

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Научный журнал

ВЕСТНИК
Сибирского государственного
индустриального университета

№ 2 (52), 2025

Издается с июня 2012 года
Выходит 4 раза в год

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Scientific journal

BULLETIN
of the Siberian State Industrial University

No. 2 (52), 2025

Published since June 2012
It is published 4 times a year

Учредитель

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

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

Свидетельство о регистрации:

ПИ № ФС77-77872 от 03.03.2020 г.

Адрес редакции:

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

каб. 483 ГТ, тел. 8-950-270-4488

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

e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Адрес издателя:

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

каб. 336 Г, тел. 8-3843-46-35-02

e-mail: rector@sibsiu.ru

Адрес типографии:

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

каб. 280 Г, тел. 8-3843-46-44-02

Подписные индексы:

Объединенный каталог «Пресса России» – 41270

Founder

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

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

Certificate of registration:

PI No. FS77-77872 dated 03.03.2020

Editorial office address:

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

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

e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Publisher's address:

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

e-mail: rector@sibsiu.ru

Printing house address:

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

Subscription indexes:

United catalog «Press of Russia» – 41270

Подписано в печать

30.06.2025 г.

Выход в свет

30.06.2025 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл. печ. л. 4,5.

Уч.-изд. л. 4,9.

Тираж 300 экз.

Заказ № 104.

Цена свободная

Signed to the press

30.06.2025

Coming out

30.06.2025

The paper size is 60×88 1/8.

Writing paper.

Offset printing.

Usl. pech. l. 4,5.

Uch.-ed. l. 4,9.

The circulation is 300 copies.

Order no. 104.

The price is free

Редакционная коллегия

Главный редактор

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

Ответственный секретарь

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Members of the editorial board

Chief Editor

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

Executive Secretary

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

Editorial team:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Громов В.Е., Юрьев А.Б., Иванов Ю.Ф., Миненко С.С., Коновалов С.В.** Электронно-микроскопическое исследование зоны контакта «наплавка (быстрорежущая сталь Р2М9) – подложка (сталь 30ХГСА)».....9
- Демин К.А., Агнаев С.С., Дондуков С.Д., Хаглеев А.Н.** Плазменная модификация поверхности полипропиленовых пленок при атмосферном давлении.....17
- Хань Ц., Ли Ч., Тарбоков В.А., Иванов Ю.Ф., Иванов К.В., Клименов В.А.** Влияние импульсной ионно-пучковой обработки на структуру и свойства сплава, сформировавшихся при электронно-лучевой печати проволокой ВТ6СВ.....27
- Башченко Л.П.** Применение электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки для упрочнения поверхности титана.....37

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Еремицкая К.Е., Носова Е.А., Балякин А.В.** Исследование влияния параметров режима наплавления на твердость стали 12Х18Н10Т после прямого лазерного выращивания.....44
- Женин Е.В., Шаповалов А.Н.** Влияние параметров выплавки стали на стойкость огнеупорной футеровки.....52
- Гурьев М.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Лыгденев Б.Д.** Влияние пластической деформации на структуру малоуглеродистой стали после поверхностного упрочнения и термической обработки.....62
- Протопопов Е.В., Уманский А.А., Белецкий Е.А., Фатьянов С.С., Полежаев С.А., Запольская Е.М.** Анализ условий подобию и методики высокотемпературного моделирования конвертерных процессов. Сообщение 1.....76
- Кузнецова В.А., Маркидонов А.В.** Распознавание дефектов на поверхности металла с использованием метода машинного обучения.....85

CONTENTS

CONDENSED MATTER PHYSICS

- Gromov V.E., Yuryev A.B., Ivanov Yu.F., Minenko S.S., Konovalov S.V.** Electron microscopic examination of the contact zone of the surfacing (high-speed steel P2M9) – substrate (steel 30HGSА).....9
- Demin K.A., Agnaev S.S., Dondukov S.D., Khagleev A.N.** Plasma modification of the surface of polypropylene films at atmospheric pressure.....17
- Han Z., Li Zh., Tarbokov V.A., Ivanov Yu.F., Ivanov K.V., Klimenov V.A.** Influence of pulsed ion beam treatment on the structure and properties of the alloy formed during electron beam printing with VT6SV wire.....27
- Bashchenko L.P.** The use of electro-explosive alloying and electron beam treatment to harden the surface of titanium.....37

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

- Eremitskaya K.E., Nosova E.A., Balyakin A.V.** Investigation of the effect of the deposition mode parameters on the hardness of 12Cr18Ni10T steel after direct laser cultivation.....44
- Zhenin E.V., Shapovalov A.N.** Influence of steelmaking parameters on the refractory lining life.....52
- Gur'ev M.A., Ivanov S.G., Gur'ev A.M., Lygdenov B.D.** Effect of plastic deformation on the structure of low-carbon steel after surface hardening and heat treatment.....62
- Protopopov E.V., Umanskii A.A., Belenetskii E.A., Fat'yanov S.S., Polezhaev S.A., Zapol'skaya E.M.** Analysis of similarity conditions and methods of high-temperature modeling of converter processes. Message 1...76
- Kuznetsova V.A., Markidonov A.V.** Recognition of defects on the metal surface using machine learning.....85

Адылина А.П., Овчинников В.В., Хунг Т.М., Кушнир И.С., Кучаева Е.А. Влияние селективного лазерного плавления с дополнительным переплавом перекристаллизованных слоев на структуру и свойства жаропрочной стали 15X25T.....	92
Филиппова М.В., Юрьев А.Б., Темлянцев М.В. Применение комплексной технологии полугорячей штамповки для производства деталей типа «ступица» и «фланец»...102	102
Нориега Флорес М.Х., Строкина И.В., Трофимова А.Д., Маринич В.С., Коновалов С.В. Анализ методов модифицирования алюминиевых сплавов.....	110

ЭКОНОМИКА. УПРАВЛЕНИЕ. ФИНАНСЫ

Бобошко Д.Ю., Коняхин М.С. Совершенствование анализа развития малого и среднего предпринимательства в РФ в региональном разрезе.....	118
Буйвис Т.А., Иванова Е.В., Касацкая А.А. Сравнительный анализ методик прогнозирования банкротства для эффективного антикризисного управления предприятием...128	128
Бобко Т.В., Постиченко М.В. Оценка динамики производительности труда металлургического предприятия.....	140

ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ, ПОЗДРАВЛЕНИЯ

95 лет Сибирскому государственному промышленному университету!.....	149
К юбилею Алексея Борисовича Юрьева.....	151
Будовских Е.А., Романов Д.А., Башченко Л.П. Становление и развитие электровзрывной тематики исследований на кафедре физики СибГИУ.....	153
К сведению авторов.....	160

Adylina A.P., Ovchinnikov V.V., Hung T.M., Kushnir I.S. Influence of selective laser melting with additional remelting of recrystallized layers on the structure and properties of heat-resistant steel 15X25T.....	92
Filippova M.V., Temlyantsev M.V., Y'uryev A.B. Application of integrated semi-hot stamping technology for the production of hub and flange type parts.....	102
Noriega Flores M.J., Strokina I.V., Trofimova A.D., Marinich V.S., Konovalov S.V. Analysis of methods to improve the properties of aluminum alloys.....	110

ECONOMY. MANAGEMENT. FINANCE

Boboshko D.Y., Konyahin M.S. Improving the analysis of small and medium entrepreneurship development in the Russian Federation in the regional context.....	118
Buivis T.A., Ivanova E.V., Kasatskaya A.A. Comparative analysis of bankruptcy forecasting techniques for effective crisis management of an enterprise...128	128
Bobko T.V., Postnichenko M.V. Evaluation of the dynamics of labor productivity of a metallurgical enterprise.....	140

FEEDBACK, REVIEWS, CONGRATULATIONS

95 years of the Siberian State Industrial University!.....	149
To the anniversary of Alexey Borisovich Yuryev!...151	151
Budovskikh E.A., Romanov D.A., Bashchenko L.P. Formation and development of electro-explosive research topics at the department of physics of SibSIU.....	153
To the authors attention.....	161

Оригинальная статья

УДК 621.791.92:621.727:620.178

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-9-16

ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ КОНТАКТА НАПЛАВКА (БЫСТРОРЕЖУЩАЯ СТАЛЬ P2M9) – ПОДЛОЖКА (СТАЛЬ 30ХГСА)

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

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

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

Аннотация. Одной из важных проблем практического использования высокопрочных плазменных наплавов быстрорежущими сталями в среде азота является анализ демпфирующих свойств и адгезии наплавки и подложки, поскольку именно эти свойства во многом определяют преждевременное зарождение хрупких микротрещин в зоне контакта. Такие результаты могут быть получены лишь с использованием высокоинформативных методов современного материаловедения (сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии). Наплавка вольфрам-молибденовой стали марки P2M9 находит в последнее время широкое применение вместо хорошо известных вольфрамовых (P18, P9) и вольфрам-молибденовых сталей с повышенным содержанием вольфрама (P6M5, P6Ф2К8М6 и другие). Это связано с необходимостью замены дорогого и дефицитного вольфрама на молибден, который оказывает подобное влияние на структуру и свойства быстрорежущих сталей. Проведены исследования структурно-фазовых состояний, морфологии и элементного состава переходной зоны контакта системы наплавленная быстрорежущая сталь марки P2M9 – подложка (сталь марки 30ХГСА) в исходном состоянии и после трехкратного высокотемпературного отпуска. В исходном состоянии переходная зона имеет мартенситную структуру с прослойками остаточного аустенита по границам пластин мартенсита. Выявлены частицы второй фазы наноразмерного (2 – 60 нм) диапазона: карбиды ванадия, молибдена, вольфрама и железа, локализованные на дислокациях, на границах и объеме пластин мартенсита. Трехкратный высокотемпературный отпуск не изменяет морфологию частиц карбидной фазы переходной зоны. Представлены возможные физические причины наблюдаемых закономерностей.

Ключевые слова: электронная микроскопия, наплавка, отпуск, быстрорежущая сталь марки P2M9, зона контакта, подложка

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

Для цитирования: Громов В.Е., Юрьев А.Б., Иванов Ю.Ф., Миненко С.С., Коновалов С.В. Электронно-микроскопическое исследование зоны контакта наплавка (быстрорежущая сталь P2M9) – подложка (сталь 30ХГСА). *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52): 9–16. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-9-16](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-9-16)

ELECTRON MICROSCOPIC STUDY OF THE CONTACT ZONE SURFACE (HIGH-SPEED STEEL P2M9) – SUBSTRATE (STEEL 30KHGSA)

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

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

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

Abstract. One of the important problems of practical application of high-strength plasma surfacing of high-speed steels in a nitrogen environment is the analysis of the damping properties and adhesion of the surfacing and the substrate, since these properties largely determine the premature nucleation of brittle microcracks in the contact zone. Such results can be obtained only using highly informative methods of modern materials science, such as scanning and transmission electron microscopy. In the article, surfacing of tungsten-molybdenum steel P2M9 has recently found wide application instead of well-known tungsten (type P18, P9) and tungsten-molybdenum steels with increased tungsten content (type P6M5, P6F2K8M6, etc.). This is due to the need to replace expensive and scarce tungsten with molybdenum, which, being in the same group of the Periodic Table of Elements with W, has a similar effect on the structure and properties of high-speed steels. The structural-phase states, morphology and elemental composition of the transition zone of the contact of the system "deposited high-speed steel R2M9-substrate (steel 30KhGSA)" in the initial state and after triple high-temperature tempering were studied. In the initial state, the transition zone has a martensitic structure with layers of residual austenite along the boundaries of martensite plates. Particles of the second phase of the nanosized (2 – 60 nm) range were revealed – vanadium, molybdenum, tungsten and iron carbides localized at dislocations, at the boundaries and in the volume of martensite plates. Triple high-temperature tempering does not change the morphology of the carbide phase particles of the transition zone. Possible physical causes of the observed patterns are discussed.

Keywords: electron microscopy, surfacing, tempering, high-speed steel P2M9, contact zone, substrate

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

For citation: Gromov V.E., Yuryev A.B., Ivanov Yu.F., Minenko S.S., Konovalov S.V. Electron microscopic examination of the contact zone of the surfacing (high-speed steel P2M9) – substrate (steel 30HGSА). *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):9–16. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-9-16](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-9-16)

Введение

Качество защиты рабочих поверхностей деталей машин и механизмов в машиностроительной, металлургической и горно-добывающей отраслях промышленности достигается использованием защитных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками работы в экстремальных условиях [1 – 5]. Поскольку основными причинами выхода из строя деталей оборудования является износ, коррозия и усталостные повреждения, то контролируемым изменением свойств рабочих поверхностей путем нанесения покрытий можно решить рассматриваемую проблему [6 – 9]. Уровень необходимых свойств покрытий может быть достигнут использованием технологии плазменной наплавки в защитно-легирующей среде азота, обеспечивающей за счет образования твердых карбонитридов повышение абразивной и коррозионной стойкости. При этом плазменная наплавка может не только восстанавливать изношенное оборудование, но и использоваться для получения специальных свойств поверхностей новых изделий перед началом их эксплуатации. Плазменная наплавка быстрорежущими сталями, по сравнению с другими способами, наиболее полно отвечает требованиям промышленности с позиций экономической эффективности [10 – 14].

