: 0000-0003-1878-909X  
*SPIN-код*: 5942-8145

**Mikhail O. Efimov**, Ph.D. candidate, Department of Natural Sciences named after V.M. Finkel, Siberian State Industrial University  
*E-mail*: moefimov@mail.ru.

**Yulia A. Shliarova**, Researcher, Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University  
*E-mail*: rubannikova96@mail.ru  
*ORCID*: 0000-0001-5677-1427  
*SPIN-код*: 7791-1310

**Victor E. Gromov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Department of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University  
*E-mail*: gromov@physics.sibsiu.ru  
*ORCID*: 0000-0002-5147-5343

**Sergej V. Konovalov**, DDr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Scientific and Innovation Activities, Siberian State Industrial University; Professor of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara State Aerospace University  
*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 15.10.2024  
После доработки 24.10.2024  
Принята к публикации 28.10.2024

Received 15.11.2024  
Revised 24.10.2024  
Accepted 28.10.2024

*Оригинальная статья*

УДК 331.44:622

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-137-146

## ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРСОНАЛА УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ КУЗБАССА

© 2024 г. Т. О. Горлатова, Т. В. Петрова

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

**Аннотация.** Влияние геополитических факторов на экономику России, которая глубоко интегрирована в международные системы межгосударственных и торговых отношений, глобальные тренды по переходу на «зеленую» экономику, санкционный режим для промышленных отраслей России заставляют крупные промышленные компании перестраивать производства под требования времени. Большинство крупных предприятий держит курс на достижение устойчивого развития. Последнее основывается на принципах ESG – достижение уровня экономического роста с учетом повышения уровня удовлетворенности персонала и сохранения окружающей среды. Нестабильность угольной отрасли в последний год требует повышения эффективности работы угледобывающих предприятий. Трудовые ресурсы являются одним из важнейших компонентов эффективного функционирования любого предприятия для достижения необходимых результатов производства. Низкий уровень безработицы в целом в России, недостаточное количество квалифицированных рабочих кадров может негативно сказаться на работе предприятий, и, как следствие, на экономическом и социальном развитии региона. Остро проблема дефицита квалифицированных кадров обозначена в Кузбассе, что связано с высоким оттоком трудоспособного населения из региона, предпосылками которого является недостаточно высокий уровень экономического, социального и культурного развития в области. В настоящее время недостаточно привлечь квалифицированные кадры, необходимо еще их удержать и вовлечь в производственные процессы предприятия с целью получения максимальной отдачи. Основными задачами стали выявление отличительных особенностей социально-психологического портрета работника угледобывающих предприятий Кузбасса, формирование которого происходит под влиянием специфики угледобывающей отрасли в целом, особенностей функционирования угледобывающих предприятий в Кемеровской обл., социально-экономической ситуации в регионе. Точное составление социально-психологического портрета работника позволит разработать наиболее эффективную стратегию в области управления трудовыми ресурсами на добывающих предприятиях угольной отрасли Кузбасса.

**Ключевые слова:** устойчивое развитие, «зеленая» экономика, отличительные особенности, угледобывающая отрасль, эффективное использование, дефицит квалифицированных кадров, трудовые ресурсы, социально-психологический портрет работника

**Для цитирования:** Горлатова Т.О., Петрова Т.В. Отличительные особенности персонала угледобывающих предприятий Кузбасса. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):137–146. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-137-146](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-137-146)

*Original article*

## DISTINCTIVE FEATURES OF THE PERSONNEL AT KUZBASS COAL MINING ENTERPRISES

© 2024 T. O. Gorlatova, T. V. Petrova

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

**Abstract.** The influence of geopolitical factors on the Russian economy, as an economy deeply integrated into international systems of interstate and trade relations, global trends in the transition to a green economy, and the sanctions imposed on industrial sectors in Russia force large industrial companies to rebuild production to meet the requirements of the time. Most large enterprises are committed to achieving sustainable development based on the principles of ESG – achieving a level of economic growth, taking into account increasing staff satisfaction and environmental conservation. The instability of the coal industry in the last year requires an increase in the efficiency of coal mining enterprises. Human resources are one of the most important components of the effective functioning of any enterprise in order to achieve the necessary production results. However, the low unemployment rate in Russia as a whole, and the insufficient number of qualified workers can negatively affect the work of enterprises, and, as a result, the economic and social development of the region of presence. The problem of shortage of qualified personnel is particularly acute in Kuzbass, which is associated with a high outflow of the able-bodied population from the region, the prerequisites of which are an insufficiently high level of economic, social and cultural development in the region. In the current situation, it is not enough to attract qualified personnel, it is also necessary to retain them and involve them in the production processes of the enterprise in order to maximize returns. The main objectives of this work were to identify the distinctive features of the socio-psychological portrait of an employee of Kuzbass coal mining enterprises, the formation of which is influenced by the specifics of the coal mining industry as a whole, the peculiarities of the functioning of coal mining enterprises in the Kemerovo region, the socio-economic situation in the region. Accurate compilation of a socio-psychological portrait of an employee will allow us to develop the most effective strategy in the field of human resource management at the mining enterprises of the Kuzbass coal industry.

**Keywords:** sustainable development, "green" economy, distinctive features, coal mining industry, efficient use, shortage of qualified personnel, labor resources, socio-psychological portrait of an employee

**For citation:** Gorlatova T.O., Petrova T.V. Distinctive features of the personnel of Kuzbass coal mining enterprises. *Bulletin of the Siberian State Industrial University.* 2024;4(50):137–146. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-137-146](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-137-146)

## Введение

Сложившаяся геополитическая обстановка определила состояние всей экономики России: сильное влияние внешних факторов на развитие общества происходит за счет высокого уровня интеграции России в систему международных и межгосударственных отношений. Жесткие санкции, направленные на экономику страны, глобальные тренды по переходу на «зеленую» экономику заставляют предприятия не только сохранять, но и повышать уровень своего устойчивого развития.

Во многих программных документах международного, национального, регионального и корпоративного уровня используется термин устойчивое развитие [1]. В работах [2 – 4] определяют устойчивое развитие или стабильность как совокупность нескольких компонентов (устойчивый рост экономических показателей, повышение качества жизни, сохранение социальных и культурных ценностей).

Исходя из принципов устойчивой стабильности и специфики горнодобывающей отрасли, в работе [1] дали следующее определение: «Под устойчивым развитием горнодобывающего предприятия необходимо понимать процесс, в ходе которого и инвестирование, и работа с природными ресурсами, и научно-технический прогресс, и личностный рост, и институциональные изменения выступают в связке друг с

другом. Обобщая вышеизложенное, было обозначено определение устойчивого развития горнодобывающего предприятия как способность предприятия сохранять в динамике ESG-показатели своего экономического роста при обеспечении реализации горного потенциала удовлетворения человеческих потребностей с учетом интересов охраны окружающей среды».

Одним из компонентов устойчивой стабильности любого предприятия является наличие достаточного количества квалифицированных трудовых ресурсов. Демографическая яма 90-х гг., «кадровый голод» России и Кузбасса привели к дефициту персонала и конкурентной борьбе между угледобывающими компаниями за людей. Традиционные методы мотивации персонала уже не являются эффективными, не закрывают всех потребностей предприятий в трудовых ресурсах и требуют изменения подходов к управлению. В Кемеровской обл. кадровый дефицит будет усиливаться в связи с естественным старением населения Кузбасса и миграционной убылью. Грамотно разработанная стратегия по управлению трудовыми ресурсами с учетом особенностей угледобывающей отрасли Кузбасса позволит снизить риски по недостижению операционных показателей в связи с нехваткой персонала. В настоящей работе обоснована актуальность и необходимость изменения существующих подходов к подбору и удержанию

персонала на угледобывающих предприятиях Кузбасса с учетом их социально-психологических особенностей.

### **Обзор глобальных трендов развития угольной промышленности**

Глобальное изменение климата и ухудшение состояния окружающей среды заставляют мировое сообщество задуматься о будущем планеты. Эта проблема выходит далеко за рамки границ отдельно взятого государства и требует скоординированных решений всех участников мирового сообщества для перехода к низкоуглеродной экономике. В целях борьбы с изменением климата и его негативными последствиями 12 декабря 2015 г. было принято Парижское соглашение [5], направленное на существенное сокращение глобальных выбросов парниковых газов.

В 2019 г. Европейский союзом было принято Европейское «зеленое соглашение» [6]. В рамках этого соглашения утверждены мероприятия, направленные на переход к 2050 г. европейской экономики на «зеленую» энергетику с целью сделать ее ресурсосберегающей и конкурентоспособной.

Уголь является одним из наиболее доступных энергоресурсов в мире и занимает более трети мировой генерации электроэнергии. Уголь критически важен для черной металлургии и производства стали. В 2019 г. Агентство по охране окружающей среды США оценило долю угледобывающей промышленности в размере 11 % глобальных выбросов метана в результате деятельности человека. В работе [7] было показано, что глобальные выбросы метана продолжают расти, даже не смотря на сокращение добычи угля.

Переход производства с ископаемого топлива на экологически чистую энергию позволит обеспечить наибольший вклад в глобальное сокращение углеродного следа. В соответствии со сценарием перехода на «зеленую» энергетику мощности солнечной и ветровой электрогенерации в мире с 2020 по 2050 гг. должны вырасти в 15 раз, что требует значительного увеличения инвестиций, особенно в странах с развивающимися и растущими экономиками. Все это не позволит в ближайшем будущем значительно сократить потребление угля в мире [8].

По прогнозам Международного энергетического агентства в Европейском союзе ожидается снижение потребления угля на 19 % в 2024 г. Спрос на уголь в странах с развитой экономикой явно имеет тенденцию к снижению, в то время как в некоторых странах с формирующейся рыночной экономикой весьма вероятен дальнейший рост [9].

### **Социально-экономическая ситуация в Кузбассе**

В настоящее время Российская Федерация имеет статус угольной державы. По словам министра энергетики Россия занимает шестое место в мире по добыче и третье место по экспорту угля [10]. Лидером по масштабам добычи угля является Кузбасс, где добывается более половины российского угля. Огромные запасы черного золота, мощные угольные пласты, высокое качество добываемого сырья делают Кузнецкий бассейн одним из крупнейших в мире. В последние годы по данным Министерства угольной промышленности Кузбасса добыча угля снижается. Динамика и объемы добычи угля в Кемеровской обл. представлены на рис. 1.

Министерство энергетики России не предполагает рост объемов добычи угля в 2024 г.

Основными предпосылками негативной динамики являются:

- снижение цен на уголь на внешних рынках, и, как следствие, сокращение экспорта угля в Китай и Индию (основные потребители российского угля);

- снижение внутреннего потребления металлургического угля коксующихся марок;

- рост себестоимости добычи угля (по словам заместителя председателя комитета по энергетике Государственной Думы Российской Федерации в 2023 г. рост себестоимости добычи угля превысил 30 %; основной причиной роста себестоимости стала высокая ключевая ставка [12]);

- значительный рост железнодорожных тарифов (цены на перевозку угля по железной дороге увеличились от 50 до 107 % относительно 2021 г.) [13];

- дефицит транспортной инфраструктуры по транспортировке угля к морским портам перевалки (по оценке Института проблем естественных монополий (ИПЕМ) развитие портовых мощностей по перевалке угля будет опережать рост экспортных отправок грузов железнодорожным транспортом; такая динамика связана с дефицитом железнодорожной инфраструктуры на основных экспортных направлениях, особенно в направлении Дальнего Востока, а также с сохранением дисбаланса между активно развивающимися портовыми мощностями и ограниченными темпами развития провозных мощностей [14]; в 2022 г. из Кузбасса вместо 58 млн т, определенных в поручении президента, было вывезено 47,9 млн т, а в 2023 г. – 52,8 млн т, в 2024 г. уровень вывоза угля должен составить не менее 68 млн тонн; однако РЖД взяла на себя обязательства только на 54,1 млн т) [15];

- дефицит квалифицированных рабочих кадров.