Одно из перспективных направлений исследований наплавки быстрорежущими сталями связано с заменой дефицитного и дорогого вольфрама на молибден. Это также связано с

тем, что рассматриваемые элементы, расположенные в одной группе Периодической системы элементов, оказывают достаточно близкое влияние на структуру и свойства быстрорежущих сталей [15; 16].

Для выяснения демпфирующих свойств и адгезии наплавки и подложки необходимы данные о структурно-фазовом состоянии и дефектной структуре зоны контакта системы наплавка – подложка. Хорошие демпфирующие и адгезионные свойства этой зоны при использовании наплавки во многом предотвращают преждевременное зарождение хрупких микротрещин.

Для конкретных задач металлообрабатывающей и машиностроительной отраслей промышленности используются плазменные наплавки из вольфрам-молибденовой стали марки P2M9.

Целью настоящей работы является электронно-микроскопический анализ структурно-фазового состояния зоны контакта наплавка (быстрорежущая сталь марки P2M9) – подложка (среднеуглеродистая сталь марки 30ХГСА) после высокотемпературного отпуска.

Материал и методы исследований

Образцы для исследований были изготовлены плазменной наплавкой в среде азота нетокующей проволокой ПП-P2M9 на сталь марки 30ХГСА. Химический состав стали 30ХГСА: 0,3 % C; 0,9 % Cr; 0,8 % Mn; 0,9 % Si. Химический

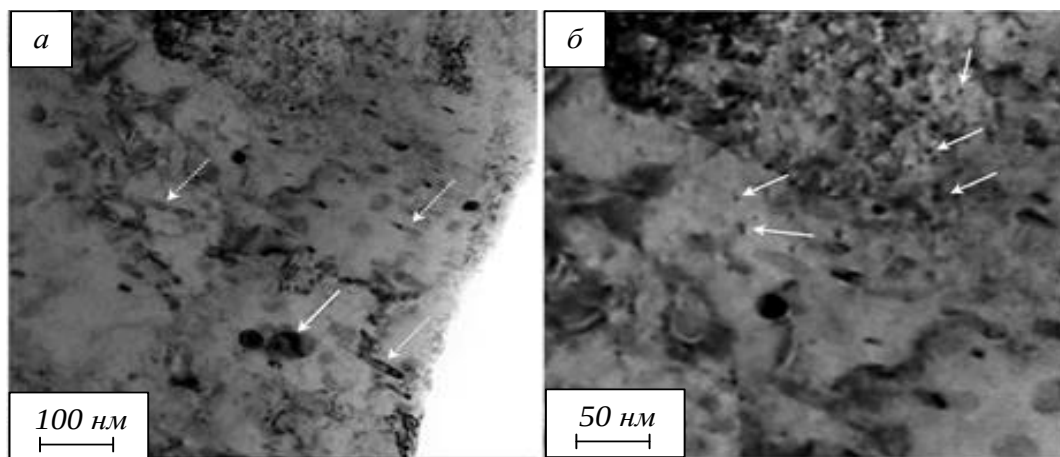


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение частиц второй фазы, присутствующих в структуре переходной зоны в состоянии после наплавки (исходное состояние):

a – частицы глобулярной формы (сплошные стрелки) и частицы пластинчатой формы (штриховые стрелки);
б – частицы сферической формы

Fig. 1. Electron microscopic image of the second phase particles present in the structure of the transition zone in the state after surfacing (initial state):

a – globular-shaped particles (solid arrows) and plate-shaped particles (dashed arrows); *б* – spherical-shaped particles

состав стали P2M9: 0,86 % C; 4,8 % Cr; 2,5 % W; 9,4 % Mo; 0,5 % V; 0,85 % Al; 0,08 % N; остальное железо.

Методика и режимы плазменной наплавки не отличались от описанных в работах [1; 2; 17]. Образцы стали марки 30ХГСА с наплавленным слоем стали марки P2M9 подвергали высокотемпературному отпуску при температуре нагрева 580 °С и время выдержки 1 ч, количество отпусков – три. Исследования структуры и фазового состава наплавленного слоя и зоны контакта осуществляли методами сканирующей (прибор КУКУ-ЕМ6900, оснащенный системой энергодисперсионного микроанализа Aztec Live Lite Xplore 30 EDS) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM2100) электронной микроскопии.

Результаты и их обсуждение

При электронно-микроскопическом исследовании травленого шлифа наплавленного слоя выявили структуру каркасного типа, характеризующуюся наличием протяженных прослоек второй фазы, расположенных по границам зерен. В зоне контакта наплавленного слоя и подложки структура каркасного типа не формируется, что может свидетельствовать о взаимной диффузии элементов подложки и наплавляемого слоя. Выполненный микрорентгеноспектральный анализ элементного состава переходной зоны выявил обогащение подложки химическими элементами наплавляемого слоя. Его результаты свидетельствуют об обогащении прилегающего слоя подложки атомами молибдена, а прилегающего слоя наплавки атомами кремния.

Элементный и фазовый составы, состояние дефектной субструктуры переходной зоны изу-

чали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, используя методы темнопольного анализа и индицирования микроэлектроннограмм. Выполненные исследования показали, что переходная зона имеет мартенситную структуру. По границам пластин мартенсита располагаются протяженные прослойки остаточного аустенита.

Структура переходной зоны содержит частицы второй фазы (рис. 1), которые характеризуются разнообразными формами (пластинки, глобулы, сферы), размерами (от 2 до 60 нм), местом расположения (дислокации, границы зерен, кристаллов мартенсита и прослоек остаточного аустенита).

Методами темнопольного анализа с последующим индицированием микроэлектроннограмм установлено, что наноразмерные частицы, формирующиеся на дислокациях, представлены карбидом ванадия (рис. 2, *в*, частицы указаны штриховыми стрелками); частицы, расположенные на границах пластин мартенсита, являются карбидами молибдена и вольфрама (рис. 2, *г*, частицы указаны стрелками). Следует отметить присутствие в структуре переходной зоны зерен остаточного аустенита (рис. 2, *а*, *в*, зерно остаточного аустенита указано стрелками). В объеме зерен аустенита практически всегда наблюдается двойниковая структура, что свидетельствует о низкой величине энергии дефекта упаковки γ -фазы.

Результаты анализа структуры переходной зоны позволяют утверждать, что частицы пластинчатой формы, расположенные в объеме кристаллов мартенсита, являются карбидом железа (цементитом).

Высокотемпературный трехкратный отпуск образцов стали с наплавленным слоем при тем-

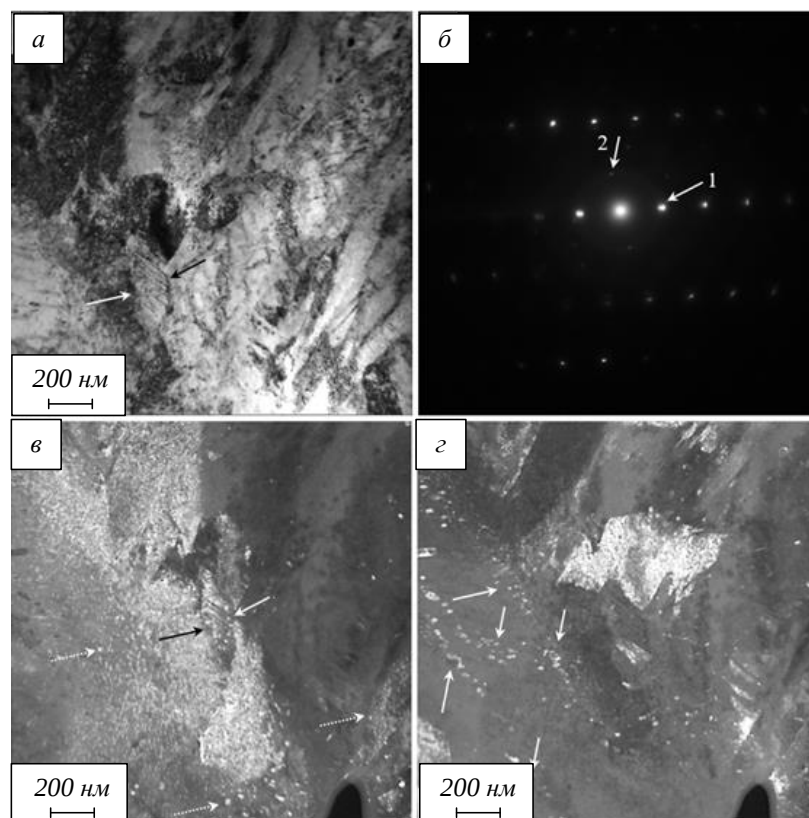


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры переходной зоны после наплавки (исходное состояние):
 а – светлое поле; б – микроэлектронграмма; в и г – темные поля, полученные в рефлексах $[110]\alpha\text{-Fe} + [002]\gamma\text{-Fe} + [012]\text{V}_2\text{C}$
 и $[110]\alpha\text{-Fe} + [103]\text{MoC} + [101]\text{W}_2\text{C}$; 1 и 2 – рефлексы, в которых получены темные поля для поз. в и г
 Fig. 2. Electron microscopic image of the structure of the transition zone in the state after surfacing (initial state):
 а – light field; б – microelectronogram; в and г – dark fields obtained in reflexes $[110]\alpha\text{-Fe} + [002]\gamma\text{-Fe} + [012]\text{V}_2\text{C}$ and
 $[110]\alpha\text{-Fe} + [103]\text{MoC} + [101]\text{W}_2\text{C}$; 1 and 2 – are reflexes in which dark fields are obtained for pos. в and г

пературе нагрева 580°C и выдержке 1 ч не привел к существенному изменению морфологии частиц карбидной фазы переходной зоны. Как и в исход-

ном состоянии в структуре переходной зоны после отпуска наблюдаются частицы сферической, глобулярной и пластинчатой форм (рис. 3).

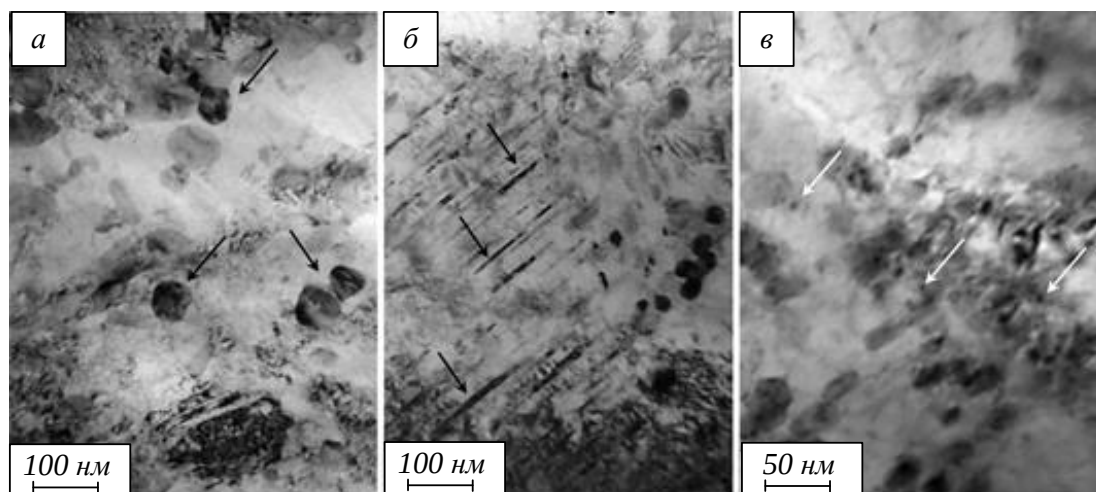


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение частиц карбидной фазы, присутствующих в структуре переходной зоны после многократного высокотемпературного отпуска:

а, б и в – стрелками указаны частицы глобулярной, пластинчатой и сферической форм

Fig. 3. Electron microscopic image of particles of the carbide phase present in the structure of the transition zone in the state after repeated high-temperature tempering:

а, б and в – the arrows indicate particles of globular, lamellar and spherical shapes

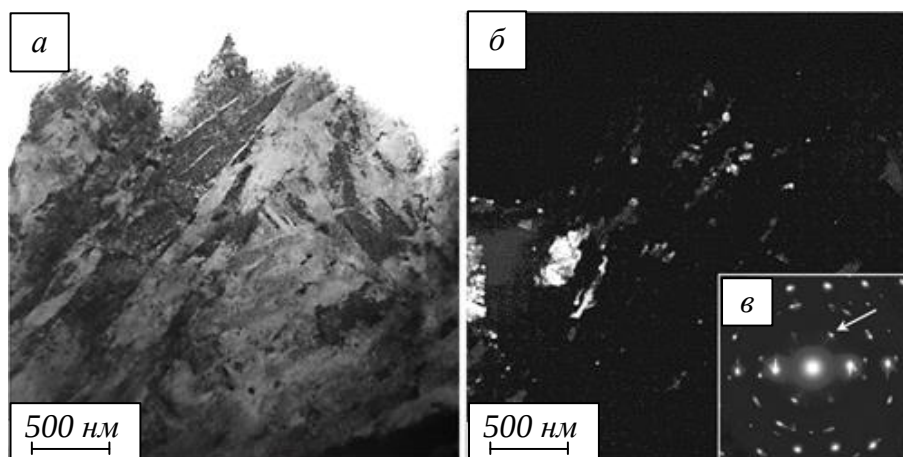


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение мартенситной структуры переходной зоны в состоянии после многократного высокотемпературного отпуска:

a – светлое поле; *б* – темное поле, полученное в рефлексах $[110]\alpha\text{-Fe} + [002]\text{CrC}$; *в* – микроэлектроннограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле)

Fig. 4. Electron microscopic image of the martensitic structure of the transition zone in the state after multiple high-temperature tempering:

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

Размеры частиц глобулярной формы изменяются в пределах до 100 нм, частиц сферической формы – в пределах единиц нанометров.

Анализ микроэлектроннограмм и соответствующих темнопольных изображений показывает, что частицы являются карбидами на основе хрома (Cr_3C_2 и Cr_7C_3), молибдена (MoC и Mo_2C), железа (Fe_3C) и карбидами многоэлементного состава Me_6C (Fe, W) $_6\text{C}$.

Следует отметить формирование в переходной зоне в результате высокотемпературного отпуска областей со сравнительно высокой плотностью наноразмерных (или субмикронных) частиц кар-

бидов. Это свидетельствует о неоднородном распределении химических элементов в наплавленном слое, которое в явной форме обнаруживается при отпуске материала в результате распада пересыщенного твердого раствора с образованием частиц второй фазы.

Неоднородность распределения химических элементов приводит к образованию карбида хрома CrC в объеме пластин мартенсита (рис. 4). Наряду с карбидами хрома в исследуемом слое выявлены карбиды глобулярной формы сложного элементного состава Me_{12}C ($\text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$) (рис. 5).

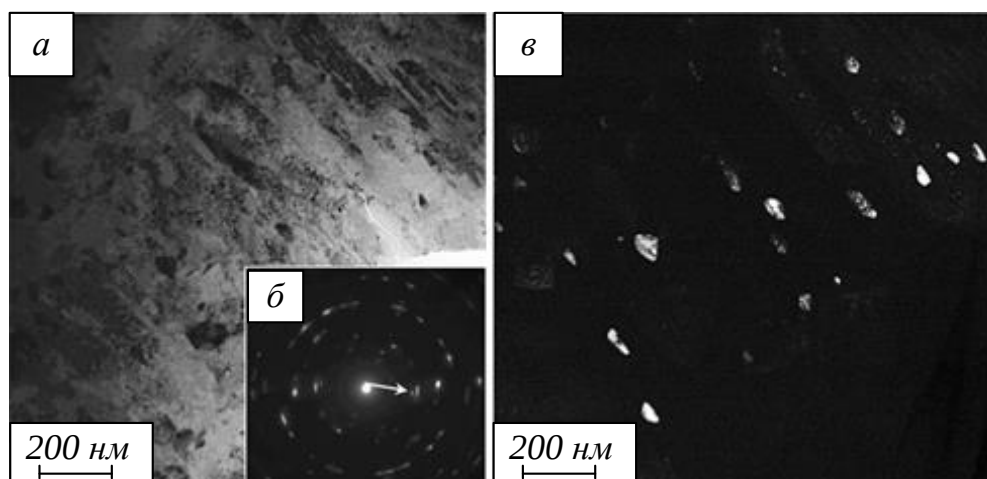


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение мартенситной структуры переходной зоны в состоянии после многократного высокотемпературного отпуска:

a – светлое поле; *б* – микроэлектроннограмма (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле); *в* – темное поле, полученное в рефлексе $[422] \text{Fe}_6\text{W}_6\text{C}$

Fig. 5. Electron microscopic image of the martensitic structure of the transition zone in the state after multiple high-temperature tempering:

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

Выводы

Проведены электронно-микроскопические исследования структуры и фазового состава зоны контакта плазменной наплавки быстрорежущей стали марки Р2М9 на среднеуглеродистую сталь марки 30 ХГСА в исходном состоянии и после многократного высокотемпературного отпуска. В исходном состоянии выявлена мартенситная структура переходной зоны с прослойками остаточного аустенита, которая содержит наноразмерные карбиды ванадия, молибдена, вольфрама и железа глобулярной, пластинчатой и сферической форм.

Многократный высокотемпературный отпуск не меняет морфологию карбидных частиц, незначительно увеличивая диапазон их размеров в пределах до 100 нм. Установлена неоднородность распределения химических элементов, приводящая к образованию карбидов на основе хрома состава $Me_{12}C(Fe_6W_6C)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов В.Е., Чапайкин А.С., Невский С.А. *Структура, свойства и модели быстрорежущей стали после отпуска и электронно-пучковой обработки*. Новокузнецк: Полиграфист, 2024:171.
2. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Potekaev A.I., Guseva T.P., Chapaikin A.S., Vashchuk E.S. Structure and properties of R18U surfacing of high-speed steel after its high tempering. *Russian Physics Journal*. 2023;66(7):731–739. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-02999-w>
3. Chaus A.S., Pokorny P., Caplovic L., Sitkevich M.V., Peterka J. Complex finescale diffusion coating formed at low temperature on high-speed steel substrate. *Appl. Surf. Sci.* 2018;437:257–270
4. Нефедьев С.П., Емелюшин А.Н. *Плазменное упрочнение поверхности*. Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2021:156.
5. Мозговой И.В., Шнейдер Е.А. *Наплавка быстрорежущей стали*. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2016:200.
6. Рябцев И.А., Сенченков И.К. *Теория и практика наплавочных работ*. Киев: Еко-технологія, 2013:400.
7. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. *Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение*. Москва: Машиностроение, 2008:406.
8. Guryev A.M., Ivanov S.G., Guryev M.A., Berdychenko A.A., Chernykh E.V. The influence of heat treatment modes on the structure and physicomechanical properties of high-speed steel. *Fundamental problems of modern materials science*. 2018;15(1):103–108.

9. Guryev A.M., Ivanov S.G., Guryev M.A., Berdychenko A.A. The influence of heat treatment on the structure and properties of high-speed steel. *Polzunovsky Almanakh*. 2017;(4-5):128–132.
10. Cho I.S., Amanov A., Kim J.D. The effects of AlCrN coating, surface modification and their combination on the tribological properties of high speed steel under dry conditions. *Tribol. Int.* 2015;81:61–72.
11. Kottfer D., Ferdinandy M., Kaczmarek L., Maňková I., Beňo J. Investigation of Ti and Cr based PVD coatings deposited onto HSS Co 5 twist drills. *Appl. Surf. Sci.* 2013;282:770–776.
12. Gerth J., Wiklund U. The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel. *Wear*. 2008;264:885–892.
13. Hashemi N., Mertens A., Montrieux H.-M., Tchuindjang J.T., Dedry O., Carrus R., Lecomte-Beckers J. Oxidative wear behaviour of laser clad high speed steel thick deposits: Influence of sliding speed, carbide type and morphology. *Surf. Coat. Technol.* 2017;315:519–529.
14. Darmawan W., Quesada J., Marchal R. Characteristics of laser melted AISI-T1 high speed steel and its wear resistance. *Surf. Eng.* 2007;23(2):112–119.
15. Кремнев Л.С., Седов Ю.Е. Об оптимизации составов низколегированных быстрорежущих сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1988;(6):26–33.
16. Кремнев Л.С. Теория легирования быстрорежущих сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1991;(6):10–14.
17. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Potekaev A.I., Chapaikin A.S., Semin A.P., Guseva T.P. Electron microscopy of high-speed steel/30HGS steel interface. *Russian Physics Journal*. 2024;67(1):24–33.
18. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016:196.
19. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer, 2014:717.
20. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016:518.

REFERENCES

1. Gromov V.E., Chapaikin A.S., Nevskii S.A. *Structure, properties and models of high-speed steel after tempering and electron beam treatment*. Novokuznetsk: Poligrafist, 2024:171. (In Russ.).
2. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Potekaev A.I., Guseva T.P., Chapaikin A.S., Vashchuk E.S. Structure and properties of R18U surfacing of

- high-speed steel after its high tempering. *Russian Physics Journal*. 2023;66(7):731–739. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-02999-w>
3. Chaus A.S., Pokorny P., Caplovic L., Sitkevich M.V., Peterka J. Complex finescale diffusion coating formed at low temperature on high-speed steel substrate. *Appl. Surf. Sci.* 2018;437:257–270
 4. Nefed'ev S.P., Emelyushin A.N. *Plasma surface hardening*. Staryi Oskol: Izd-vo TNT, 2021:156. (In Russ.).
 5. Mozgovoi I.V., Shneider E.A. *High-speed steel surfacing*. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2016:200. (In Russ.).
 6. Ryabtsev I.A., Senchenkov I.K. *Theory and practice of surfacing*. Kiev: Ekotekhnologiya, 2013:400.
 7. Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topolyanskii P.A. *Plasma technologies. Welding, coating, hardening*. Moscow: Mashinostroyeniye, 2008:406. (In Russ.).
 8. Guryev A.M., Ivanov S.G., Guryev M.A., Berdychenko A.A., Chernykh E.V. The influence of heat treatment modes on the structure and physicomechanical properties of high-speed steel. *Fundamental problems of modern materials science*. 2018;15(1):103–108.
 9. Guryev A.M., Ivanov S.G., Guryev M.A., Berdychenko A.A. The influence of heat treatment on the structure and properties of high-speed steel. *Polzunovsky Almanakh*. 2017;(4-5):128–132.
 10. Cho I.S., Amanov A., Kim J.D. The effects of AlCrN coating, surface modification and their combination on the tribological properties of high speed steel under dry conditions. *Tribol. Int.* 2015;81:61–72.
 11. Kottfer D., Ferdinandy M., Kaczmarek L., Maňková I., Beňo J. Investigation of Ti and Cr based PVD coatings deposited onto HSS Co 5 twist drills. *Appl. Surf. Sci.* 2013;282:770–776.
 12. Gerth J., Wiklund U. The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel. *Wear*. 2008;264:885–892.
 13. Hashemi N., Mertens A., Montrieux H.-M., Tchuindjang J.T., Dedry O., Carrus R., Lecomte-Beckers J. Oxidative wear behaviour of laser clad high speed steel thick deposits: Influence of sliding speed, carbide type and morphology. *Surf. Coat. Technol.* 2017;315:519–529.
 14. Darmawan W., Quesada J., Marchal R. Characteristics of laser melted AISI-T1 high speed steel and its wear resistance. *Surf. Eng.* 2007;23(2):112–119.
 15. Kremnev L.S., Sedov Yu.E. *On optimization of compositions of low-alloy high-speed steels*. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 1988;(6):26–33. (In Russ.).
 16. Kremnev L.S. *Theory of alloying of high-speed steels*. Metal-lovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 1991;(6):10–14. (In Russ.).
 17. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Potekaev A.I., Chapaikin A.S., Semin A.P., Guseva T.P. Electron microscopy of high-speed steel/30HGS steel interface. *Russian Physics Journal*. 2024;67(1):24–33.
 18. Egerton F.R. *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016:196.
 19. Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer, 2014:717.
 20. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016:518.
- Сведения об авторах:**
- 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.sibsui.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343
SPIN-код: 2834-4090
- Алексей Борисович Юрьев**, д.т.н., профессор, ректор, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: rector@sibsui.ru
ORCID: 0000-0002-9932-4755
- Юрий Федорович Иванов**, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН
E-mail: yufi55@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8022-7958
SPIN-код: 7576-4810
- Сергей Сергеевич Миненко**, соискатель кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: mss121278@mail.ru
- Сергей Валерьевич Коновалов**, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: konovalov@sibsui.ru
ORCID: 0000-0003-4809-8660
SPIN-код: 4391-7210
- Information about the authors**
- Viktor E. Gromov**, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Head of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: gromov@physics.sibsui.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343
SPIN-код: 2834-4090

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

E-mail: rector@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-9932-4755

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Leading Researcher, Institute of High-Current Electronics SB RAS

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7958

SPIN-код: 7576-4810

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

E-mail: mss121278@mail.ru

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

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

SPIN-код: 4391-7210

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 05.02.2025

После доработки 26.02.2025

Принята к публикации 03.03.2025

Received 21.11.2024

Revised 26.02.2025

Accepted 03.03.2025

Оригинальная статья

УДК 533.924

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-17-26

ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ ПЛЕНОК ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