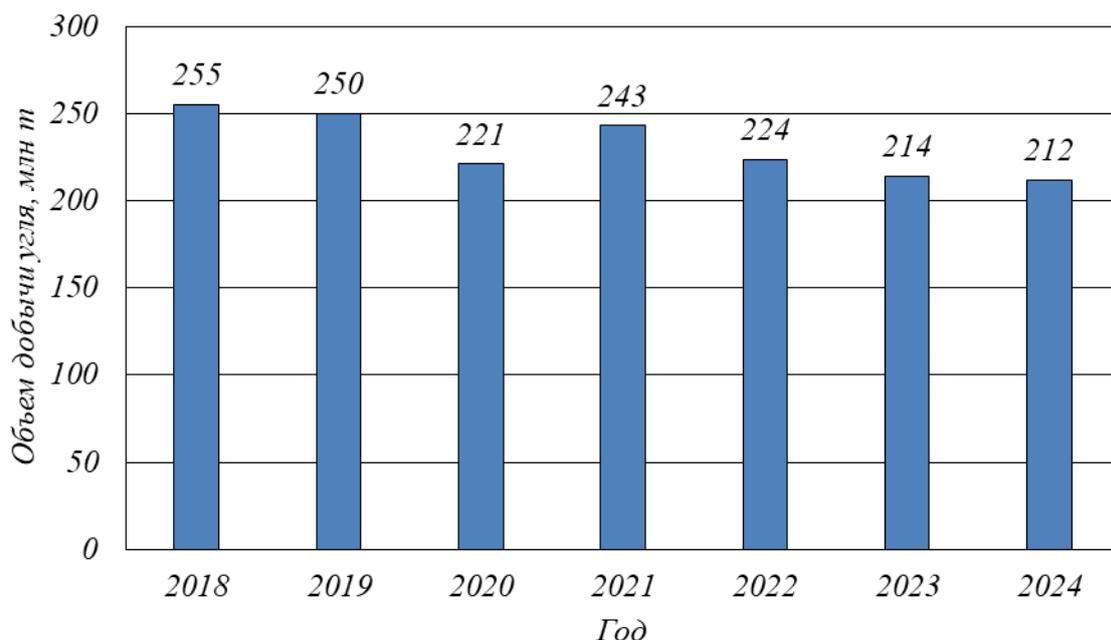


Рис. 1. Динамика и объемы добычи угля в Кемеровской обл. – Кузбассе в 2018 – 2024 гг. [11]  
 Fig. 1. Dynamics and volumes of coal production in the Kemerovo region – Kuzbass in 2018 – 2024 [11]

Несмотря на сложности, которые переживает угольная отрасль Кузбасса, добыча угля продолжает играть ключевую роль в экономике региона. По данным, озвученным министром энергетики России Сергеем Цивилевым, в период с 2018 по 2023 гг. в угольной отрасли Кузбасса было введено в строй 12 предприятий (шесть разрезов, четыре углеобогачительные фабрики, две шахты). До конца 2025 г. планируется пуск еще четырех новых предприятий (одной шахты и трех обогачительных фабрик) [14].

На фоне сложившейся социально-экономической ситуации в угледобывающей отрасли в

стране в целом еще одним из факторов риска для достижения плановых операционных показателей предприятий угледобычи в Кузбассе является дефицит квалифицированных рабочих кадров. Последствия демографической «ямы» 90-х гг. и отток работоспособного населения привели к тому, что на отечественном рынке труда наблюдается дефицит кадров. Особенно остро эта проблема обозначена в Кузбассе. Естественная и миграционная убыль/прирост населения представлены на рис. 2.

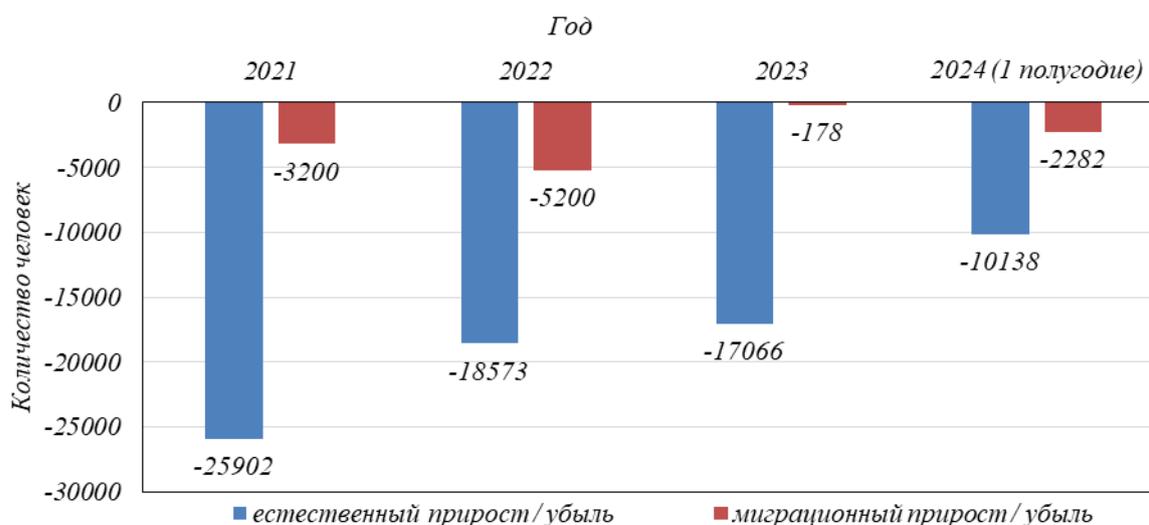


Рис. 2. Естественная и миграционная убыль/прирост населения Кемеровской области [16]  
 Fig. 2. Natural and migration decline/ population growth in the Kemerovo region [16]

Согласно статистическим данным в Кузбассе только за первое полугодие 2024 г. естественная убыль составила 10138 человек, миграционная – 2282 человек (приехали 20798 человек, уехали – 23080 человек). Для сравнения, в 2023 г. за все 12 месяцев естественная убыль составила 17066 человек, миграционная – 178 человек (приехали 24922 человека, уехали – 25170 человек). Суммарно за последние три года и первую половину текущего года население Кузбасса сократилось на 82539 человек, что составляет примерно 3 % от численности жителей области [16].

В 2021 г. компания ANCOR (лидер кадровой индустрии в России), одним из направлений деятельности которой является исследование для компаний рынка труда регионов, провела для АО «Сибирская угольная энергетическая компания» (АО «СУЭК») исследование рынка труда России для представителей профессий горнодобывающей промышленности. Согласно исследованию емкость рабочих мест на момент исследования уже выше, чем численность работников, дальше дефицит будет расти. Более подробно результаты исследования представлены в таблице.

В ходе исследования рассматривался базовый сценарий активного развития угольной отрасли в России, исходя из которого предполагался рост емкости рабочих мест в регионе. Несмотря на текущие условия квалифицированных кадров не хватает даже на существующие производственные мощности.

Одним из компонентов устойчивого развития является персонал или трудовые ресурсы. Трудовые ресурсы – это стратегические ресурсы, которыми необходимо управлять с учетом актуальных целей и задач организации. В некоторых исследованиях по организации труда одним из ключевых стал вопрос гибкости – маневренности, способности быстро реагировать на изменения и умение приспосабливаться к текущей макроэкономической ситуации. Развитие технологий требует, с одной стороны, гибкости рабочей силы для эффективного использования нового оборудования [17]. Управление трудовыми ресурсами в настоящее время является решающим фактором для достижения успеха организации [18]. Дефицит персонала на угледобывающих предприятиях оказывает негативное влияние на развитие угольной отрасли в целом и каждого отдельного угледобывающего предприятия в частности. В подобных нестабильных условиях бизнесу необходимы управление эффективностью и повышение вовлеченности персонала предприятий в производственные процессы. Управление эффективностью

происходит посредством влияния на результативность работы предприятия через его сотрудников в таких областях, как производительность, качество, рост, прибыль и повышение акционерной стоимости [19]. Для достижения результативности необходимо определение требований, предъявляемых к работнику на рабочем месте, а также его социально-психологических особенностей, позволяющих справляться с поставленными задачами.

Основой для разработки методики управления персоналом является формирование социально-психологического портрета современного работника угольной отрасли, выявление его отличий от представителей других отраслей. Портрет позволит разработать таргетированную стратегию привлечения и удержания персонала в отрасли.

Человек с самого рождения живет в социуме, и, будучи включенным в социальные взаимодействия, приобретает определенный социальный опыт, который является неотъемлемой частью личности. По мере взросления и приобщения к труду у человека формируется профессиональная самооценка, которая складывается из профессиональных компетентности (системы знаний) и умелости (сформированность умений и навыков) [20]. Эти факторы влияют на профессиональные адаптацию, успешность и развитие работника, а также на достижение операционных показателей предприятия.

Психологические особенности работника определяют не только общекультурные факторы (экономическая ситуация в стране, в отрасли, уровень образования, наличие или отсутствие идеологических установок), но и специфика работы, статус профессии в обществе, социальная защищенность работника. Социально-психологический портрет работника угольной отрасли по некоторым параметрам будет отличаться от социально-психологического портрета работника других отраслей промышленности.

Для формирования социально-психологического портрета предприятий необходимо выявить отличительные особенности угледобывающей отрасли, которые оказывают значительное влияние на социально-психологический портрет работника. Выявление таких особенностей позволит разработать методы привлечения, развития и удержания трудовых ресурсов. Целевая стратегия по управлению персоналом с учетом особенностей отрасли позволит повысить эффективность использования трудовых ресурсов, что будет выражено в снижении текучести персонала, повышении уровня квалификации, а также снизить затраты на подбор персонала.

**Соотношение емкости рабочих мест в регионе и численности персонала горнодобывающей отрасли Кузбасса**  
**The ratio of the capacity of jobs in the region and the number of personnel in the Kuzbass mining industry**

Показатель	Значение показателя, чел., по годам								
	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Емкость рабочих мест в регионе	27322	28572	29072	29372	29672	29922	30172	30422	30672
Общая численность представителей профессий на начало года	20158	19957	19756	19554	19351	19149	18946	18743	18539
Прирост представителей профессий из других сфер за год	3024	2994	2963	2933	2903	2872	2842	2811	2781
Убыль представителей профессий в другие сферы за год	-3225	-3193	-3161	-3129	-3096	-3064	-3031	-2999	-2966
Численность выпускников, трудоустраивающихся по специальности, в год	370	364	358	352	346	340	334	328	322
Итого численность представителей профессий на конец года	19957	19756	19554	19351	19149	18946	18743	18539	18336
Количество активных соискателей	1736	1677	1620	1565	1512	1460	1411	1363	1316
Численность представителей профессии, занятых на предприятиях	26445	27695	28195	28495	28795	29045	29295	29545	29795
Дефицит/профицит	-7164	-8615	-9316	-9818	-10321	-10773	-11226	-11679	-12133
Отношение общей численности представителей профессии к емкости рабочих мест	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6

## **Отличительные особенности угольной отрасли Кузбасса**

В Кузбассе угледобыча осуществляется открытым и подземным способами. Несмотря на отличия в способах добычи, все угледобывающие предприятия относятся к опасным производственным объектам [21]. Основные отличия угледобывающей промышленности от других отраслей народного хозяйства, оказывающие влияние на формирование социально-психологического портрета работников, представлены ниже.

### *1. Отличительные особенности подземной добычи угля.*

1.1 Высокий уровень опасности производства и непредсказуемость ведения технологических процессов (первый класс опасности для шахт обусловлен возможными внезапными взрывами газа и/или пыли, выбросами пород, горными ударами, прорывами воды в горные выработки [21]).

1.2 Постоянное использование средств индивидуальной защиты, самоспасателей и светильников (для работников шахт), что вызывает неудобства в производстве работ и повышает тяжесть труда.

1.3 Вынужденная поза (для работников основных профессий шахт работа при низких сводах, в узких проходах приводит к необходимости приспосабливаться к условиям).

1.4 Физический труд всем телом.

1.5 Работа на глубине десятков и сотен метров под землей.

1.6 Длительное пребывание в темноте.

1.7 Высокий уровень шума.

1.8 Высокая трудоемкость рабочих процессов (много ручного труда/практически полное отсутствие малой механизации).

*2. Отличительные особенности на предприятиях с открытым способом добычи угля.*

2.1 Третий класс опасности для угольных разрезов [21] и непредсказуемость ведения технологических процессов (это обусловлено зависимостью от климата; влияния природных явлений на процесс добычи: размывание технологических дорог, сползание грунтов, обледенение дорог), возможным обрушение горных пород, прорывом воды в зонах ведения горных работ.

2.2 Постоянное использование средств индивидуальной защиты, средств контроля сна (для водителей технологических машин разрезов), что вызывает неудобства в производстве работ и повышает тяжесть труда.

2.3 Вынужденная поза на технологических машинах.