© 2025 г. К. А. Демин^{1,2}, С. С. Агнаев², С. Д. Дондуков², А. Н. Хаглеев^{1,2}

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

²Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления (Россия, 670013, Республика Бурятия, Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, стр. 1)

Аннотация. Полимерные самоклеящиеся материалы находят широкое применение в различных отраслях промышленности (строительстве, медицине, упаковке, автомобилестроении, рекламе, электронике и бытовой сфере). Их популярность обусловлена эксплуатационными характеристиками: устойчивостью к внешним воздействиям и простота использования. Представлены результаты исследований поверхностных свойств полипропиленовых (ПП) пленок, модифицированных с использованием низкотемпературной плазмы тлеющего разряда атмосферного давления. Время обработки составляло 3, 5, 10, 15 с, плазму инициировали в средах технического аргона, воздуха и их смесей в пропорциях 70:30, 50:50 и 30:70. Исследование показывает, что плазменная модификация значительно улучшает адгезионные свойства полипропилена, увеличивая их в два раза по сравнению с исходным образцом. Максимальная работа адгезии (135,5 мДж/м²) ПП достигнута при модификации в аргоне 15 с, что вдвое улучшило адгезионные свойства по сравнению с исходным образцом. Увеличение времени обработки более 15 с не влияет на адгезионные свойства и краевой угол смачивания. Для снижения расхода аргона использована смесь аргона с воздухом. Оптимальное соотношение 50:50 обеспечило краевой угол смачивания $42 \pm 1^\circ$ и работу адгезии 127,9 мДж/м² (близкие к показателям чистого аргона). Отмечено повышение шероховатости поверхности модифицированных ПП пленок с 52,6 до 199,4 нм в аргоне, до 133,1 нм в смеси аргон – воздух (50:50). Повышение шероховатости облегчает нанесение клея и укрепляет адгезионную связь. В исследовании изучали кинетику изменений электростатических свойств ПП пленок и их влияние на адгезионные свойства. Полученные в ходе исследования результаты рекомендуются для разработки базовых материалов для самоклеящихся изделий с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Ключевые слова: плазменная модификация, полимеры, полипропилен, адгезия, плазма, краевой угол смачивания, атомно-силовая микроскопия

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, научная тема FWSF-2024-0010.

Для цитирования: Демин К.А., Агнаев С.С., Дондуков С.Д. Хаглеев А.Н. Плазменная модификация поверхности полипропиленовых пленок при атмосферном давлении. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):17–26. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-17-26](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-17-26)

Original article

PLASMA MODIFICATION OF THE SURFACE OF POLYPROPYLENE FILMS AT ATMOSPHERIC PRESSURE

© 2025 K. A. Demin^{1, 2}, S. S. Agnaev², S. D. Dondukov², A. N. Khagleev^{1, 2}¹Institute of Physical Materials Science SB RAS (6 Sakhyanovoy St., Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670047, Russian Federation)²East Siberian State University of Technology and Management (Bldg. 1, 40V, Klyuchevskaya St., Ulan-Ude, Republic of Buryatia, 670013, Russian Federation)

Abstract. Polymer self-adhesive materials are widely used in various industries (construction, medicine, packaging, automotive, advertising, electronics and consumer goods). Their popularity is due to their operational characteristics: resistance to external influences and ease of use. The results of studies of the surface properties of polypropylene (PP) films modified using low-temperature plasma of atmospheric pressure glow discharge are presented. The treatment time was 3, 5, 10, and 15 seconds, and the plasma was initiated in technical argon, air, and mixtures thereof in the proportions of 70:30, 50:50, and 30:70. The study shows that the plasma modification significantly improves the adhesive properties of polypropylene, doubling them compared to the original sample. The maximum adhesion performance (135.5 MJ/m^2) of PP was achieved with modification in argon for 15 seconds, which doubled the adhesion properties compared to the initial sample. An increase in the processing time of more than 15 seconds does not affect the adhesive properties and the wetting edge angle. A mixture of argon and air was used to reduce argon consumption. The optimal 50:50 ratio ensured an edge wetting angle of $42 \pm 1^\circ$ and an adhesion of 127.9 MJ/m^2 (close to the values of pure argon). An increase in the surface roughness of modified PP films was noted from 52.6 to 199.4 nm in argon, to 133.1 nm in an argon–air mixture (50:50). Increasing the roughness facilitates the application of glue and strengthens the adhesive bond. The study investigated the kinetics of changes in the electret properties of PP films and their effect on adhesive properties. The results obtained during the study are recommended for the development of basic materials for self-adhesive products with improved performance properties.

Keywords: plasma modification, polymers, polypropylene, adhesion, contact angle, atomic force microscopy

Financing. The work was carried out with financial support from the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, research topic FWSF-2024-0010.

For citation: Demin K.A., Agnaev S.S., Dondukov S.D., Khagleev A.N. Plasma modification of the surface of polypropylene films at atmospheric pressure. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):17–26. (In Russ.) [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-17-26](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-17-26)

Введение

Плазменная модификация полимерных пленок широко используется для улучшения их свойств, особенно при производстве упаковки и самоклеящихся материалов. Рассматриваемый метод способствует повышению адгезионных свойств, обеспечивая более надежное сцепление материала с другими поверхностями, что минимизирует риск дефектов и разрушения клеевых соединений [1 – 16].

Традиционно для улучшения адгезии полимерных пленок используется предварительная химическая обработка поверхности с применением кислот, органических и щелочных растворов с высокой окислительной способностью [17]. В качестве реагентов применяются изопропанол ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$), трихлорэтилен (C_2HCl_3), бензол

(C_6H_6), толуол (C_7H_8), этанол ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), акриловая кислота ($\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_2$), ацетон ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), азотная кислота (HNO_3) и ксилол (C_8H_{10}). При обработке полипропиленовых (ПП) пленок хромовой смесью (H_2SO_4) при температуре 70°C в течение 30 мин краевой угол смачивания уменьшается от 98 до 65° [18]. Химическая модификация имеет ряд недостатков: приводит к образованию рыхлости и неровности поверхности, что снижает механическую прочность материала (разрыв, отрыв, расслаивание); ухудшает оптические свойства. Процесс химической обработки требует соблюдения строгих мер безопасности, так как большинство используемых реагентов являются пожаро- и взрывоопасными [19].

В отличие от химической модификации, применение низкотемпературной плазмы позво-

ляет увеличить поверхностную энергию полимерных материалов, улучшая их гидрофильность и адгезионные свойства, не нарушая структурную целостность материала, что позволяет сохранить его механическую прочность при одновременном повышении адгезии.

В работе [20] ПП пленки были модифицированы коронным разрядом в воздушной и азотной средах. В результате обработки краевой угол смачивания уменьшился с 63,0 до 38,1° в азотной и до 38,2° в воздушной средах. В работе [21] описан метод модификации поверхности ПП пленок толщиной 30 мкм с использованием тлеющего разряда постоянного тока при атмосферном давлении. В качестве плазмообразующих газов использовали аргон, кислород и их смесь. После 30 с обработки угол смачивания уменьшился с 90 до 43 – 56°.

В работе [22] для подтверждения изменения адгезионных свойств ПП пленок использовали метод краевого угла смачивания. Обработка низкотемпературной плазмой в среде аргона тлеющего разряда атмосферного давления позволила уменьшить краевой угол смачивания с 59 до 48°, что привело к улучшению адгезионных свойств в 1,2 раза. Время обработки составило 60 с.

Модификация в плазме скользящей дуги позволяет достичь значительного улучшения адгезионных характеристик [23]. Краевой угол смачивания уменьшился с 72,0 до 17,9°, что свидетельствует об улучшении адгезии в 4,0 – 4,5 раза.

Увеличение адгезии объясняется изменением микрорельефа поверхности, а также заклиниванием адгезива в порах материала и разрушением слабых поверхностных слоев, что определяет прочность клеевого соединения [24].

В работе [25] подтверждено, что плазменное травление пленок полипропилена в воздушной плазме тлеющего разряда постоянного тока приводит к увеличению шероховатости поверхности. Это, в свою очередь, способствует улучшению смачиваемости материала и повышению прочности адгезионной связи.

Использование различных плазмообразующих газовых сред позволяет достичь схожих показателей адгезии. Однако применение окружающего атмосферного воздуха в качестве плазмообразующего газа значительно упрощает технологический процесс и снижает стоимость плазменной модификации.

Целью настоящей работы является исследование возможности применения плазменной модификации ПП пленок при атмосферном давлении для улучшения адгезионных свойств поверхности полимера.

Методы и принципы исследования

Объектом исследования был выбран полипропилен (ГОСТ 26996 – 86) толщиной 45 мкм и размером 30 × 30 мм, модифицированный на плазменной установке (ПУ) в течение 0 – 15 с для достижения максимальной работы адгезии и оптимального времени модификации.

Плазменная модификация полипропиленовых пленок

Образец ПП пленок модифицировали на плазменной установке (рис. 1), состоящей из цилиндрического корпуса эжектора с коаксиальной системой медных электродов, подключенных к высоковольтному источнику питания и системы напуска плазмообразующего газа. Система напуска плазмообразующего газа представляет собой компрессор, работающий от сети переменного тока напряжением 220 В с производительностью 400 л/мин и рабочим давлением 1 МПа. Компрессор оборудован двумя редукторами и манометрами с пределами измерения давления от 0 до 1,6 МПа. Также в систему напуска плазмообразующего газа входит баллон технического аргона объемом 20 л, оборудованный одной горловиной с аргоновым редуктором. Высоковольтный источник питания мощностью 300 Вт, подключенный к системе коаксиальных электродов, подает импульсный сигнал, инициирующий плазменный пучок. В корпус эжектора вдоль электродов из системы напуска поступает плазмообразующий газ. Поток плазмообразующего газа, подаваемый из системы напуска, прижимает плазменный пучок к поверхности образца ПП. Завихритель в плазменной установке создает вращающийся поток плазмы необходимый для удерживания плазменного пучка в центре эжектора, что способствует устойчивому и контролируемому процессу модификации. Завихритель способствует равномерному распределению температуры в инициированном плазменном пучке, что необходимо для предотвращения перегрева поверхности образца ПП.

Эжектор устанавливался перпендикулярно образцу ПП на расстоянии 10 ± 1 мм. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон, воздух и смеси аргон – воздух в соотношениях 70:30, 50:50 и 30:70.

Атомно-силовая микроскопия

Исследование поверхности ПП пленок выполнено методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с использованием сканирующего зондового микроскопа Multimode 8 (Bruker, США) в Центре коллективного пользования Института физического материаловедения СО РАН. Анализ проводили в полуконтактном режиме с применением

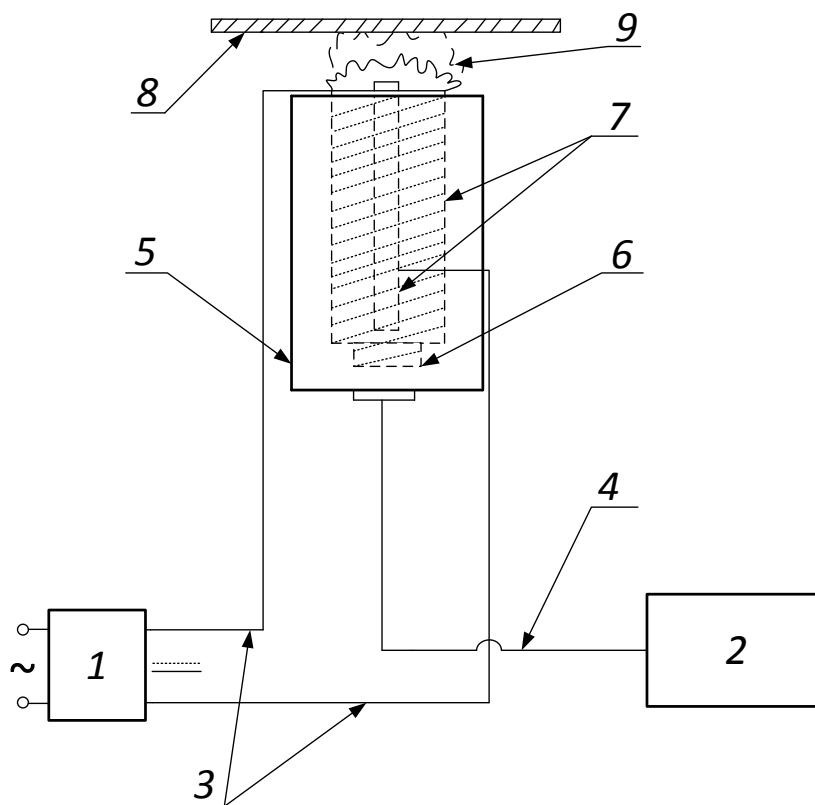


Рис. 1. Схема плазменной установки:

1 – высоковольтный источник питания; 2 – система напуска реакционного газа; 3 – высоковольтные провода; 4 – пневматический шланг; 5 – корпус эжектора; 6 – завихритель; 7 – коаксиальные электроды; 8 – ПП образец; 9 – плазменный разряд

Fig. 1. Plasma system schematic:

1 – high-voltage power supply; 2 – reactive gas injection system; 3 – high-voltage cables; 4 – pneumatic hose; 5 – ejector housing; 6 – swirler; 7 – coaxial electrodes; 8 – PP sample; 9 – plasma discharge

кантилевера из сурьмы, легированной кремнием. Обработку экспериментальных данных осуществляли с помощью программного обеспечения NanoScore, предназначенного для визуализации и анализа результатов зондовой микроскопии. В рамках обработки изображений были рассчитаны среднестатистические параметры шероховатости поверхности, включая максимальную высоту неровностей $R_{\max}$, среднюю арифметическую R_a и среднюю квадратичную R_q шероховатости. Эти параметры определяли на основе анализа пяти наиболее выраженных пиков и впадин, что позволило получить объективную оценку микрорельефа поверхности.

Смачиваемость поверхности

Краевой угол θ смачивания измеряли методом лежащей капли, который основан на определении угла между поверхностью материала и касательной к границе капли жидкости. Метод широко применяется для количественной оценки смачиваемости поверхности. Образцы ПП фиксировали на стеклянной подложке, что обеспечивало стабильность измерений. Погрешность при определении краевого угла смачивания не превышала $0,5^\circ$. Для исследования адгезионных

свойств ПП использовали цифровой микроскоп DM, оснащенный программным обеспечением Tour View, что позволило провести точный анализ и визуализацию результатов (рис. 2).

Оценку адгезионной способности исходного и модифицированного образцов ПП проводили путем расчета работы адгезии по уравнению Дюпре-Юнга:

$$W_a = \gamma(1 + \cos \theta),$$

где W_a – работа адгезии, мДж/м²; γ – поверхностное натяжение воды на границе с воздухом, мН/м; θ – краевой угол смачивания полимера жидкостью, град.

Основные результаты

При анализе результатов исследования было выявлено, что воздействие низкотемпературной плазмы атмосферного давления, инициированное в среде аргона, в значительной степени изменяет структуру и электростатические свойства поверхности образцов ПП, изменяя величину θ ,

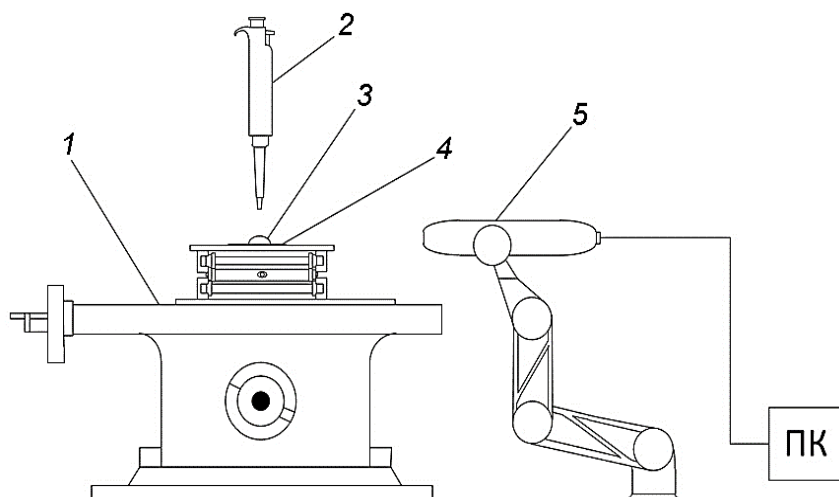


Рис. 2. Схема установки для исследования краевого угла смачивания:

1 – координатный предметный столик; 2 – лабораторная пипетки переменного объема; 3 – капля дистиллированной воды; 4 – ПП образец; 5 – цифровой микроскоп

Fig. 2. Wetting contact angle measurement setup:

1 – coordinate stage; 2 – adjustable-volume laboratory pipette; 3 – distilled water droplet; 4 – PP sample; 5 – digital microscope

тем самым улучшая смачиваемость. В таблице и на рис. 3 представлены результаты измерения краевого угла смачивания и работы адгезии в зависимости от процентного соотношения смеси плазмообразующего газа и продолжительности плазменной модификации.

Изменение краевого угла смачивания образцов ПП после плазменной модификации свидетельствует об улучшении гидрофильных свойств и увеличении работы адгезии. Наибольшее снижение угла смачивания по сравнению с исходным образцом ПП ($\theta = 76 - 77^\circ$) наблюдалось после модификации в среде технического аргона ($\theta = 30 - 32^\circ$), при этом разброс экспериментальных данных был минимальным.

Максимальное ($135,5 \text{ мДж/м}^2$) значение работы адгезии поверхности ПП при модификации в среде аргона было достигнуто при модификации 15 с. Результатом модификации является улучшение адгезионных свойств поверхности ПП в 2 раза по сравнению с исходным образцом. Увеличение времени модификации свыше 15 с не

приводит к дальнейшему изменению краевого угла смачивания и увеличению работы адгезии.

Для снижения экономических затрат принято решение об использовании смеси аргона и воздуха. Плазменная модификация при различных пропорциях плазмообразующего газа показала, что соотношение аргона и воздуха 50:50 позволяет достичь изменений краевого угла ($42 \pm 1^\circ$) и работы адгезии (более 120 мДж/м^2), что позволяет уменьшить расход аргона без значительного ущерба эффективности процесса плазменной модификации.

Сравнение морфологии образцов при модификации в средах аргон и аргон – воздух

Методом атомно-силовой микроскопии исследована морфология и локальные физико-механические свойства на наноструктурном уровне, что позволило оценить изменение шероховатости и микрорельефа образцов ПП до и

Изменение краевого угла смачивания ПП в зависимости от времени модификации и вида плазмообразующего газа

Dependence of PP wettability contact angle on processing duration and plasma gas type

Время модификации, с	Значение краевого угла смачивания в зависимости от среды плазмообразующего газа				
	аргон	аргон – воздух 30:70	аргон – воздух 50:50	аргон – воздух 70:30	воздух
0	77,52	77,61	76,795	77,71	77,67
3	38,235	60,68	58,45	74,00	73,43
5	33,89	57,75	47,85	51,16	45,65
10	32,23	55,90	46,01	49,80	47,59
15	31,05	48,84	42,91	42,63	43,98

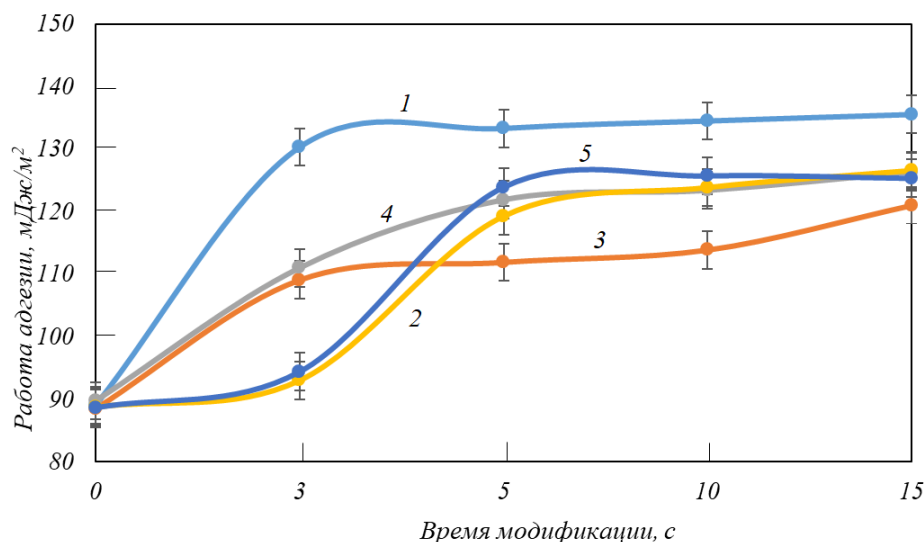


Рис. 3. Изменение работы адгезии поверхности ПП образцов в зависимости от плазмообразующего газа и времени плазменной модификации:

1 – аргон; 2 – 4 – аргон – воздух в пропорциях 70:30, 30:70, 50:50; 5 – воздух

Fig. 3. Change in the adhesion of the surface of the PP samples depending on the plasma-forming gas and the time of plasma modification:

1 – argon; 2 – 4 – argon – air in proportions 70:30, 30:70, 50:50; 5 – the air

после модификации. На рис. 4 представлены АСМ-изображения поверхности исходных ПП пленок и образцов, активированных в средах аргона и аргон – воздух в соотношении 50:50.

Проведенные исследования демонстрируют, что обработка низкотемпературной плазмой атмосферного давления в средах аргона и смеси аргона с воздухом в пропорции 50:50 изменяет морфологию поверхности образцов ПП пленок. В результате такой обработки наблюдается увеличение шероховатости поверхности, что свидетельствует о формировании более выраженного рельефа. Полученный рельеф способствует улучшению контакта между поверхностью и адгезивом.

Экспериментальные данные показали, что после модификации в аргонной среде максимальная высота неровностей увеличилась с 52,6 до 199,4 нм, а в среде смеси аргона и воздуха – до 133,1 нм. Обработка поверхности в течение 15 с привела к значительному росту шероховатости: параметры R_a и R_q возросли более чем в 4,5 и 3,2 раза по сравнению с исходными значениями.

Было отмечено повышение однородности поверхности и сглаживание микрорельефа. На модифицированных образцах отсутствуют продольные борозды, характерные для исходного материала, а вместо них преобладают рельефные образования большего диаметра. Такие изменения способствуют улучшению смачиваемости поверхности и более эффективному закреплению адгезива в порах, что напрямую влияет на прочность клеевого соединения.

Стоит отметить, что обработка в среде смеси аргона и воздуха приводит к меньшей шерохо-

ватости по сравнению с аргонной средой. Такое явление связано с эффектом термического сглаживания поверхности, вызванного более высокой температурой, генерируемой плазмой в рассматриваемой среде. Использование низкотемпературной плазмы позволяет целенаправленно изменять структуру поверхности ПП, улучшая ее функциональные свойства для адгезионных применений.

Выводы

Модифицированные плазмой ПП пленки характеризуются повышенной гидрофильностью и адгезией поверхности. Наибольшие значения увеличения работы адгезии в два раза в сравнении с исходным образцом были получены при модификации в среде технического аргона в течение 15 с. При этом, модификация в течение 5 с в среде смеси аргона и воздуха в пропорциях 50:50 позволило достичь значения работы адгезии более 120 мДж/м², что позволяет уменьшить расход аргона без значительного ущерба эффективности процесса плазменной модификации. На наноструктурном уровне модифицированные участки поверхности ПП пленок имеют различную шероховатость, зависящую от длительности плазменной модификации и соотношения компонентов плазмообразующего газа.

Модифицированные пленки обладают повышенной работой адгезии, что делает перспективным их дальнейшее применение в качестве материала основы для производства самоклеящихся материалов.