2.4 Физический труд всем телом.

2.5 Для работников основных профессий разрезов вынужденная поза на технологических машинах.

2.6 Экстремальные значения влажности и температуры.

2.7 Превышение нормальных значений уровня шума и вибрации по результатам специальной оценки условий труда.

*3. Отличительные особенности угольной отрасли Кузбасса, характерные как для открытой, так и для подземной добычи угля.*

3.1 Гибкий процесс организации труда; влияние природных и горно-геологических условий не позволяют со 100 % вероятностью спрогнозировать ежедневный план добычи и могут приводить к отклонениям в выполнении ежесуточного сменного задания.

3.2 Зависимость заработной платы от объема добычи (уровень заработной платы напрямую связан с выполнением производственной программы; случаются ситуации, когда для достижения необходимых результатов работники пренебрегают правилами безопасности, что может приводить к технологическим авариям и инцидентам).

3.3 Исторически сложившийся высокий уровень социальной активности горняков (забастовочное движение, охватившее весь Кузбасс, привело к появлению сильных профсоюзов; результатом стало заключение Федерального отраслевого соглашения между представителями Работников и Работодателей [23], которое является одним из основополагающих документов, регламентирующих трудовой процесс и социальные льготы для горняков).

3.4 Постоянный и вахтовый метод работы (расширение угольной отрасли в районы Приморского края и крайнего Севера, не имеющие достаточного количества квалифицированного персонала для работы на горнодобывающих предприятиях, привели к необходимости привлечения сотрудников, работающих вахтовым методом).

3.5 Сложные социально-экономические условия развития угледобывающей промышленности в Кузбассе в настоящее время; снижение потребления угля внутри страны, длинные и перегруженные логистические маршруты до морских портов, снижение цен на уголь – все эти факторы приводят к нестабильности в работе предприятий, заставляют гибко реагировать на вызовы рынка и повышает тревожность работников предприятий.

3.6 Экологическая обстановка (в аналитическом отчете аудиторской компании FinExpertiza, основанном на данных Росприроднадзора России, Кузбасс в 2023 г. стал главным генератором

промышленного мусора в России [22]; на уровень загрязненности влияет высокая концентрация промышленных предприятий; на территории нашего края расположено более 1500 предприятий различного профиля, более 130 угледобывающих предприятий, 88 предприятий машиностроительных, свыше десятка химических производств, а также металлургические, строительные и сельскохозяйственные отрасли; главными экологическими проблемами являются загрязнение атмосферы вредными выбросами; загрязнение водных артерий Кузбасса; разрушение земель и уничтожение сельскохозяйственных угодий; загрязнение отходами производства и потребления.

Совокупность всех описанных факторов оказала значительное влияние на отток трудоспособного населения из региона.

### **Отличительные черты социально-психологического портрета**

Специфика технологических процессов угледобывающей отрасли формирует характерные черты социально-психологического портрета работника предприятия:

1. Высокий уровень физической и психологической выносливости, позволяющий спускаться в шахту или работать на разрезе.

2. Высокий уровень взаимодействия друг с другом. Каждый работник в течение смены зависит от деятельности бригады не только в выполнении плана производства, но, зачастую, и собственная жизнь работника зависит от каждого члена бригады.

3. Высокий уровень адаптивности к изменениям технологического и рабочего процесса. Работая в условиях повышенной опасности, каждый горняк должен быть готов предпринимать активные действия, чтобы выжить. Высокая адаптивность является одной из причин быстрой смены работником по собственному желанию метода работы со стационарного места работы на вахтовый метод.

4. Сниженный уровень ощущения опасности. Все работники знают случаи гибели шахтеров, практически каждую семью в той или иной степени затронули самые страшные аварии. Тем не менее, зачастую наблюдающийся высокий уровень усталости и притупление внимания могут приводить к нарушению правил безопасности и, как следствие, травмам.

5. Средний возраст персонала 40 – 45 лет. Это связано с ранним выходом (до 50 лет) работников угольной отрасли на страховую пенсию при наличии выработанного стажа. Молодое поколение не спешит осваивать горняцкие профессии, предпочитая выбирать менее слож-

ную, без наличия вредных и стрессовых факторов работу.

7. Владение несколькими профессиями. Необходимость выполнять сложные виды работ, ограниченность материальных и технических ресурсов, связанных с удаленностью от ремонтных подразделений, заставляет работников овладевать смежными профессиями, что позволяет мелкие ремонтные работы выполнять без привлечения технических специалистов.

8. Высокая социальная и политическая активность. Сильное влияние профсоюзов постоянно поддерживает высокий уровень социальной и политической активности работников в отстаивании собственных прав и гарантий. Рост заработной платы в 2023 г. стал выше роста производительности труда. Если раньше работники были привязаны к одному предприятию и неохотно меняли работу из-за небольшой разницы в заработной плате, то в настоящее время стабильность предприятия и здоровый социально-психологический климат в коллективе уже не являются сдерживающим от смены работы факторами.

### **Выводы**

Угледобывающая отрасль Кузбасса является одной из ведущих отраслей промышленности и вносит значительный вклад в устойчивое развитие региона. Специфика угледобывающей отрасли Кузбасса, зависимость ее от различных факторов (политических, экономических, экологических) позволяет выделить особенности, влияющие на формирование социально-психологического портрета работника предприятия отрасли.

Сформированный портрет может служить основой для разработки методов привлечения и удержания персонала на угледобывающих предприятиях. Это позволит разработать стратегию по управлению трудовыми ресурсами для достижения необходимых показателей эффективности производства, выраженных в снижении уровня текучести, необходимом уровне квалификации персонала, а также в росте производительности труда. Все эти мероприятия будут способствовать эффективному функционированию угледобывающих предприятий в кризисные времена и заложат фундамент для роста в будущем.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Перекрест Н.В., Затепакин О.А. Теоретические подходы к определению понятия устойчивого развития горнодобывающего предприятия. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;(1(43)):116–125.

- [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-116-125](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-116-125)
2. Vallance S., Perkins H.C., Dixon J.E. What is social sustainability? A clarification of concepts. *Geoforum*. 2011;42(3):342–348.
  3. Nuno Quental, Júlia M. Lourenço, Fernando Nunes da Silva. Sustainable development policy: goals, targets and political cycles. *Sustainable Development*. 2011;19(1):15–29.
  4. Tvaronavičienė, Manuela; Lankauskienė, Toma Plausible foreign direct investment' impact on sustainable development indicators of differently developed countries. *Journal of Security & Sustainability*. 2011;1(1):27–38.
  5. *Paris Agreement, United Nations*. 2015. – URL: [https://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf) (дата обращения: 20.10.2024).
  6. *The European Green Deal*. – URL: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en). (дата обращения: 20.10.2024).
  7. Nazar Kholod, Meredydd Evans, Raymond C. Pilcher, Volha Roshchanka, Felicia Ruiz, Michael Cote, Ron Collings. Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production. *Journal of Cleaner Production*. 2020;256:120489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120489>
  8. Иванов Н.А., Сарычев А.Е., Стоянова И.А. Роль угля в мировом энергопереходе. *Горная промышленность*. 2023;(4):102–108.
  9. *Coal Mid-Year Update July 2024 International Energy Agency*<https://www.iea.org/publications-and-statistics/publications/coal-mid-year-update-july-2024>. – URL: [http://iea.blob.core.windows.net/assets/42dee289-ffa2-44a5-b050-7232b2809ce1/CoalMid-yearUpdate\\_July2024.pdf](http://iea.blob.core.windows.net/assets/42dee289-ffa2-44a5-b050-7232b2809ce1/CoalMid-yearUpdate_July2024.pdf) (дата обращения: 20.10.2024).
  10. Уголь России и майнинг: развивая отрасль и регион. *Авант-партнер*. 2024;(3):34–36.
  11. Угольный сдвиг. *Авант-партнер*. 2024;(3):18–20.
  12. Уголь продолжит играть важную роль. Эксклюзивное интервью Сергея Цивилева. *Уголь Кузбасса*. 2024;(1):4–6.
  13. Райнеш Е. Возвращение гибких. *Уголь Кузбасса*. 2024;(2):25–27.
  14. Алексеев Л. Поиск пути. *Уголь Кузбасса*. 2024;(3):8–12.
  15. Саакян Ю. Где деньги брать? *Уголь Кузбасса*. 2024;(2):55–57.
  16. *Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Кемеровской области – Кузбассу*. – URL: <http://service.kemerovostat.gks.ru/bgd/EJEGOD/issWWW.exe/Stg/2022/4.%20%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5.htm> (дата обращения: 20.10.2024).
  17. Поль Блайтон. *Гибкость. Энциклопедия «Управление человеческими ресурсами»*. СПб.: Питер, 2002:1200.
  18. Шулер Р.С. *Управление человеческими ресурсами. Энциклопедия «Управление человеческими ресурсами»*. СПб.: Питер, 2002:1200.
  19. Армстронг М. *Главный учебник HR в мире*. Москва: Эксмо, 2019:416.
  20. Реан А.А. *Психология личности*. СПб.: Питер, 2016:276.
  21. Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ (ред. от 08.08.2024) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024).
  22. *Еженедельник "Аргументы и Факты" № 37. АиФ в Кузбассе № 37*. – URL: <https://kuzbass.aif.ru/society/-gryaznee-vseh-kuzbass-glavnyy-generator-promyshlennogo-musora-v-strane> (дата обращения: 20.10.2024)

#### REFERENCES

1. Perekrest N.V., Zatepyakin O.A. Theoretical approaches to the definition of sustainable development of a mining enterprise. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;(1(43)):116–125. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-116-125](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-116-125)
2. Vallance S., Perkins H.S., Dixon B.J.E. What is social sustainability? Explanation of concepts. *Geoforum*. 2011;42(3):342–348.
3. Nuno Quental, Júlia M. Lourenço, Fernando Nunes da Silva. Sustainable development policy: goals, targets and political cycles. *Sustainable Development*. 2011;19(1):15–29.
4. Tvaronavičienė, Manuela; Lankauskienė, Toma Plausible foreign direct investment' impact on sustainable development indicators of differently developed countries. *Journal of Security & Sustainability*. 2011;1(1):27–38.
5. *Paris Agreement, United Nations*. 2015. – URL: [https://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf) (Accessed: 20.10.2024)
6. *European Green Course*. – URL: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en) (Accessed: 20.10.2024)
7. Nazar Kholod, Meredith Evans, Raymond K. Pulcher, Olga Roschenko, Felicia Ruiz, Michael Cote, Ron Collins. Global methane emissions from coal mining will continue to grow

- even with a decrease in coal production. *Journal of Cleaner Production*. 2020;256:120489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120489>
8. Ivanov N.A., Sarychev A.E., Stoyanova I.A. The role of coal in the global energy transition. *Gornaya promyshlennost'*. 2023;(4):102–108. (In Russ.).
  9. *Final report on the international community for July 2024 Until the middle of the year* [https://iea.blob.core.windows.net/assets/42dee289-ffa2-44a5-b050-7232b2809ce1/CoalMid-yearUpdate\\_July2024.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/42dee289-ffa2-44a5-b050-7232b2809ce1/CoalMid-yearUpdate_July2024.pdf) (Accessed: 20.10.2024)
  10. Coal of Russia and mining: developing the industry and the region. *Avant-partner*. 2024;(3):34–36. (In Russ.).
  11. The coal shift. *Avant-partner*. 2024;(3):18–20. – URL: <http://avant-partner.ru/rang/9333.html> (Accessed: 20.10.2024) (In Russ.).
  12. Coal will continue to play an important role. An exclusive interview with Sergey Tsivilev. *Ugol' Kuzbassa*. 2024;(1):4–6. (In Russ.).
  13. Rainesh E. The return of flexible ones. *Ugol' Kuzbassa*. 2024;(2):25–27. (In Russ.).
  14. Alekseev L. Finding a way. *Ugol' Kuzbassa*. 2024;(3):8–12. (In Russ.).
  15. Sahakyan Yu. Where can I get the money? *Ugol' Kuzbassa*. 2024;(2):55–57. (In Russ.).
  16. *The territorial body of the Federal State Statistics Service for the Kemerovo region – Kuzbass*. – URL: <http://service.kemerovostat.gks.ru/bgd/EJEGOD/issWWW.exe/Stg/2022/4.%20%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5.htm> (Accessed: 20.10.2024) (In Russ.).
  17. Paul Brighton. *Flexibility. The Encyclopedia of Human Resource Management*. St. Petersburg: Peter, 2002:1200. (In Russ.).
  18. Schuler R.S. *Human resource management. The Encyclopedia "Human Resource Management"*. St. Petersburg: Peter, 2002:1200. (In Russ.).
  19. Armstrong M. *The main HR textbook in the world*. Moscow: Eksmo, 2019:416. (In Russ.).
  20. Rean A.A. *Psychology of personality*. St. Petersburg: St. Petersburg, 2016:276. (In Russ.).
  21. Federal Law No. 116-FZ dated 07/21/1997 (as amended on 08.08.2024) "On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities" (with amendments and additions, introduction. effective from 09/01/2024)
  22. *Weekly magazine "Arguments and Facts" No. 37. AIF in Kuzbass No. 37.* – URL: <https://kuzbass.aif.ru/society/-gryaznee-vseh-kuzbass-glavnyy-generator-promyshlennogo-musorav-strane> (Accessed: 20.10.2024) (In Russ.).