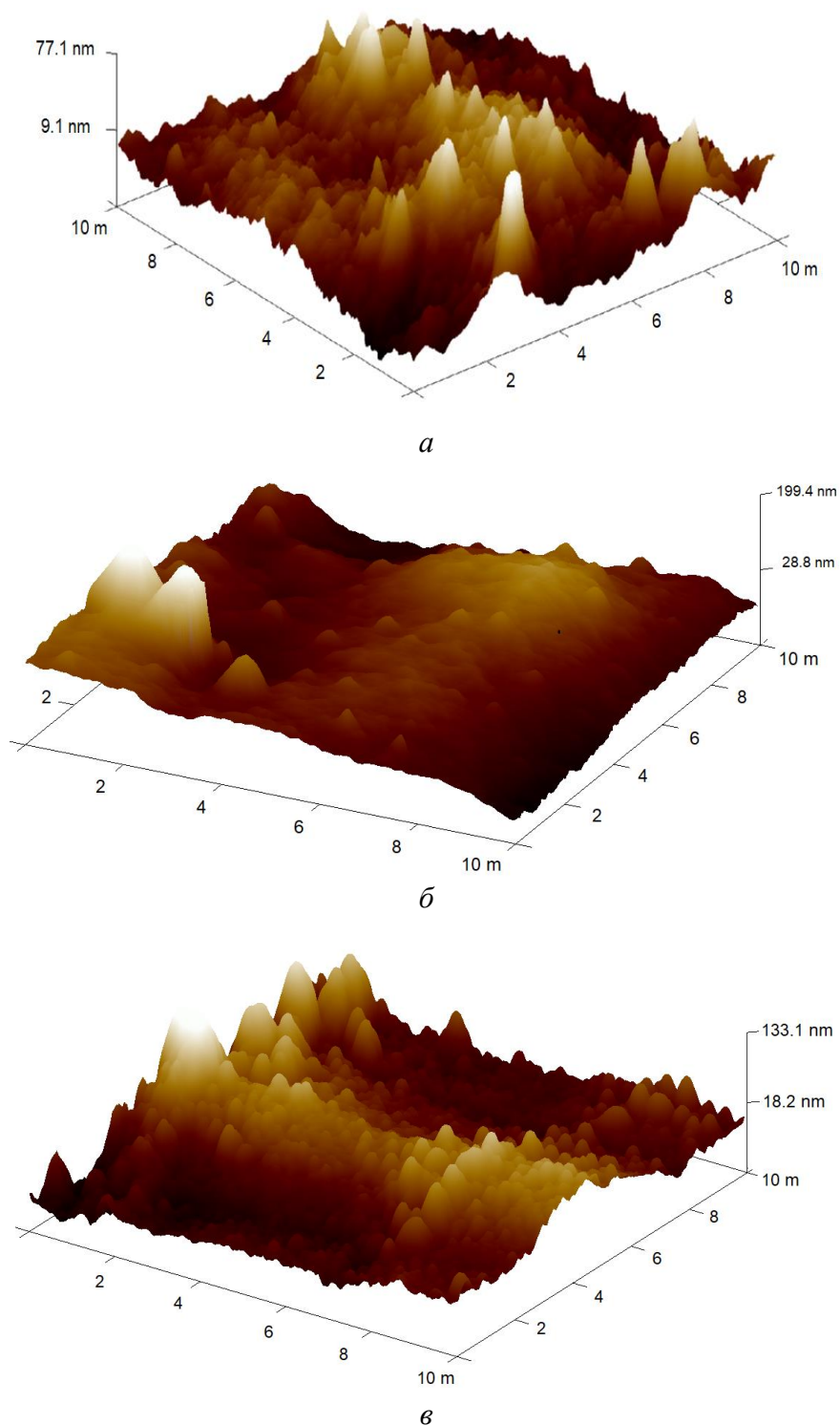


Рис. 4. АСМ-изображение топографической поверхности исходного ПП образца (а), активированных в средах аргона (б) и в аргон – воздух в соотношении 50:50 (в)

Fig. 4. AFM is an image of the topographic surface of the initial sample of PP (a) activated in an argon (б) medium and in an argon – air medium in a 50:50 ratio (в)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kostov K.G., Nishime T.M.C., Castro A.H.R., Toth A., Hein L.R.O. Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet. *Applied Surface Science*. 2014;314:367–375.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.07.009>
2. Nastuta A.V., Asandulesa M., Doroftei F., Dascalu I.-A., Varganici C.-D., Tiron V., Topala I. Atmospheric Pressure Plasma Jet Exposure of Polylactic Acid Surfaces for Better Adhesion: Plasma Parameters towards Polymer Properties. *Polymers*. 2024;16(2):240.
<https://doi.org/10.3390/polym16020240>

3. Дёмин К.А., Хаглеев А.Н., Урханова Л.А., Хардаев П.К., Агнаев С.С., Дондуков С.Д. Модифицированные в плазме скользящей дуги гидроизоляционные полимерные пленки. *Вестник ВСГУТУ*. 2024;1(92):90–96.
https://doi.org/10.53980/24131997_2024_1_90
4. Mozetič M. Aging of Plasma-Activated Polyethylene and Hydrophobic Recovery of Polyethylene Polymers. *Polymers*. 2023;15(24):4668.
<https://doi.org/10.3390/polym15244668>
5. Berczeli M., Hatoss B., Kókai E. Surface treatment of polymer matrix nanocomposites for adhesion enhancement by cold plasma. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022;1246:012028.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012028>
6. Vassallo E., Aloisio M., Pedroni M., Ghezzi F., Cerruti P., Donnini R. Effect of Low-Pressure Plasma Treatment on the Surface Wettability of Poly (butylene succinate) Films. *Coatings*. 2022;12(2):220.
<https://doi.org/10.3390/coatings12020220>
7. Хаглеев А.Н., Урханова Л.А., Буянтуев С.Л., Демин К.А., Мокеев М.А., Агнаев С.С. Влияние плазмы скользящей дуги на физико-механические свойства гидроизоляционного полиэтилена. *Вестник ВСГУТУ*. 2022;4(87):64–70.
https://doi.org/10.53980/24131997_2022_4_64
8. Aydemir C., Altay B.N., Akyol M. Surface analysis of polymer films for wettability and ink adhesion. *Color Research and Application*. 2021;46(2):489–499.
<https://doi.org/10.1002/col.22579>
9. Štěpánová V., Šrámková P., Sihelník S., Stupavská M., Jurmanová J., Kováčik D. The effect of ambient air plasma generated by coplanar and volume dielectric barrier discharge on the surface characteristics of polyamide foils. *Vacuum*. 2021;183:109887.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109887>
10. Григорьев А.Ю., Ефремова А.А., Гарипов Р.М. Изменение свойств поверхности полимерных пленок при кратковременной обработке полем коронного разряда. *Промышленное производство и использование эластомеров*. 2021;3:44–50.
<https://doi.org/10.24412/2071-8268-2021-3-44-50>
11. Kellar J., Shekargoftar M., Krumpolec R., Homola T. Activation of polycarbonate (PC) surfaces by atmospheric pressure plasma in ambient air. *Polymer Testing*. 2018;67:428–434.
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.027>
12. Shekargoftar M., Kellar J., Krumpolec R., Jurmanova J., Homola T. A Comparison of the Effects of Ambient Air Plasma Generated by Volume and by Coplanar DBDs on the Surfaces of PP/Al/PET Laminated Foil. *IEEE Transactions Plasma Science*. 2018;46(10):3653–3661.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2861085>
13. Vesel A., Zaplotnik R., Primc G., Mozetič M. Evolution of the Surface Wettability of PET Polymer upon Treatment with an Atmospheric Pressure Plasma Jet. *Polymers*. 2020;12(1):87.
<https://doi.org/10.3390/polym12010087>
14. Noeske M., Degenhardt J., Strudthoff S., Lommatzsch U. Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: surface modifications and the relevance for adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2004;24:171–177.
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2003.09.006>
15. Hamdi M., Saleh M.N., Poulis J.A. Improving the adhesion strength of polymers: effect of surface treatments. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2020;34(17):1853–1870.
<https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1732750>
16. Qi L., Min W., Gao R., Li Z., Yu M., Sun Z. Optimization of interfacial bonding properties between thermoplastic liners and carbon fiber-reinforced composites by atmospheric-pressure plasma and failure mechanism study. *Polymer Composites*. 2023;44(4):2361–2378.
<https://doi.org/10.1002/pc.27249>
17. Черепанов К.А., Коротков С.Г. Термозащита и энергосбережение на основе использования нанодисперсного связующего. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2015;2(12):88–91.
18. Кравец Л.И., Дмитриев С.Н., Апель П.Ю. Полипропиленовые трековые мембраны для микро- и ультрафильтрации химически агрессивных сред. I. Травление треков высокоэнергетичных ионов в полипропилене. Мембраны. Дубна: Объединенный институт ядерных исследований, 2000:31.
19. Химические свойства и модификация полимеров / Под ред. Г.С. Колесникова. Москва: Наука, 1964:287.
20. Ананьев В.В., Перетокин Т.Н., Заиков Г.Е., Софьина С.Ю. Модификация адгезионных свойств полимерных пленок обработкой коронным разрядом. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014;17(5):116–119.
21. Василькин Д.П., Волкова В.П. Изменение свойств поверхности пленки полипропилена при обработке в струе плазмы атмосферного давления на основе тлеющего разряда постоянного тока. В кн.: *Физика, техника и технология сложных систем. Тезисы докладов конференции*. 2020:14–15.

22. Абдуллина В.Х., Сергеева Е.А., Абдуллин И.Ш., Тихонова В.П. Гидрофилизация полипропиленовой пленочной нити низкотемпературной плазмой пониженного давления. *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2009;4:129–131.
 23. Kusano Y., Madsen B., Berglund L., Oksman K. Modification of cellulose nanofibre surfaces by He/NH₃ plasma at atmospheric pressure. *Cellulose*. 2019;26(12):7185–7194. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02594-8>
 24. Коновалова О.А., Хайдарова А.Р., Ибрагимов Р.Г., Салахов М.Х. Исследование модифицированных пористых мембран методом атомно-силовой микроскопии. *Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки*. 2018;160(1):81–88.
 25. Pandiyaraj K.N., Selvarajan V., Deshmukh R.R., Gao C. Modification of surface properties of polypropylene (PP) film using DC glow discharge air plasma. *Applied Surface Science*. 2009;255(7):3965–3971. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.10.090>
- REFERENCES**
1. Kostov K.G., Nishime T.M.C., Castro A.H.R., Toth A., Hein L.R.O. Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet. *Applied Surface Science*. 2014;314:367–375. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.07.009>
 2. Nastuta A.V., Asandulesa M., Doroftei F., Dascalu I-A., Varganici C.-D., Tiron V., Topala I. Atmospheric Pressure Plasma Jet Exposure of Polylactic Acid Surfaces for Better Adhesion: Plasma Parameters towards Polymer Properties. *Polymers*. 2024;16(2):240. <https://doi.org/10.3390/polym16020240>
 3. Demin K.A., Khagaleev A.N., Urkhanova L.A., Khardaev P.K., Agnaev S.S., Dondukov S.D. Sliding arc plasma modified waterproofing polymer films. *Vestnik VSGUTU*. 2024;1(92):90–96. (In Russ.). https://doi.org/10.53980/24131997_2024_1_90
 4. Mozetič M. Aging of Plasma-Activated Polyethylene and Hydrophobic Recovery of Polyethylene Polymers. *Polymers*. 2023;15(24):4668. <https://doi.org/10.3390/polym15244668>
 5. Berczeli M., Hatoss B., Kókai E. Surface treatment of polymer matrix nanocomposites for adhesion enhancement by cold plasma. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2022;1246:012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1246/1/012028>
 6. Vassallo E., Aloisio M., Pedroni M., Ghezzi F., Cerruti P., Donnini R. Effect of Low-Pressure Plasma Treatment on the Surface Wettability of Poly (butylene succinate) Films. *Coatings*. 2022;12(2):220. <https://doi.org/10.3390/coatings12020220>
 7. Khagaleev A.N., Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Demin K.A., Mokeev M.A., Agnaev S.S. The influence of sliding arc plasma on the physical and mechanical properties of waterproofing polyethylene. *Vestnik VSGUTU*. 2022;4(87):64–70. (In Russ.). https://doi.org/10.53980/24131997_2022_4_64
 8. Aydemir C., Altay B.N., Akyol M. Surface analysis of polymer films for wettability and ink adhesion. *Color Research and Application*. 2021;46(2):489–499. <https://doi.org/10.1002/col.22579>
 9. Štěpánová V., Šrámková P., Sihelník S., Stupavská M., Jurmanová J., Kováčik D. The effect of ambient air plasma generated by coplanar and volume dielectric barrier discharge on the surface characteristics of polyamide foils. *Vacuum*. 2021;183:109887. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109887>
 10. Grigor'ev A.Yu., Efremova A.A., Garipov R.M. Changes in the surface properties of polymer films during short-term treatment with a corona discharge field. *Promyshlennoe proizvodstvo i ispol'zovanie elastomerov*. 2021;3:44–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-8268-2021-3-44-50>
 11. Kellar J., Shekargoftar M., Krumpolec R., Homola T. Activation of polycarbonate (PC) surfaces by atmospheric pressure plasma in ambient air. *Polymer Testing*. 2018;67:428–434. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.027>
 12. Shekargoftar M., Kellar J., Krumpolec R., Jurmanova J., Homola T. A Comparison of the Effects of Ambient Air Plasma Generated by Volume and by Coplanar DBDs on the Surfaces of PP/Al/PET Laminated Foil. *IEEE Transactions Plasma Science*. 2018;46(10):3653–3661. <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2861085>
 13. Vesel A., Zaplotnik R., Primc G., Mozetič M. Evolution of the Surface Wettability of PET Polymer upon Treatment with an Atmospheric-Pressure Plasma Jet. *Polymers*. 2020;12(1):87. <https://doi.org/10.3390/polym12010087>
 14. Noeske M., Degenhardt J., Strudthoff S., Lommatzsch U. Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: surface modifications and the relevance for adhesion. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2004;24:171–177. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2003.09.006>
 15. Hamdi M., Saleh M.N., Poullis J.A. Improving the adhesion strength of polymers: effect of surface treatments. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2020;34(17):1853–1870. <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1732750>
 16. Qi L., Min W., Gao R., Li Z., Yu M., Sun Z. Optimization of interfacial bonding properties between thermoplastic liners and carbon fiber-