**Сведения об авторах**

**Татьяна Олеговна Горлатова**, аспирант, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** gorlatova.to@new-mmс.com  
**ORCID:** 0009-0003-6815-812X

**Татьяна Викторовна Петрова**, д.э.н., профессор кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** ptrvt@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0002-5399-9060  
**SPIN-код:** 2639-3613

**Information about the authors**

**Tatyana O. Gorlatova**, post-graduate student, Siberian State Industrial University  
**E-mail:** gorlatova.to@new-mmс.com  
**ORCID:** 0009-0003-6815-812X

**Tatyana V. Petrova**, Doctor of Economics, Professor Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University

**E-mail:** ptrvt@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0002-5399-9060  
**SPIN-код:** 2639-3613

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 28.10.2024

После доработки 05.11.2024

Принята к публикации 07.11.2024

Received 28.10.2024

Revised 05.11.2024

Accepted 07.11.2024

**Оригинальная статья**

УДК 336.663:334.012.64

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-147-159

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРОТНЫМ  
КАПИТАЛОМ И ЛИКВИДНОСТЬЮ МАЛЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТРАСЛИ  
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК**

© 2024 г. Е. В. Иванова, А. А. Касацкая

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

**Аннотация.** На основе исследования сущности, принципов и нормативно-правовых основ управления оборотным капиталом и ликвидностью организации показана значимость эффективного управления оборотными активами организации, обеспечивающее инвестирование текущей деятельности, снижение рисков потери финансовой устойчивости и рост доходов деятельности. На примере конкретной организации Кемеровской обл. – Кузбасса отражены особенности управления оборотным капиталом малых предприятий в сфере научных исследований и разработок: отсутствие потребности в формировании и поддержании необходимого уровня запасов; высокая доля дебиторской задолженности; работа с контрагентами на условиях предоставления отсрочки платежа. Проведенный анализ финансового состояния, финансовой устойчивости, деловой активности, содержания и условий функционирования системы управления оборотным капиталом и ликвидностью организации позволил выявить резервы повышения эффективности управления оборотным капиталом. Исследование процесса управления дебиторской задолженностью показало, что при возникновении просроченной задолженности сотрудники организации реализуют комплекс мер досудебного урегулирования конфликта и при необходимости доводят дело до судебного разбирательства. При этом действия превентивного характера в организации осуществляются в недостаточном объеме. Выявлено отсутствие закрепления отдельных функций по управлению дебиторской задолженностью за конкретными работниками организации и недостаточное использование доступных источников информации для предварительного анализа контрагентов, что обусловило снижение эффективности управления оборотным капиталом. По результатам исследований разработаны рекомендации по повышению доходности при сохранении приемлемого уровня ликвидности предприятия, что, в свою очередь, приведет к росту доходов организации, показателей оборачиваемости активов и свободных денежных средств.

**Ключевые слова:** малые предприятия, оборотный капитал, ликвидность, управление оборотным капиталом, дебиторская задолженность

**Для цитирования:** Иванова Е.В., Касацкая А.А. Совершенствование системы управления оборотным капиталом и ликвидностью малых предприятий отрасли научных исследований и разработок. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2024;4(50):147–159. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-147-159](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-147-159)

**Original article**

**IMPROVING THE WORKING CAPITAL AND LIQUIDITY MANAGEMENT SYSTEM  
OF SMALL ENTERPRISES IN THE RESEARCH AND DEVELOPMENT INDUSTRY**

© 2024 г. E. V. Ivanova, A. A. Kasatskaya

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

**Abstract.** Based on the study of the essence, principles and regulatory framework of the management of working capital and liquidity of the organization, the importance of effective management of the current assets of the organization is shown, ensuring the investment of current activities, reducing the risks of loss of financial stability and income growth activities. Using the example of a specific organization of the Kemerovo region – Kuzbass, the peculiarities of working capital management of small enterprises in the field of research and development are reflected: the lack of need to form and maintain the necessary level of reserves; a high proportion of accounts receivable; work with counterparties on the terms of payment deferral. The analysis of the financial condition, financial stability, business activity, content and operating conditions of the organization's working capital and liquidity management system made it possible to identify reserves for improving the efficiency of working capital management. A study of the accounts receivable management process has shown that in the event of an overdue debt, the organization's employees implement a set of measures for pre-trial settlement of the conflict and, if necessary, bring the case to trial. At the same time, preventive actions in the organization are carried out in insufficient volume. The lack of consolidation of certain functions for managing accounts receivable for specific employees of the organization and insufficient use of available information sources for preliminary analysis of counterparties was revealed, which led to a decrease in the efficiency of turnover capital management. Based on the results of the research, recommendations have been developed to increase profitability while maintaining an acceptable level of liquidity of the enterprise, which, in turn, will lead to an increase in the organization's income, asset turnover and free cash.

**Keywords:** small enterprises, working capital, liquidity, working capital management, accounts receivable

**For citation:** Ivanova E.V., Kasatskaya A.A. Improvement of the working capital and liquidity management system of small enterprises in the field of scientific research and development. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):147–159. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-14-159](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-14-159)

## Введение

Нестабильность тенденций национальной экономики, санкционные направления политики зарубежных стран в отношении российского бизнеса ставят во главу угла необходимость тщательно и взвешенно давать оценку эффективности деятельности коммерческой организации и анализировать достигнутый финансовый результат работы за отчетный период.

Необходимым условием конкурентной борьбы организаций в кризисный период существования экономических отношений является умение выстроить свою деятельность с целью достижения максимального финансового результата, а также предпринять последующие меры по его эффективному использованию.

В работах [1 – 5] показана прямая взаимосвязь между финансовыми результатами деятельности организации и эффективностью управления ее оборотным капиталом и ликвидностью. Вопросам оценки эффективности управления оборотным капиталом и ликвидностью организации в российской и зарубежной экономической науке было уделено уже немало внимания [6 – 9].

В работах [10 – 14] подчеркивается специфика рассматриваемой экономической категории, которая заключается в том, что любой элемент оборотных активов находится под влиянием большого числа изменяющихся экзогенных факторов, на которые хозяйствующий субъект не всегда может повлиять. Существуют отраслевые

особенности структуры оборотного капитала, изучению которых в большей степени посвящены работы [15; 16], освещающие деятельность компаний, котирующих свои ценные бумаги на фондовых биржах.

Важно отметить, что отраслевые особенности и размер компании, безусловно, оказывают существенное влияние на формирование стратегии управления оборотным капиталом [17 – 19]. Основная проблема управления оборотным капиталом в малом бизнесе состоит в том, что собственникам и менеджерам компаний, как правило, доступен более ограниченный спектр инструментов управления.

В этой связи целью настоящей работы является обоснование направлений совершенствования управления оборотным капиталом и ликвидностью малого предприятия, осуществляющего деятельность в сфере научных исследований и разработок.

Информационной основой выступили данные управленческой и финансовой отчетности исследуемой организации, инструктивные и нормативные материалы, статистическая информация официальных сайтов Федеральной службы государственной статистики РФ, рейтингового агентства «Эксперт РА», Центрального Банка РФ, Министерства финансов РФ, периодической печати.

Для достижения поставленной цели в работе использовали методы анализа, синтеза, аналогии, обобщения, классификации, сравнения.

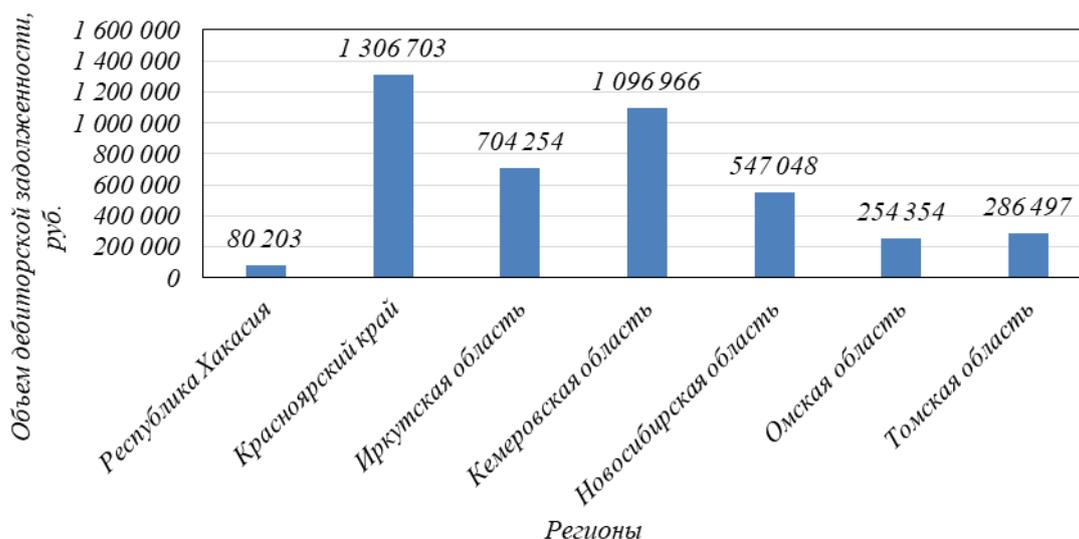


Рис. 1. Объем дебиторской задолженности по регионам Сибирского федерального округа в 2022 г.  
Fig. 1. The volume of accounts receivable by regions of the Siberian Federal District in 2022

### Результаты исследования

Оборотный капитал – необходимое условие для стабильного и устойчивого функционирования каждого предприятия. Он обеспечивает финансовую гибкость и позволяет компании своевременно выполнять текущие обязательства, поддерживать операционную деятельность, управлять ликвидностью и минимизировать риски кассовых разрывов. За счет ускорения оборачиваемости капитала хозяйствующий субъект увеличивает свои финансовые показатели и эффективность деятельности, генерирует прибыль. Он способен справиться с воздействием участвующих в настоящее время негативных факторов воздействия внешней среды. Одним из ключевых элементов оборотного капитала является дебиторская задолженность.

По данным Росстата суммарный объем дебиторской задолженности в Российской Федерации составил 80 трлн рублей в 2022 г.<sup>1</sup> Это свидетельствует о значительном объеме обязательств контрагентов перед предприятиями, что может оказывать негативное влияние на финансовую устойчивость и ликвидность последних. Из общего объема дебиторской задолженности на регионы Сибирского федерального округа (СФО) приходится 4,5 трлн руб. (5,6 %). Среди регионов СФО наибольший объем дебиторской задолженности имеет Красноярский край (рис. 1). Это объясняется тем, что в регионе расположено большое количество производственных предприятий, имеющих длительный операционный цикл.

<sup>1</sup>Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения 31.10.2024).

При этом наибольшая концентрация просроченной дебиторской задолженности приходится на предприятия Кемеровской обл. (рис. 2), ввиду того, что основная отрасль региона – добыча угля. Кузбасс добывает около 50 % от общего объема российского угля и 60 % наиболее ценных коксующихся марок. Рассматриваемая проблема отрасли имеет устойчивый характер на протяжении нескольких лет из-за волатильности рыночной конъюнктуры, большого объема расчетов контрагентов в этом секторе, в том числе из-за частого использования схем отсрочки платежей. Таким образом, грамотно выстроенная система и процесс управления оборотным капиталом и ликвидностью обеспечивают финансовую устойчивость и адаптацию к изменяющимся условиям внешней среды.

Основными элементами системы управления оборотным капиталом, на которые можно воздействовать с целью повышения эффективности управления, являются следующие:

- организационная структура (определяется ответственностью различных подразделений и сотрудников за управление составляющими оборотного капитала (запасы, дебиторская задолженность, денежные средства), включает распределение функций между финансовым отделом, бухгалтерией и отделами, отвечающими за закупки, продажи и производство);

- финансовая политика (стратегия, устанавливающая ключевые принципы управления активами и обязательствами; в ней определяется допустимый уровень ликвидности, кредитная политика, а также подходы к поддержанию оптимального уровня запасов и планированию денежных потоков);

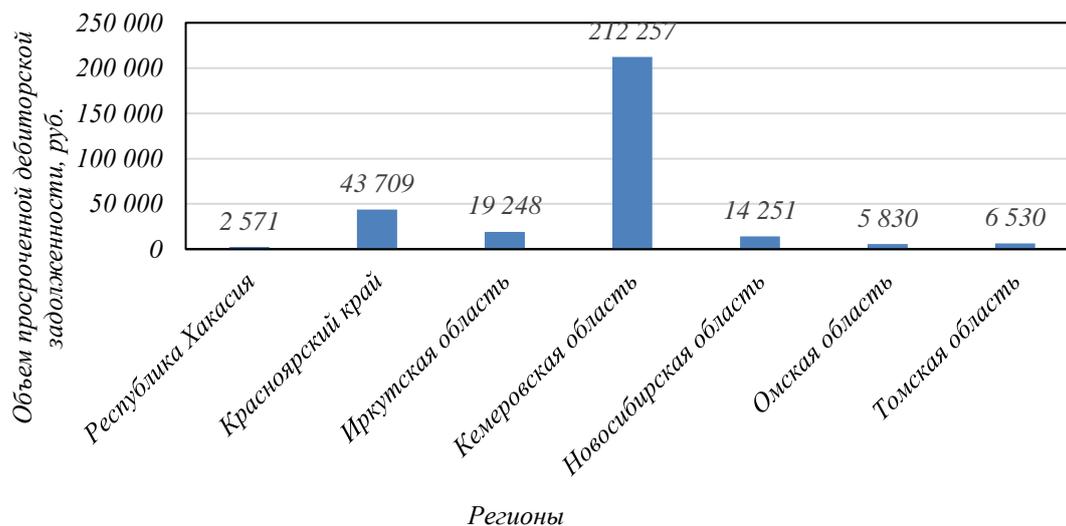


Рис. 2. Статистика просроченной дебиторской задолженности по регионам Сибирского федерального округа за 2022 г.  
Fig. 2. Statistics of overdue accounts receivable by regions of the Siberian Federal District for 2022

– методы и инструменты (используются для контроля и оптимизации оборотного капитала, включают ABC-анализ запасов для определения наиболее значимых компонентов; кредитные лимиты для дебиторской задолженности; инструменты планирования и прогнозирования денежного потока; коэффициентный анализ ликвидности для оценки способности компании своевременно выполнять обязательства; далеко не все известные методы могут использоваться малым предприятием, действующим на региональном рынке; анализ условий осуществления факторинговых, форфейтинговых и вексельных операций показал нецелесообразность их использования для управления дебиторской задолженностью малого предприятия в СФО в связи с их дороговизной и возрастанием временных затрат на подготовку и оформление необходимых документов;

– информационная подсистема (сбор, обработка и анализ данных по оборотному капиталу и ликвидности; обеспечивает финансовую отчетность и дает возможность проводить оперативный анализ, мониторинг и корректировки поставленных целей или применяемых методов и инструментов).

Информационное обеспечение управления оборотным капиталом осуществляется на основе внутренней и внешней информации. Ключевыми источниками информации являются бухгалтерская и управленческая отчетности, данные финансового учета, а также внешние данные о рыночных условиях и нормативные документы.

Средства (запасы, дебиторская задолженность и краткосрочные финансовые вложения), вложенные в оборотные активы, обеспечивают текущие потребности бизнеса, но имеют ограниченную доходность. Компании с избыточным

оборотным капиталом могут оказаться не в состоянии генерировать ожидаемую инвесторами доходность с инвестированного капитала, определяемую как отношение операционной прибыли к сумме собственного капитала и долгосрочных обязательств. Поэтому при определении оптимального уровня оборотного капитала ключевым становится поиск баланса между его достаточностью для обеспечения ликвидности и способностью генерировать прибыль, что позволит удовлетворить требования инвесторов.

На практике идеальный уровень оборотного капитала часто оказывается недостижим из-за внешних факторов (ненадежность поставок, влияющую на объем необходимых запасов), неподконтрольных руководству организации [20]. В этом контексте компании следует избегать экстремальных сценариев:

1. Недостаточный объем оборотного капитала, не позволяющий поддерживать нормальную хозяйственную деятельность, что может привести к увеличению зависимости от краткосрочного финансирования по сравнению с долгосрочным и усугубить финансовую уязвимость организации.

2. Избыточная капитализация (компания располагает слишком большим объемом оборотного капитала, что снижает общую эффективность и доходность бизнеса).

3. Избыточная дебиторская задолженность (большой объем непогашенной задолженности увеличивает риск неплатежей и может привести к дефициту денежных средств). Отсутствие эффективного управления оборотным капиталом и недостаточный уровень ликвидности действительно могут ограничивать способность компании своевременно выполнять свои финансовые обязательства.

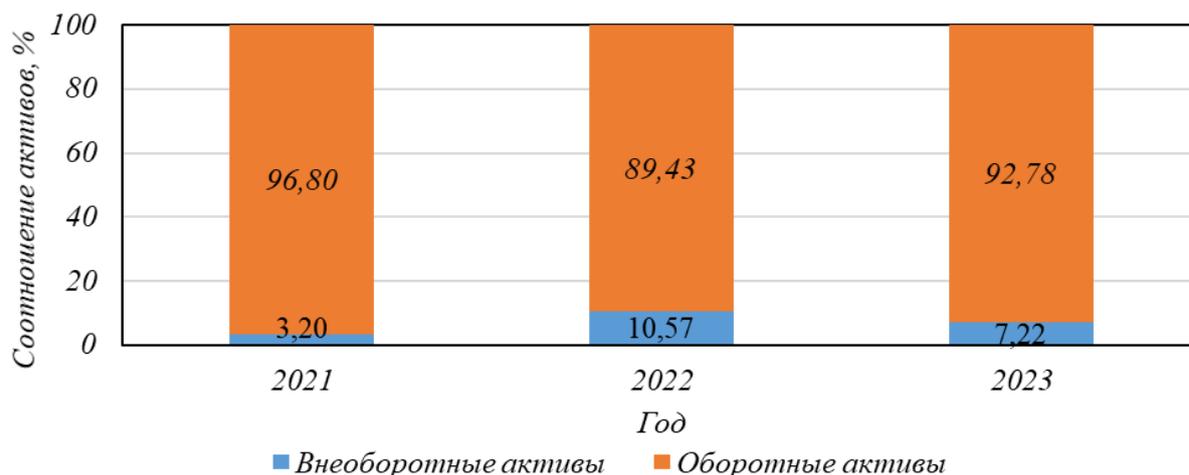


Рис. 3. Динамика структуры активов ООО «НИЦ СУ» за 2021 – 2023 гг.

Fig. 3. Dynamics of the asset structure of SIC SU LLC for 2021 – 2023

4. Переизбыток денежных средств (держать слишком много денег на счетах с низкой доходностью неэффективно, так как эти средства могли бы приносить доход, если бы были вложены в другие активы или проекты).

5. Проблемы с ликвидностью (отсутствие достаточного объема ликвидных средств для покрытия текущих обязательств может привести к повышению объема кредиторской задолженности, штрафам и даже ухудшению кредитного рейтинга компании).

Во всех случаях оптимизация оборотного капитала требует тщательного анализа финансового положения и внешних условий, чтобы максимизировать как ликвидность, так и доходность без ущерба для устойчивости и роста компании.

Объектом настоящей работы является управление оборотным капиталом ООО «Научно-исследовательский центр систем управления» (ООО «НИЦ СУ»). Оно осуществляет свою деятельность на рынке оказания научных исследований и разработок в области естественных и технических наук уже 24 года в Кемеровской обл. Основной профиль исследований ООО «НИЦ СУ» – исследования в области угольной промышленности, разработка новых технологий добычи, переработки угля, а также проведение иных изысканий и исследований, направленных на повышения эффективности осуществления добычи угля в регионе.

Проведенный анализ структуры баланса организации показал, что в составе активов преобладают оборотные активы [21]. Стоимость внеоборотных активов за 2021 – 2023 гг. возросла на 820 тыс. руб., в то время как оборотные активы увеличились на 4 348 тыс. руб.

Оборотные активы организации включают дебиторскую задолженность и денежные средства (рис. 3). В 2021 – 2023 гг. были выявлены следующие тенденции:

– дебиторская задолженность уменьшилась на 299 тыс. руб. (–4,65 %);

– сумма денежных средств увеличилась на 4647 тыс. руб. (+107,27 %).

Снижение объема дебиторской задолженности и увеличение суммы денежных средств можно рассматривать как позитивную тенденцию с точки зрения обеспечения ликвидности баланса. Запасы в структуре оборотных активов ООО «НИЦ СУ» отсутствуют в силу нематериального характера основной деятельности организации. В составе пассива баланса присутствуют собственные и заемные средства (рис. 4).

За 2021 – 2023 гг. сумма собственных средств организации выросла на 4 950 тыс. руб. (+44,61 %). Заемные средства рассматриваемой организации представлены только краткосрочными обязательствами, состоящими из кредиторской задолженности. На протяжении анализируемого периода краткосрочные обязательства увеличились на 218 тыс. руб. (838,46 %) преимущественно за счет роста обязательств перед бюджетом, возникших в результате изменения порядка уведомления и уплаты НДС в бюджет в 2023 г.

Наибольший удельный вес в структуре пассивов организации занимают собственные источники финансирования (99,77 и 98,5 % в 2021 и 2023 гг.).

Анализ показателей оборачиваемости и продолжительности одного оборота показал, что деловая активность ООО «НИЦ СУ» находится в пределах нормы, значительных изменений показателей деловой активности не наблюдается (табл. 1). Зафиксировано равновесие показателей оборачиваемости с позитивной и негативной динамикой.

В 2021 и 2022 гг. основную долю в структуре оборотных активов имела дебиторская задолженность (рис. 5). При этом ее удельный вес за 2022 г. (относительно 2021 г.) вырос на 6,81 %.



Рис. 4. Динамика структуры пассивов ООО «НИЦ СУ» за 2021 – 2023 гг.  
Fig. 4. Dynamics of the structure of liabilities of SIC SU LLC for 2021 – 2023

В 2023 г. наблюдаются изменения в структуре оборотных активов: удельный вес денежных средств увеличился до 59,4 %.

Исследование финансовой устойчивости организации показало, что все коэффициенты находятся выше нормы (рис. 6), что свидетельствует об абсолютной финансовой устойчивости организации и ее высокой способности успешно справляться с выполнением своих обязательств.

Динамика дебиторской задолженности организации в 2021 – 2023 гг. нестабильна (табл. 2): в 2021 – 2022 зафиксирован рост дебиторской задолженности, в 2023 – снижение. Объем денежных средств вырос более, чем вдвое. Такой прирост денежных средств свидетельствует о значительном повышении ликвидности ООО «НИЦ СУ».

На рис. 7 представлена динамика дебиторской задолженности за период 2021 – 2023 гг., в том числе просроченной, которая свидетельствует о низком качестве дебиторской задолженности: просроченная дебиторская задолженность составляет 70 – 90 % от общей. Такая ситуация вызвана прежде всего кризисом платежей, который сложился после пандемии COVID-19: ограничительные меры способствовали росту объема неплатежей у многих коммерческих предприятий, особенно малого предпринимательства.

Исследование процесса управления дебиторской задолженностью в части работы с просроченной задолженностью (рис. 8) позволило выявить, что предпринимаемые меры не способствуют эффективному управлению просроченной дебиторской задолженностью и минимизации ее негативного влияния на финансовое состояние компании в силу отсутствия превентивных мероприятий.

Кроме того, обнаружены следующие негативные моменты:

- снижение скорости оборота денежных средств на 18,13 % за рассматриваемый период;

- стабильно высокий уровень дебиторской задолженности (6 435 тыс. руб. на 31.12.2021 г. и 6136 тыс. руб. на 31.12.2023 г.);

- значительное отклонение (на 18,13 %) показателя соотношения дебиторской и кредиторской задолженностей от оптимального значения;
- негативная динамика коэффициентов платежеспособности;

- отсутствие политики по управлению оборотным капиталом и ликвидностью организацией;

- отсутствие ясных целей и реализации конкретных функций по управлению оборотным капиталом.