- reinforced composites by atmospheric-pressure plasma and failure mechanism study. *Polymer Composites*. 2023;44(4):2361–2378. <https://doi.org/10.1002/pc.27249>
17. Cherepanov K.A., Korotkov S.G. Thermal protection and energy saving based on the use of nanodispersed binder. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2015;2(12):88–91. (In Russ.).
 18. Kravets L.I., Dmitriev S.N., Apel' P.Yu. Polypropylene track membranes for micro- and ultrafiltration of chemically aggressive media. I. Etching of high-energy ion tracks in polypropylene. *Membrany*. Dubna: Ob"edinennyi institut yadernykh issledovaniy, 2000:31 (In Russ.).
 19. Kolesnikov G.S. ed. *Chemical properties and modification of polymers: Collection of articles: editor-in-chief*. Moscow: Nauka, 1964:287. (In Russ.).
 20. Anan'ev V.V., Peretokin T.N., Zaikov G.E., Sof'ina S.Yu. Modification of adhesive properties of polymer films by corona discharge treatment. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014;17(5):116–119. (In Russ.).
 21. Vasil'kin D.P., Volkova V.P. Changes in the properties of the surface of polypropylene film during processing in a plasma jet at atmospheric pressure based on a direct current glow discharge. In: *Physics, engineering and technology of complex systems. Abstracts of the conference reports*. 2020:14–15. (In Russ.).
 22. Abdullina V.Kh., Sergeeva E.A., Abdullin I.Sh., Tikhonova V.P. Hydrophilization of polypropylene film thread by low-temperature, low-pressure plasma. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2009;4:129–131. (In Russ.).
 23. Kusano Y., Madsen B., Berglund L., Oksman K. Modification of cellulose nanofibre surfaces by He/NH₃ plasma at atmospheric pressure. *Cellulose*. 2019;26(12):7185–7194. <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02594-8>
 24. Konovalova O.A., Khaidarova A.R., Ibragimov R.G., Salakhov M.Kh. Study of modified porous membranes by atomic force microscopy. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki*. 2018;160(1):81–88. (In Russ.).
 25. Pandiyaraj K.N., Selvarajan V., Deshmukh R.R., Gao C. Modification of surface properties of polypropylene (PP) film using DC glow discharge air plasma. *Applied Surface Science*. 2009;255(7):3965–3971. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.10.090>

Сведения об авторах:

Кирилл Андреевич Демин, старший преподаватель, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, младший научный сотрудник, Институт физического материаловедения
E-mail: kirill.demin.19992@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5102-7789
SPIN-код: 9090-8016

Степан Сергеевич Агнаев, студент, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

E-mail: stephanagnaev02@gmail.com
ORCID: 0009-0003-6155-957X
SPIN-код: 4032-7829

Саян Дмитриевич Дондуков, студент, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления

E-mail: dondukov.s@yandex.ru
ORCID: 0009-0005-5745-9626
SPIN-код: 3868-3460

Андрей Николаевич Хазлеев, к.т.н., доцент, старший преподаватель, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, научный сотрудник, Институт физического материаловедения

E-mail: khagleev@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-6540-7088
SPIN-код: 4394-0590

Information about the authors:

Kirill A. Demin, Senior Lecturer, East Siberian State University of Technology and Management, Junior Researcher, Institute of Physical Materials Science

E-mail: kirill.demin.19992@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5102-7789
SPIN-код: 9090-8016

Stepan S. Agnaev, student, East Siberian State University of Technology and Management

E-mail: stephanagnaev02@gmail.com
ORCID: 0009-0003-6155-957X
SPIN-код: 4032-7829

Sayan D. Dondukov, student, East Siberian State University of Technology and Management

E-mail: dondukov.s@yandex.ru
ORCID: 0009-0005-5745-9626
SPIN-код: 3868-3460

Andrey N. Khagleev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof., Senior Lecturer, East Siberian State University of Technology and Management, Researcher, Institute of Physical Materials Science

E-mail: khagleev@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-6540-7088
SPIN-код: 4394-0590

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

Поступила в редакцию 05.05.2025

После доработки 21.05.25

Принята к публикации 26.05.25

Received 05.05.2025

Revised 21.05.25

Accepted 26.05.25

Оригинальная статья

УДК 538.91

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-27-36

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ИОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА, СФОРМИРОВАВШЕГОСЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЕЧАТИ ПРОВОЛОКОЙ ВТ6св

© 2025 г. Ц. Хань¹, Ч. Ли², В. А. Тарбоков¹, Ю. Ф. Иванов³, К. В. Иванов⁴, В. А. Клименов¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 650000, Томск, пр. Ленина, 30)

²Шэньянский политехнический университет (КНР, 110180, провинция Ляонин, г. Шэньян, пр. Наньпинчжон, 6)

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

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

Аннотация. Проведено исследование микроструктуры и свойств титанового сплава, сформировавшегося при электронно-лучевой печати проволокой ВТ6св, после обработки импульсным ионным пучком. Образцы были получены на лабораторной установке электронно-лучевого аддитивного производства, разработанной в ИФПМ СО РАН. Процесс формирования образцов осуществляли путем сплавления титановой сварочной проволоки марки ВТ6св диаметром 1,6 мм в условиях вакуума при давлении 10^{-3} – 10^{-2} Па. Энергетическое воздействие с применением импульсной ионной обработки осуществляли на ускорителе ТЭМП-4М при ускоряющем напряжении 200 кВ, длительности импульса на половине максимума 100 нс и плотности энергии 2 Дж/см². Методами просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и измерениями микротвердости установлено, что воздействие импульсного ионного пучка приводит к существенным изменениям в микроструктуре поверхности: наблюдается трансформация β -фазы в α -фазу, а также образование наночастиц интерметаллического соединения Al_3V . Толщина модифицированного слоя составляет около 5,5 мкм. Выявлено незначительное увеличение микротвердости (с 254,39 до 261,37 НВ) при этом достигается более равномерное распределение значений твердости. Ионно-пучковая обработка может способствовать улучшению биосовместимости титановых имплантатов за счет устранения острых краев, возникающих в процессе механической обработки и снижения шероховатости. В сравнении с традиционными методами термического воздействия ионная обработка демонстрирует высокую степень управляемости и адаптивности, что делает ее перспективной для применения в медико-биологических системах. Полученные результаты открывают новые возможности функционализации поверхности титановых сплавов и обладают высоким прикладным потенциалом.

Ключевые слова: титановый сплав, сварочная проволока, электронно-лучевая печать, импульсный пучок, ионная обработка, структурные превращения, фазовые превращения, просвечивающая микроскопия

Благодарности. Авторы выражают благодарность профессору ИФПМ СО РАН А.В. Чумаевскому за участие в обсуждении полученных результатов. В работе для исследований было использовано оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ПИШ НИР-2024-016. Исследование методом ПЭМ проведено в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0003.

Для цитирования: Хань Ц., Ли Ч., Тарбоков В.А., Иванов Ю.Ф., Иванов К.В., Клименов В.А. Влияние импульсной ионно-пучковой обработки на структуру и свойства сплава, сформировавшегося при электронно-лучевой печати проволокой ВТ6св. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):27–36. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-27-36](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-27-36)

Original article

INFLUENCE OF PULSED ION-BEAM TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE ALLOY FORMED BY ELECTRON-BEAM PRINTING WITH VT6SV WIRE

© 2025 Z. Han¹, Zh. Li², V. A. Tarbokov¹, Yu. F. Ivanov³, K.V. Ivanov⁴, V. A. Klimenov¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University (30 Lenin Avenue, Tomsk, 650000, Russian Federation)

²Shenyang University of Technology (6 Nanpingzhong Avenue, province Lyaonin, Shenyang, 110180, PRC)

³Institute of High Current Electronics SB RAS (2/3 Academic Avenue, Tomsk, 650000, Russian Federation)

⁴Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS (2/4 Academic Avenue, Tomsk, 650000, Russian Federation)

Abstract. A study of the microstructure and properties of a titanium alloy formed during electron beam printing with VT6cw wire after treatment with a pulsed ion beam has been carried out. The samples were obtained at a laboratory facility for electron beam additive manufacturing developed at IFPM SB RAS. The process of forming the samples was carried out by fusing titanium welding wire of the VT6sv brand with a diameter of 1.6 mm under vacuum conditions at a pressure of $10^{-3} - 10^{-2}$ Pa. The energy effect using pulsed ion treatment was carried out on a TEMP-4M accelerator at an accelerating voltage of 200 kV, a pulse duration at half the maximum of 100 ns and an energy density of 2 J/cm². Transmission electron microscopy, atomic force microscopy, and microhardness measurements have shown that exposure to a pulsed ion beam leads to significant changes in the microstructure of the surface: the transformation of the β -phase into the α -phase is observed, as well as the formation of nanoparticles of the Al₃ v intermetallic compound. The thickness of the modified layer is about 5.5 microns. A slight increase in microhardness was revealed (from 254.39 to 261.37 HV), while a more uniform distribution of hardness values was achieved. Ion beam treatment can help improve the biocompatibility of titanium implants by eliminating sharp edges that occur during machining and reducing roughness. In comparison with traditional methods of thermal treatment, ion treatment demonstrates a high degree of controllability and adaptability, which makes it promising for use in biomedical systems. The results obtained open up new possibilities for the functionalization of the surface of titanium alloys and have high application potential.

Keywords: titanium alloy, welding wire, electron beam printing, pulsed beam, ion treatment, structural transformations, phase transformations, transmission electron microscopy

Acknowledgements. The author expresses his gratitude to Professor A.V. Chumaevskii, IFM SB RAS, for participating in the discussion of the results obtained. In the research work, the equipment of the Central Research Institute of NMNT TPU, used by the project of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 075-15-2021-710, was used.

Financing. The study was carried out with the financial support of the PISH NIR-2024-016 project. The SEM study was conducted within the framework of the state assignment of the IFPM SB RAS, topic FW RW-2021-0003.

For citation: Han Z., Li Zh., Tarbokov V.A., Ivanov Yu.F., Ivanov K.V., Klimenov V.A. Influence of pulsed ion beam treatment on the structure and properties of the alloy formed during electron beam printing with VT6SV wire. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):27–36. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-27-36](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-27-36)

Введение

Хорошо известно, что в процессе аддитивной технологии сплавы приобретают специфические структуру и свойства, отличающиеся от полученных традиционными методами [1; 2]. Связано это с тем, что при печати металлами их плавление происходит при взаимодействии с высокоэнергетическими концентрированными

потоками энергии (плазма, электрическая дуга, лазерный и электронный лучи). Поэтому в образующихся ваннах расплавов развиваются только неравновесные термические и гидродинамические процессы, в ходе которых при последующей кристаллизации формируются гибридные структуры и различные первичные и вторичные фазы.

Химический состав, %, сварочной проволоки VT6sv по ГОСТ 27265 – 87**Table 1. Chemical composition, %, of welding wire VT6sv according to GOST 27265 – 87**

Ti	Al	V	Si	Fe	O	H	N	C	Другие
Основа	3,5 – 4,5	2,5 – 3,5	0,10	0,15	0,12	0,003	0,04	0,50	0,30

Структура сплава при застывании ванны расплава зависит от физико-химических свойств материалов, механизмов кристаллизации (на поверхностях, в объеме или частицах), скорости охлаждения и возможных полиморфных превращений [3]. Наличие в процессе печати перемещения источника энергии от подложки в направлении построения объекта и послойного сканирования обуславливает формирование направленного теплоотвода и многократного нагрева формирующихся слоев, что сказывается на размерах зерен, ориентации кристаллов и образовании столбчатых структур в направлении наибольшего теплоотвода. В результате формируются специфические текстуры [4], структурные неоднородности, которые влияют на получение анизотропии свойств [5 – 8]. Определенный вклад в формирование специфической структуры и фазового состава вносит последовательное ступенчатое и сканирующее тепловое воздействие в результате выращивания объекта печати.

При электронно-лучевой печати проволокой, которая среди методов аддитивного производства характеризуется как высокопроизводительный метод, прочностные свойства сформированных при печати титановых сплавов существенно уступали сплавам, полученным по традиционным технологиям [9; 10]. Разработки различных решений по применению дополнительных упрочняющих обработок [9; 11 – 13] позволяли повысить прочностные характеристики, но при этом за счет снижения пластичности, что требовало поиска наиболее оптимальных подходов. Применение дополнительных обработок сказывалось на трудоемкости процессов печати, а значит на их экономической эффективности. Изучение сформированных при печати сплавов, их свойств и особенностей поведения при различных видах нагружения могут позволить использовать напечатанный материал без дополнительных объемных упрочняющих обработок [14; 15], ограничиваясь в отдельных случаях поверхностным модифицированием [16; 17]. Хотя методы поверхностной обработки, модификации образцов и нанесения покрытий достаточно широко применяются в различных отраслях промышленности и медицине, применение их в аддитивных технологиях начинает только обсуждаться [16 – 18]. Принимая во внимание,

что титановые сплавы активно используются в медицине (получение изделий аддитивными технологиями), в настоящей работе поставлена цель исследовать воздействие ионного пучка в вакууме [19] на поверхность титанового сплава, сформировавшегося при печати электронным лучом в вакууме проволокой марки VT6sv и провести сравнение с воздействием обычной термической обработкой [20]. При изучении поверхностной обработки титановых сплавов, используемых в медицине, обычно обсуждают улучшение износостойкости, коррозионной стойкости и биосовместимости. Если термическое воздействие не может сказаться на биосовместимости, то изменение структуры и состава сплава может влиять на прочностные свойства, а значит и на износостойкость поверхностных слоев.