Оценка оптимального остатка денежных средств организации по модели Баумоля позволила установить более чем десятикратное превышение фактического остатка денежных активов на счете организации по сравнению с оптимальным значением.

Совершенствование управления оборотным капиталом ООО «НИЦ СУ» возможно по следующим направлениям:

- размещение свободных денежных средств организации на банковском вкладе;

- совершенствование системы управления дебиторской задолженностью (введение в организации новой должности финансового менеджера; расширение применяемого информационно-аналитического инструментария управления дебиторской задолженностью).

С целью повышения эффективности управления оборотным капиталом целесообразно разместить денежные средства организации сверх оптимального остатка, позволяющего обеспечивать осуществление текущей деятельности компании, на депозите (табл. 3).

Сравнение условий открытия депозитов в трех кредитных организациях показывает, что наибо-

Т а б л и ц а 1

**Анализ деловой активности ООО «НИЦ СУ» за 2021 – 2023 гг.**  
**Analysis of the activities of the ООО "Nic SU" for 2021 – 2023**

Показатели	Значение показателя по годам			Абсолютные изменения, тыс. руб.			Темпы роста, %		
	2021	2022	2023	2022 г. к 2021 г.	2023 г. к 2022 г.	2023 г. к 2021 г.	2022 г. к 2021 г.	2023 г. к 2022 г.	2023 г. к 2021 г.
<i>Коэффициенты оборачиваемости, оборотов/год</i>									
Имущества	0,945	0,835	1,106	-0,110	0,271	0,161	88,36	132,46	117,04
Внеоборотных активов	29,514	7,896	15,327	-21,618	7,431	-14,187	26,75	194,11	51,93
Основных средств (фондоотдача)	29,514	7,896	15,327	-21,618	7,431	-14,187	26,75	194,11	51,93
Оборотных активов	0,976	0,933	1,192	-0,043	0,259	0,216	95,59	127,76	122,13
Собственного капитала	0,947	0,837	1,123	-0,110	0,286	0,176	88,38	134,17	118,59
Заемного капитала	404,115	273,118	73,869	-130,997	-199,249	-330,246	67,58	27,05	18,28
Запасов	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Дебиторской задолженности	1,633	1,402	2,937	-0,231	1,535	1,304	85,85	209,49	179,85
Кредиторской задолженности	404,115	273,118	73,869	-130,997	-199,249	-330,246	67,58	27,05	18,28
<i>Продолжительность одного оборота (360/соответствующий коэффициент оборачиваемости), дней/оборот</i>									
Имущества	381,00	431,00	325,00	50,00	-106,00	-56,00	113,12	75,41	85,30
Внеоборотных активов	12,00	46,00	23,00	34,00	-23,00	11,00	383,33	50,00	191,67
Основных средств	12,00	46,00	23,00	34,00	-23,00	11,00	383,33	50,00	191,67
Оборотных активов	369,00	386,00	302,00	17,00	-84,00	-67,00	104,61	78,24	81,84
Собственного капитала	380,00	430,00	321,00	50,00	-109,00	-59,00	113,16	74,65	84,47
Заемного капитала	1	1	5	0	4	4	100	500	500
Запасов	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Дебиторской задолженности	220,00	257,00	123,00	37,00	-134,00	-97,00	116,82	47,86	55,91
Кредиторской задолженности	1	1	5	0	4	4	100	500	500

Т а б л и ц а 2

**Анализ динамики оборотных активов ООО «НИЦ СУ»**  
**Analysis of the dynamics of current assets of SIC SU LLC**

Показатель	Значение показателя, тыс. руб.			Абсолютное изменение, тыс. руб.			Темп роста, %		
	2021	2022	2023	2022 г. к 2021 г.	2023 г. к 2022 г.	2023 г. к 2021 г.	2022 г. к 2021 г.	2023 г. к 2022 г.	2023 г. к 2021 г.
Оборотные активы:				-818	5 166	4 348	92,40	151,92	140,38
финансовые и другие оборотные активы (дебиторская задолженность)	6435	6624	6136	189	-488	-299	102,94	92,63	95,35
денежные средства	4332	3325	8 979	-1007	5654	4647	76,75	270,05	207,27

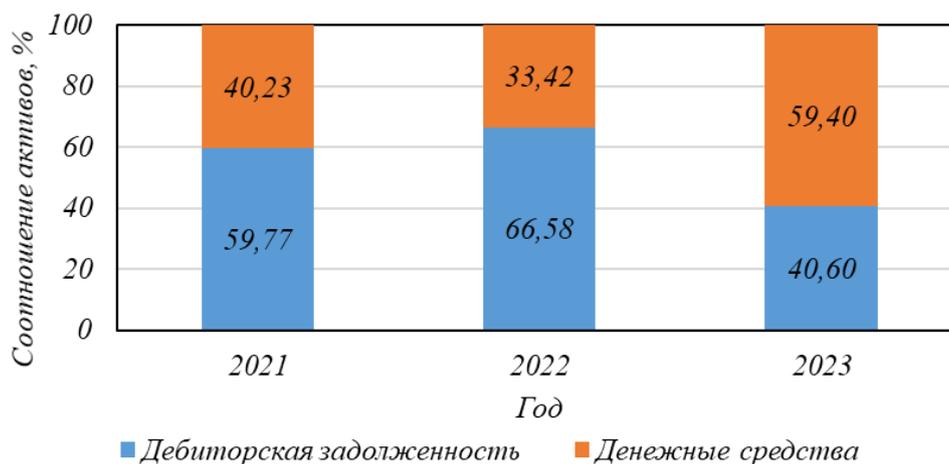


Рис. 5. Динамика структуры оборотных активов ООО «НИЦ СУ» за 2021 – 2023 гг.  
 Fig. 5. Dynamics of the structure of current assets of NITS SU LLC for 2021 – 2023

лее выгодным для ООО «НИЦ СУ» является вклад в ВТБ банке. Однако наличие расчетного счета ООО «НИЦ СУ» и возможность получения льготного тарифного обслуживания при открытии депозита делает хранение остатков денежных средств в ПАО «Сбербанк» более привлекательным. При размещении 3 000 тыс. рублей на срок три месяца организация получит дополнительный доход в размере 143 410 рублей.

Ввод новой должности повлечет за собой изменения в организационной структуре ООО «НИЦ СУ» (рис. 9).

Новый сотрудник должен напрямую подчиняться заместителю директора, так как в обязанности последнего входит заключение договоров с новыми клиентами. На этом этапе необходимо очень внимательно проанализировать договор, внести соответствующие корректировки, особенно это касается пунктов об отсрочке платежа, штрафных санкциях. Важно на этом этапе

проанализировать текущее финансовое положение контрагента, его платежеспособность, вероятность банкротства.

Для этой цели можно использовать как интернет-сервисы, предоставляющие информацию в открытом доступе, так и платные сервисы, которые предлагают специализированные сведения. Среди недобросовестных клиентов ООО «НИЦ СУ» присутствовало предприятие X (рис. 10), имевшее на момент заключения договора неудовлетворительное финансовое состояние и высокую вероятность банкротства. Наличие в организации лица, в функции которого входил бы превентивный анализ платежеспособности контрагентов, и использование открытых сервисов оценки контрагентов позволило бы организации избежать возникновения просроченной задолженности, а в последствии и потери денежных средств.

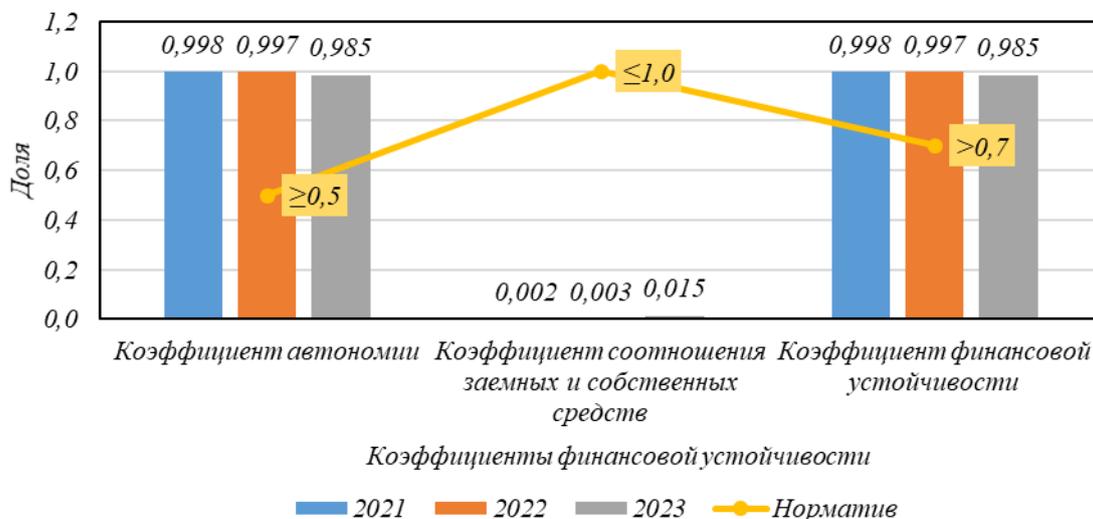


Рис. 6. Анализ финансовой устойчивости ООО «НИЦ СУ»  
 Fig. 6. Analysis of the financial stability of NITS SU LLC

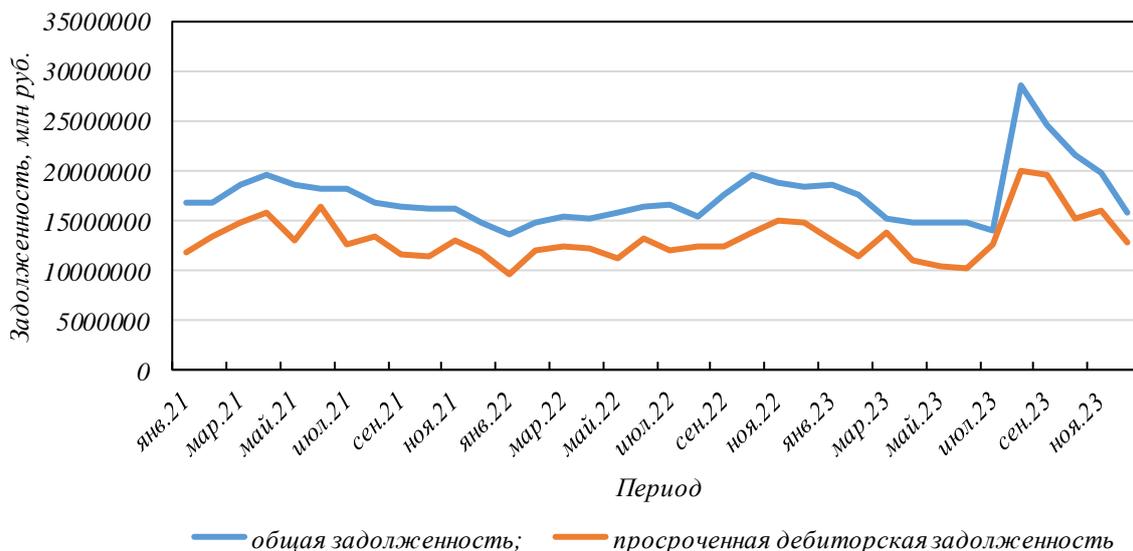


Рис. 7. Динамика дебиторской задолженности ООО «НИЦ СУ» за 2021 – 2023 гг.  
 Fig. 7. Dynamics of accounts receivable of NITS SU LLC for 2021 – 2023

С целью оценки эффекта от проектируемых мероприятий воспользуемся методом сценарного подхода (методом прогнозирования и планирования), при котором разрабатываются несколько возможных сценариев развития событий (табл. 4). Он позволяет учитывать различные внешние и внутренние факторы, чтобы подготовиться к неопределенностям и минимизировать потенциальные риски.

Среднее ожидаемое изменение дебиторской задолженности, полученное с использованием сценарного подхода, составит

$$3\,068\,000 \cdot 0,3 + 0 \cdot 0,2 + 1\,534\,000 \cdot 0,5 = 997\,100 \text{ рублей.}$$

Суммарный ожидаемый доход от предложенных мероприятий, связанных с размещением

на банковском депозите остатка денежных средств организации и снижением объема дебиторской задолженности вследствие более тщательного анализа платежеспособности контрагентов и регулярного мониторинга дебиторской задолженности и сроков ее погашения финансовым менеджером, введенным в штат организации, составит:

$$997\,100 + 143\,410 = 1\,140\,510 \text{ рублей.}$$

Экономический эффект как разница между прогнозируемым доходом и затратами, включающие затраты на оплату труда нового сотрудника с учетом районного коэффициента и отчислений в социальные фонды (при условии работы нового сотрудника на условиях неполного рабо-

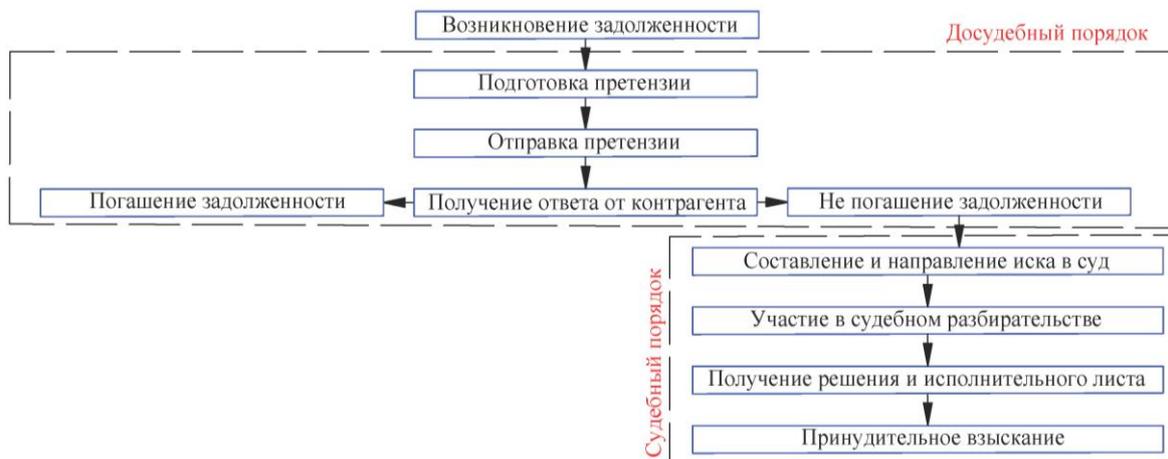


Рис. 8. Этапы процесса управления просроченной дебиторской задолженностью  
 Fig. 8. Stages of the overdue accounts receivable management process

## Варианты размещения денежных средств на банковском вкладе

## Options for placing funds on a bank deposit

Банк	Сумма депозита, руб.	Процентная ставка, %	Количество дней, дни	Сумма в конце срока, руб.	Доход для организации, руб.
Т-банк	3 000 000	18	90	3 137 035	137 035
ПАО «Сбербанк»	3 000 000	19	90	3 143 410	143 410
ВТБ	3 000 000	19,9	90	3 148 568	148 568

чего дня), оценивается в год в размере 673 590 руб. Эффективность проектных решений как отношение эффекта к затратам, обусловившим данный эффект, составит 1,44 руб./руб., что подтверждает целесообразность реализации проектных решений.

**Выводы**

Проведенное исследование динамики величины и структуры оборотного капитала малого предприятия, функционирующего в сфере научных исследований и разработок, обусловило целесообразность осуществления следующих проектных решений:

– размещение временно свободных денежных средств организации, оцененных с использованием модели Баумоля, на банковском вкладе, что обеспечит повышение уровня доходности организации;

– введение в организации новой должности финансового менеджера, что позволит улучшить систему планирования и контроля финансово-хозяйственной деятельности организации;

– расширение информационно-методического инструментария управления дебиторской задолженностью, что будет способствовать ее снижению, в том числе просроченной.

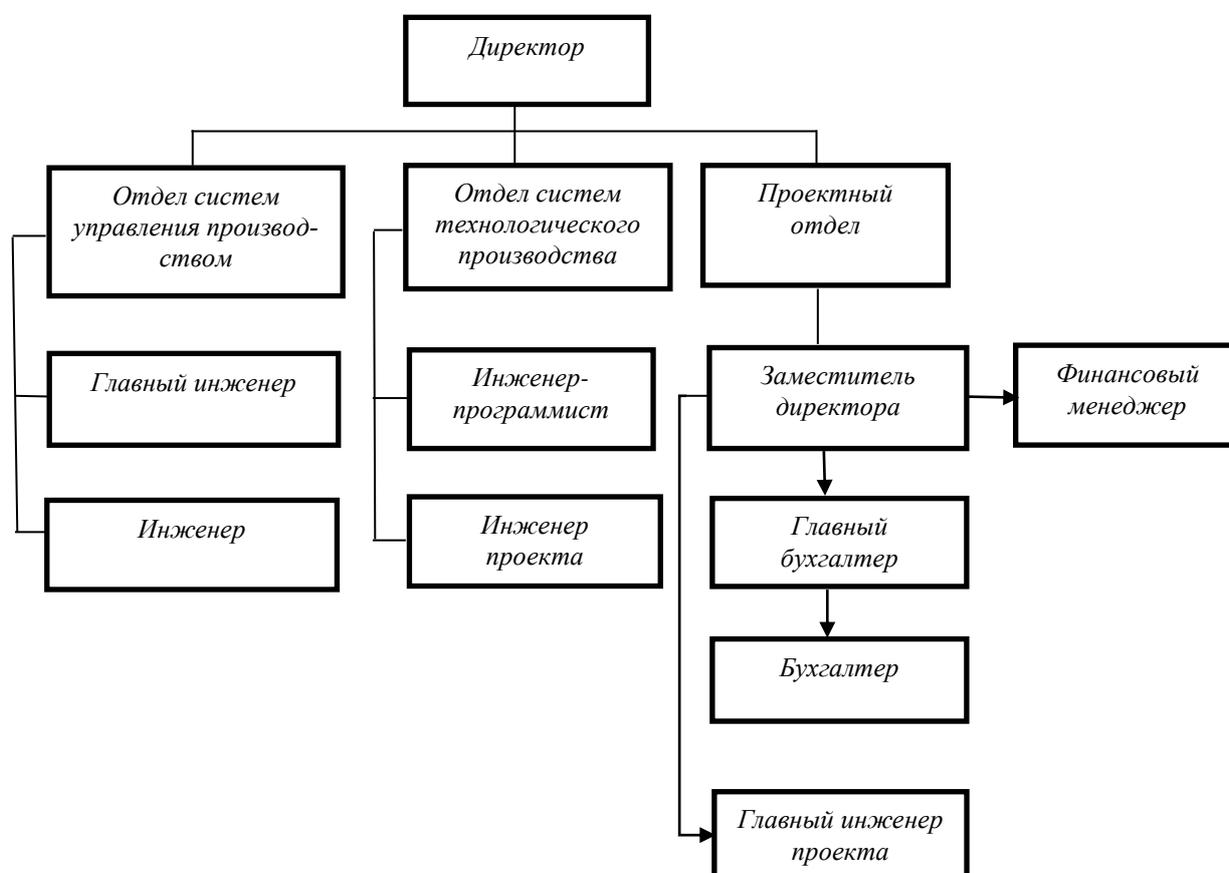


Рис. 9. Проектируемая организационная структура ООО «НИЦ СУ»

Fig. 9. The projected organizational structure of SIC SU LLC

Финансовые результаты за период 01.01.23 – 31.12.23	Финансовое положение на 31.12.2023									
	AAA	AA	A	BBB	BB	B	CCC	CC	C	D
Отличные (AAA)										
Очень хорошие (AA)										
Хорошие (A)										
Положительные (BBB)										
Нормальные (BB)							✓			
Удовлетворительные (B)										
Неудовлетворительные (CCC)										
Плохое (CC)										
Очень плохое (C)										
Критическое (D)										

Рис. 10. Анализ финансового состояния предприятия X  
Fig. 10. Analysis of the financial condition of the enterprise X

Эффект реализации предложенных мероприятий составит 673 590 рублей, эффективность проектных решений – 144,26 %. Данные предложения окажут позитивное воздействие на скорость оборота оборотных активов и достижение оптимального соотношения «ликвидность – доходность» активов малого предприятия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чаплыгина М.А., Семенова О.С., Зубкова Т.А., Кузьмичева И.Г. Применение финансово-аналитических методов в управлении оборотным капиталом хозяйствующих субъектов как условие обеспечения их конкурентоспособности. *Регион: системы, экономика, управление*. 2021;4(55):169–179.
2. Li K., Musah M., Kong Y., Mensah I.A., Antwi S.K., Bawuah J. Liquidity and firms' financial performance nexus: panel evidence from nonfinancial firms listed on the Ghana Stock Exchange. *SAGE Open*. 2020;10(3): 2158244020950363.
3. Panigrahi C.M. Working Capital Management and Corporate Profitability: A Panel Data Regression Model Analysis of Indian Cement Companies. *Wutan Huatan Jisuan Jishu*. 2020;16:245–67.
4. Prasad P., Sivasankaran N., Shukla A. Impact of deviation from target working capital on firm profitability: evidence from India's. *Int J Prod Performance Manag*. 2019;68(8):1510–27.
5. Prasad P., Sivasankaran N., Paul S., Kannadhasan M. Measuring the impact of working capital efficiency on the financial performance of a firm: An alternative approach. *J Indian Business Res*. 2019;11(1):75–94.
6. Газдиев И.И. Оптимизация структуры оборотного капитала как способ повышения финансовой устойчивости современных ИТ-компаний. *Финансовая экономика*. 2019;4:1115–1120.
7. Коньшева И.М. Управление оборотным капиталом фирмы. *Вестник Тульского филиала Финуниверситета*. 2022;1:105–107.
8. Папалашев А.А. Оборотный капитал: сущность, управление и нормирование. *Управленческий учет*. 2023;2:229–236.
9. Kawakibi A.A., Hadiwidjojo D. The effect of working capital management on company profits and values (study of cement companies listed on the Indonesian stock exchange). *Int J Business Econ Law*. 2019;20(5):30–37

Т а б л и ц а 4

#### Сценарии изменения объема дебиторской задолженности при реализации проектных решений по управлению дебиторской задолженностью

#### Scenarios of changes in the volume of accounts receivable in the implementation of project solutions for managing accounts receivable

Сценарий	Прогнозируемое изменение дебиторской задолженности, руб.	Вероятность сценария, доли единицы
Оптимистический	3 068 000	0,3
Пессимистический	0	0,2
Наиболее вероятный	1 534 000	0,5

10. Шевченко Т.А. Определение целевой функции процесса бюджетирования, как фактор эффективного управления оборотным капиталом. *Отходы и ресурсы*. 2022;1:1–11.
11. Сукманов Э.В. Экономический анализ оборотных средств предприятия. *Политика, экономика и инновации*. 2021;3(38):1–5.
12. Matar A, Eneizan B.M. Determinants of financial performance in industrial firms: Evidence from Jordan. *Asian J Agricul Extension*. 2018;1–10.
13. Шанин И.И., Новикова З.Н. Основные подходы по управлению оборотным капиталом организации. В кн.: *Экономический рост как основа устойчивого развития России. Сборник научных статей участников 7-й Всероссийской научно-практической конференции*. Курск: Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Курский филиал; Курская региональная общественная организация общероссийской общественной организации «Вольное экономическое общество России», 2022: 304–307.
14. Nwude E.C., Allison P.U., Nwude C.A. The relationship between working capital management and corporate returns cements the industry of emerging markets. *Int J Fin Econ*. 2020;26(3):3222–3235.
15. Dhar S. Analysing the impact of working capital management on profitability: A study on DSE listed cement companies in Bangladesh. *Glob J Manag Business Res*. 2018;26(3):3222–3235.
16. Kabuye F., Kato J., Akugizibwe I., Bugambiro N. Internal control systems, working capital management and financial performance of supermarkets. *Cogent Business Manag*. 2019; 6(1):1573524.  
<http://doi.org/10.1080/23311975.2019.1573524>
17. Азарова Л.В., Хоменко С.А. Особенности формирования оборотного капитала на предприятии с целью разработки эффективной стратегии управления. В кн.: *Цифровая экономика и общество. Материалы Всероссийской научно-практической конференции*. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2021:55–59.
18. Кызым Е.В. Методические основы управления оборотным капиталом предприятия. *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2024;6-2(112):21–23.
19. Panigrahi A. Working capital management strategies and financial performance: a cause-and-effect analysis. *Journal of Management Research and Analysis*. 2024;1(11):3–11.
20. Медведева Л.Б. Политика управления оборотным капиталом предприятия малого бизнеса. *Финансовая экономика*. 2019;10:603–605.
21. Касацкая А.А. Обоснование целесообразности управления дебиторской задолженностью ООО «Научно-исследовательский центр систем управления». В кн.: *Актуальные проблемы экономики и управления в XXI веке. Сборник научных статей IX Международной научно-практической конференции*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2023:60–64.

## REFERENCES

1. Chaplygina M.A., Semerova O.S., Zubkova T.A., Kuz'micheva I.G. Application of financial and analytical methods in the management of working capital of business entities as a condition for ensuring their competitiveness. *Region: sistemy, ekonomika, upravlenie*. 2021;4(55):169–179. (In Russ.)
2. Li K., Musah M., Kong Y., Mensah I.A., Antwi S.K., Bawuah J. Liquidity and firms' financial performance nexus: panel evidence from nonfinancial firms listed on the Ghana Stock Exchange. *SAGE Open*. 2020;10(3):2158244020950363.
3. Panigrahi C.M. Working Capital Management and Corporate Profitability: A Panel Data Regression Model Analysis of Indian Cement Companies. *Wutan Huatan Jisuan Jishu*. 2020;16:245–67.
4. Prasad P., Sivasankaran N., Shukla A. Impact of deviation from target working capital on firm profitability: evidence from India's. *Int J Prod Performance Manag*. 2019;68(8):1510–27.
5. Prasad P., Sivasankaran N., Paul S., Kannadhasan M. Measuring the impact of working capital efficiency on the financial performance of a firm: An alternative approach. *J Indian Business Res*. 2019;11(1):75–94.
6. Gazdiev I.I. Optimization of the working capital structure as a way to increase the financial stability of modern companies. *Finansovaya ekonomika*. 2019;4:1115–1120. (In Russ.)
7. Konyshcheva I.M. Management of the company's working capital. *Vestnik Tul'skogo filiala Fin-universiteta*. 2022;1:105–107. (In Russ.)
8. Papalashchev A.A. Working capital: essence, management and rationing. *Upravlencheskii uchet*. 2023;2:229–236. (In Russ.)
9. Kawakibi A.A., Hadiwidjojo D. The effect of working capital management on company profits and values (study of cement companies listed on the Indonesian stock exchange). *Int J Business Econ Law*. 2019;20(5):30–37
10. Shevchenko T.A. Definition of the target function of the budgeting process as a factor of effective working capital management. *Otkhody i resursy*. 2022;1:1–11. (In Russ.)

11. Sukmanov E.V. Economic analysis of working capital of the enterprise. *Politika, ekonomika i innovatsii*. 2021;3(38):1–5. (In Russ.).
12. Matar A, Eneizan B.M. Determinants of financial performance in industrial firms: Evidence from Jordan. *Asian J Agricul Extension*. 2018;1–10.
13. Shanin I.I., Novikova Z.N. Basic approaches to managing the working capital of an organization. In: *Economic growth as the basis for sustainable development of Russia. Collection of scientific articles by participants of the 7th All-Russian Scientific and Practical Conference*. Kursk: Finansovyi universitet pri Pravitel'stve Rossiiskoi Federatsii, Kurskii filial; Kurskaya regional'naya obshchestvennaya organizatsiya obshcherossiiskoi obshchestvennoi organizatsii «Vol'noe ekonomicheskoe obshchestvo Rossii», 2022:304–307. (In Russ.).
14. Nwude E.C., Allison P.U., Nwude C.A. The relationship between working capital management and corporate returns cements the industry of emerging markets. *Int J Fin Econ*. 2020;26(3):3222–3235.
15. Dhar S. Analysing the impact of working capital management on profitability: A study on DSE listed cement companies in Bangladesh. *Glob J Manag Business Res*. 2018;26(3):3222–3235.
16. Kabuye F., Kato J., Akugizibwe I., Bugambiro N. Internal control systems, working capital management and financial performance of supermarkets. *Cogent Business Manag*. 2019;6(1):1573524.  
<http://doi.org/10.1080/23311975.2019.1573524>
17. Azarova L.V., Khomenko S.A. Peculiarities of working capital formation in an enterprise in order to develop an effective management strategy. In: *Digital Economy and Society. Materials of the All-Russian scientific and practical conference*. Tver': Tverskoi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2021:55–59. (In Russ.).
18. Kyzym E.V. Metodicheskie osnovy upravleniya obrotным капиталом predpriyatiya. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika*. 2024; 6-2(112):21–23.
19. Panigrahi A. Working capital management strategies and financial performance: a cause-and-effect analysis. *Journal of Management Research and Analysis*. 2024;1(11):3–11.
20. Medvedeva L.B. Working capital management policy of a small business enterprise. *Finansovaya ekonomika*. 2019;10:603–605. (In Russ.).
21. Kasatskaya A.A. Justification of the expediency of managing accounts receivable of LLC Scientific Research Center for Management Systems. In: *Actual problems of economics and management in the XXI century. Collection of scientific articles of the IX International Scientific and Practical Conference*. Novokuznetsk: Sibirskii gosudarstvennyi industrial'nyi universitet, 2023:60–64.

**Сведения об авторах**

**Елена Владимировна Иванова**, к.э.н., заведующий кафедрой менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** ivanovaev75@mail.ru

**ORCID:** 0000-0003-3174-0426

**SPIN-код:** 3163-2542

**Анна Андреевна Касацкая**, преподаватель кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** annakastka@gmail.com

**SPIN-код:** 3202-1231

**Information about the authors:**

**Elena V. Ivanova**, Cand. Sci. (Econ.), Head of the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University

**E-mail:** ivanovaev75@mail.ru

**ORCID:** 0000-0003-3174-0426

**SPIN-код:** 3163-2542

**Anna A. Kazatskaya**, Lecturer at the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University

**E-mail:** annakastka@gmail.com

**SPIN-код:** 3202-1231

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 18.10.2024

После доработки 29.10.2024

Принята к публикации 31.10.2024

Received 18.10.2024

Revised 29.10.2024

Accepted 31.10.2024

## К 70-ЛЕТИЮ ВЛАДИМИРА ДМИТРИЕВИЧА САРЫЧЕВА



14 декабря 2024 г. исполнилось 70 лет кандидату технических наук, доценту Владимиру Дмитриевичу Сарычеву.

В 1977 г. В.Д. Сарычев окончил Новосибирский государственный университет по специальности «Механика и прикладная математика». В 1980 г. поступил в очную аспирантуру Института теоретической и прикладной механики Сибирского Отделения АН СССР (г. Новосибирск) под руководством В.М. Фомина, изучал гетерогенную гидродинамику. В аспирантуре В.Д. Сарычевым выполнен цикл расчетов взаимодействия ударников различной формы с преградой на основе модифицированного метода частиц Харлоу. Этот метод получил развитие в настоящее время и используется при моделировании процессов с большими деформациями. После окончания аспирантуры в 1983 г. начал свою трудовую деятельность на кафедре физики Сибирского металлургического института (в настоящее время Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ)). В 2003 г. защитил кандидатскую диссертацию. В 2023 г. перевелся на должность ведущего научного сотрудника Управления научных исследований СибГИУ.

Владимир Дмитриевич занимается задачами воздействия гетерогенных плазменных потоков, полученных с помощью электрического взрыва фольги: получены данные по разлету плазмы; предложен механизм получения поверхностно-

периодических структур на основе развития термокапиллярной неустойчивости, который позволил развить метод электровзрывного легирования. В 90-х гг. В.Д. Сарычевым получены данные по магнитно-импульсной обработке и приведены предварительные теоретические расчеты. В это же время была предложена модель фильтрационной пластичности, основанная на теории гетерогенных сред, были проведены исследования по динамической теории упругости по распространению трещин.

В период с 1997 по 2006 гг. Владимир Дмитриевич проводил исследования по моделированию структурно-фазовых превращений в прокате во время ускоренного охлаждения в условиях АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». С 2010 г. по настоящее время В.Д. Сарычев проводит исследования по неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (НКГ) с учетом вязкости.

За время трудовой деятельности проявил себя квалифицированным и исполнительным работником, является организатором занятий по решению нестандартных задач по физике и математике, а также неоднократно был руководителем команд СибГИУ – участников областных и республиканских олимпиад по физике и математике. Характерной чертой Владимира Дмитриевича является его неординарный подход к решению сложных физических задач. Неоднократно был награжден грамотами за добросовестную творческую работу. В 2022 г. В.Д. Сарычев награжден медалью «За достойное воспитание детей».

Владимир Дмитриевич имеет более 250 научных публикаций (82 цитируются в Scopus, четыре статьи в высокорейтинговых журналах – Q1, индекс Хирша 8), пользуется заслуженным авторитетом в научных кругах. Основное направление исследований – создание математических моделей, компьютерных программ, позволяющих рассчитывать параметры технологических процессов в металлургии. В настоящее время В.Д. Сарычев занимается разработкой механизмов и моделированием формирования микро- и наноструктур в металлах и сплавах при внешних энергетических воздействиях, а также квантовым материаловедением. Активно привлекает к научной деятельности молодежь.

*Друзья и коллеги сердечно поздравляют Владимира Дмитриевича с юбилеем, желают доброго здоровья, счастья и уверенности в завтрашнем дне!*

## ПАМЯТИ В.Я. ЦЕЛЛЕРМАЕРА



30-го ноября на 76-м году жизни скончался бывший проректор Сибирского государственного индустриального университета, доктор технических наук, профессор Владимир Яковлевич Целлермаер.

Вся его научная, педагогическая и административная деятельность связана с Сибирским металлургическим институтом (ныне СибГИУ), где он прошел путь от инженера отдела капитального строительства, ассистента кафедры «Строительное производство, водоснабжение и водоотведение» до проректора по капитальному строительству и административно-хозяйственной работе и профессора строительного факультета. В 1989 г. Владимир Яковлевич защитил кандидатскую диссертацию в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН. «Выпускник» научной школы СибГИУ «Прочность и пластичность материалов в условиях внешних энергетических воздействий», он в 2000 г. защитил докторскую диссертацию по

металловедению и термической обработке металлов.

Полученные результаты его исследований нашли применение как в отраслевых и учебных институтах при изучении природы формоизменения металлов и сплавов, так и на ряде предприятий металлургической промышленности и машиностроения. Эти работы получили широкую известность и внедрены со значительным экономическим эффектом на предприятиях Сибирского региона.

За цикл работ по внедрению безкислотной технологии удаления окалины при производстве проволоки из малоуглеродистых и низколегированных сталей на предприятиях металлургической отрасли В.Я. Целлермаер в 2004 г. удостоен премии Правительства РФ в области науки и техники.

В.Я. Целлермаер – действительный член Международной академии энерго-информационных наук, Заслуженный работник высшей школы РФ. Его заслуги неоднократно отмечались наградами и грамотами администрации вуза и области.

В.Я. Целлермаером опубликовано 4 монографии в центральных издательствах России, он автор свыше 120 статей, тезисов и докладов в материалах и трудах престижных международных, Всесоюзных, Всероссийских конференций.

Под его непосредственным руководством осуществлено строительство спортивного комплекса университета и горно-технологического корпуса.

В нашей памяти Владимир Яковлевич останется как самобытный инженер и администратор, неутомимый исследователь, человек высоких нравственных принципов.

Друзья, коллеги и ученики выражают глубокое соболезнование родным и близким Владимира Яковлевича.

## 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:

- физика конденсированного состояния;
- информационные технологии;
- металлургия и материаловедение;
- региональная и отраслевая экономика.

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 подрисовочный 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 исполь-

зовать 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 конце статьи 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.

Корректуре 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 (Журнал «Вестник СибГИУ»)).

## 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:

– *Condensed matter physics;*

– *IT;*

– *Metallurgy and materials science;*

– *Regional and sectorial economics.*

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](mailto: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 end 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 (Journal "Vestnik SibGIU").

Над номером работали

*Коновалов С.В.*, главный редактор

*Запольская Е.М.*, ответственный секретарь

*Бащенко Л.П.*, ведущий редактор

*Темлянцева Е.Н.*, верстка

*Олендаренко Е.В.*, менеджер по работе с клиентами

*Безродная Е.А.*, администратор сайта