Материалы и методы исследования

Образцы были получены на лабораторной установке электронно-лучевого аддитивного производства, разработанной в ИФПМ СО РАН [7]. Процесс формирования образцов осуществлялся путем сплавления титановой сварочной проволоки марки VT6sv диаметром 1,6 мм в условиях вакуума при давлении $10^{-3} - 10^{-2}$ Па (табл. 1).

Энергетическое воздействие с применением импульсной ионной обработки осуществляли на ускорителе ТЭМП-4М (рис. 1) при ускоряющем напряжении 200 кВ, длительности импульса на половине максимума 100 нс и плотности энергии 2 Дж/см² (для металлических материалов это режим с плавлением поверхностного слоя).

Плотность энергии была выбрана на основе результатов, полученных в работе [21]. Расстояние от ионного диода до обрабатываемой поверхности составляло 16 см. Состав ионного пучка следующий: до 70 % ионов углерода (C⁺, C⁺⁺), до 30 % протонов. Давление в вакуумной камере не превышало 2×10^{-4} Торр. Для измерения шероховатости поверхности образца использовали атомно-силовую микроскопию (АСМ) на приборе Nt-Mdt Ntegra Prima. Тонкую структуру исследовали в поперечном сечении методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM 2100 (Jeol) при ускоряющем напряжении 200 кВ. Фазовый состав устанавливали путем анализа электронной дифракции в выбранной области (SAED).

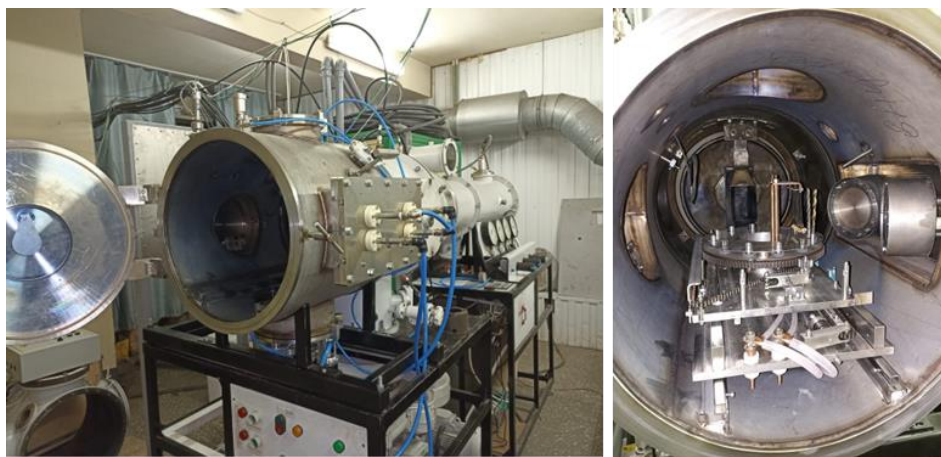


Рис. 1. Импульсный ионный ускоритель ТЭМП-4М:

a и *б* – общий вид и внутренняя камера

Fig. 1. Pulsed ion accelerator TEMP-4M:

a and *б* – general view and internal chamber

Образцы для электронной микроскопии вырезали размером $0,5 \times 1,5 \times 4$ мм с помощью электроэрозионного станка, а затем дополнительно обрабатывали ионной полировкой на установке ЕМ-09100IS (Jeol) при напряжении 7 кВ и угле наклона 4° . Образцы были протестированы на микротвердомере DUH-211S (Shimadzu, Япония), максимальная нагрузка 2000 мН.

Результаты и их обсуждение

Исходная после печати столбчатая структура обусловлена β -зернами вместе с преобладающими внутри параллельным игольчатым α' -мартенситом и α -фазой. В исходном состоянии сплав титана ВТ6св является поликристалли-

ческим агрегатом, в объеме зерен которого наблюдается двухфазная структура, сформированная чередующимися пластинами предположительно α -Ti и β -Ti (рис. 2). Подтверждением этого является микродифракционный анализ структуры сплава (рис. 3).

Ионная обработка сплава сопровождается существенным преобразованием структуры поверхностного слоя толщиной до 5,5 мкм (рис. 3, *a*, *б*). В-первых, наблюдается существенное изменение средних размеров пластин α -Ti: если в исходном состоянии поперечные размеры пластин изменялись в пределах 7 – 8 мкм, то после облучения они измельчаются до 50 – 70 нм. Во-вторых, облучение сплава сопровождается $\beta \rightarrow \alpha$ -превращением,

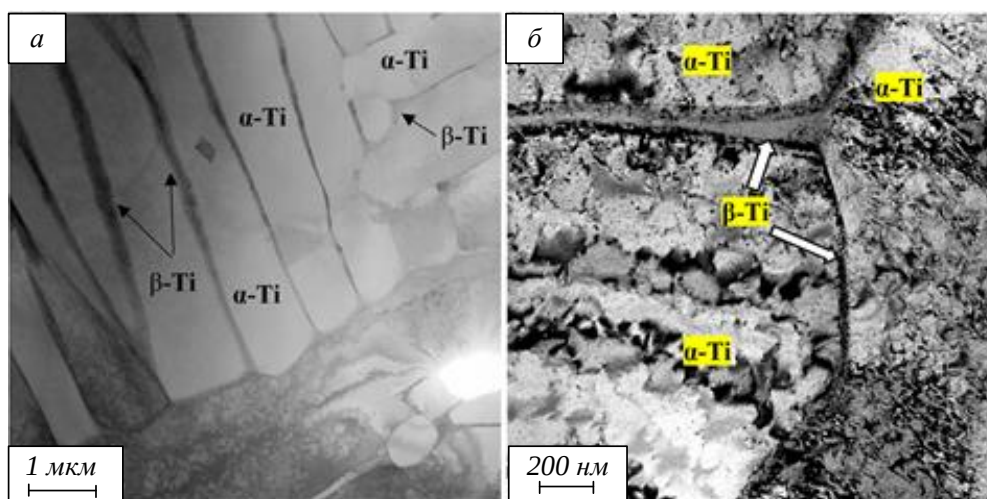


Рис. 2. Двухфазная структура сплава титана ВТ6св в исходном состоянии:

a – пластинчатая структура с чередующимися пластинами α -Ti и β -Ti (получено в сканирующем режиме работы электронного микроскопа); *б* – структура α -Ti зеренной морфологии, по границам зерна располагаются прослойки β -Ti (получено в режиме работы микроскопа на просвет)

Fig. 2. Two-phase structure of titanium alloy VT6sv in the initial state:

a – is a lamellar structure with alternating α -Ti and β -Ti plates (obtained in the scanning mode of operation of an electron microscope); *б* – is an α -Ti structure of grain morphology, with β -Ti interlayers along the grain boundaries (obtained in the lumen microscope mode)

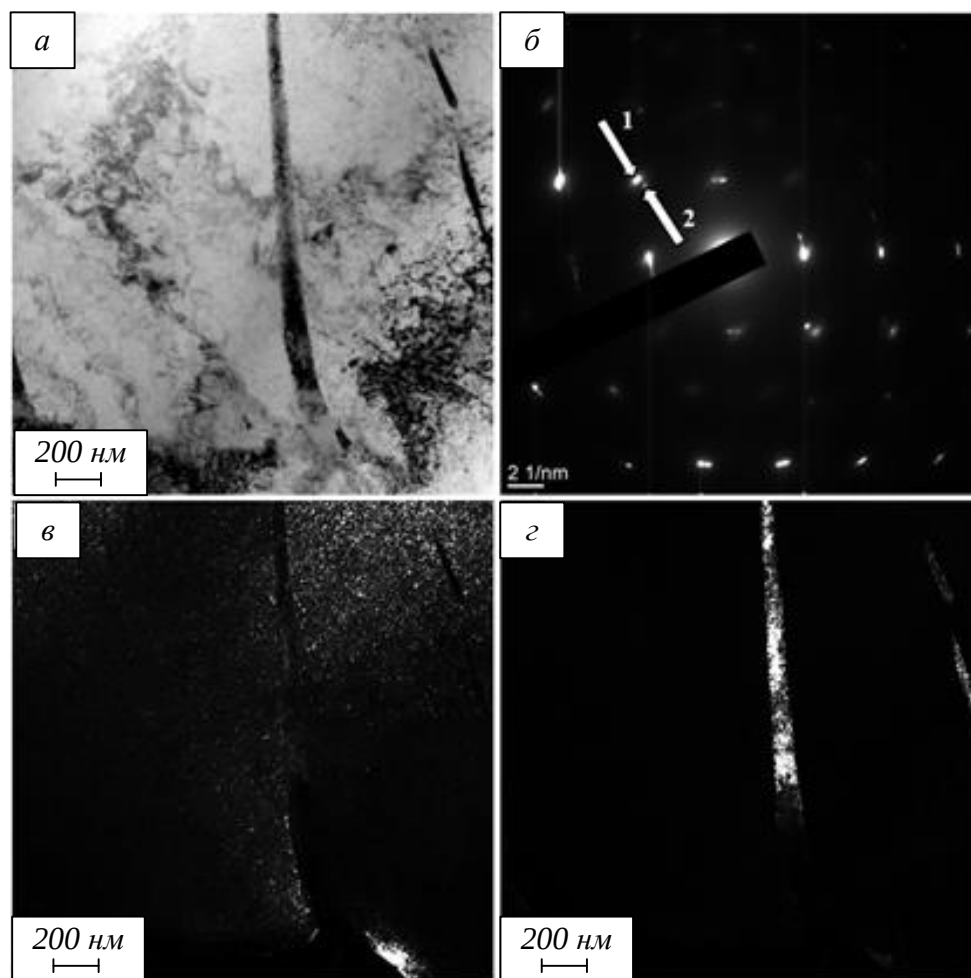


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава титана VT6sv в исходном состоянии: *a* – светлое поле; *б* – микроэлектроннограмма; *в* и *г* – темные поля, полученные в рефлексах [110] α -Ti и [200] β -Ti; стрелками на поз. *б* указаны рефлексы, в которых получены темные поля 1 и 2 для поз. *в* и *г*

Fig. 3. Electron microscopic image of the structure of titanium alloy VT6sv in the initial state: *a* – is the light field; *б* – is the microelectronogram; *c* and *d* are the dark fields obtained in reflexes [110] α -Ti and [200] β -Ti; the arrows in pos. *б* indicate reflexes in which dark fields 1 and 2 are obtained for pos. *в* and *г*

то есть допревращением β -фазы титана. В-третьих, наблюдается формирование наноразмерных частиц алюминидов ванадия Al_3V , расположенных вдоль границ пластин α -Ti (рис. 4, *г*).

Рассматриваемые преобразования структуры и фазового состава поверхностного слоя приведут к повышению прочностных, усталостных и трибологических свойств материала.

На верхней поверхности образца, подвергнутого шлифованию после печати (рис. 5, *а*), наблюдаются выраженные царапины, при этом высота неровностей поверхности *Rt* достигает 1,30 мкм, а средняя шероховатость составляет 0,212 мкм. После обработки материала ионным пучком с плотностью энергии 2 Дж/см² поверхность образца практически не содержит видимых царапин. Установлено, что импульсная ионная обработка приводит к снижению шероховатости до 0,134 мкм, при этом *Rt* уменьшается до 1,060 мкм (табл. 2). Это свидетельствует о том, что импульсная ионная обработка как

сглаживает острые кромки, образовавшиеся при механической обработке поверхности исходного образца, так и способствует уменьшению ее шероховатости. В работе [21] предположили, что такие параметры являются оптимальными для достижения эффективной остеоинтеграции. Морфология обработанной пучком поверхности является типичной для такого рода обработки [19 – 21]. Природа образования специфических кратеров для сплошного пучка диаметром в несколько сантиметров требует специальных исследований.

После ионного облучения твердость оплавленной и закристаллизовавшейся поверхности становится более равномерной, а ее среднее значение несколько возрастает по сравнению с исходной (с 254,39 до 261,37 HV).

В работе [20] было установлено, что субтрансузная термическая обработка не позволяет изменить морфологию исходного столбчатого β -зерна, приводит к распаду игольчатого α' -мартенсита

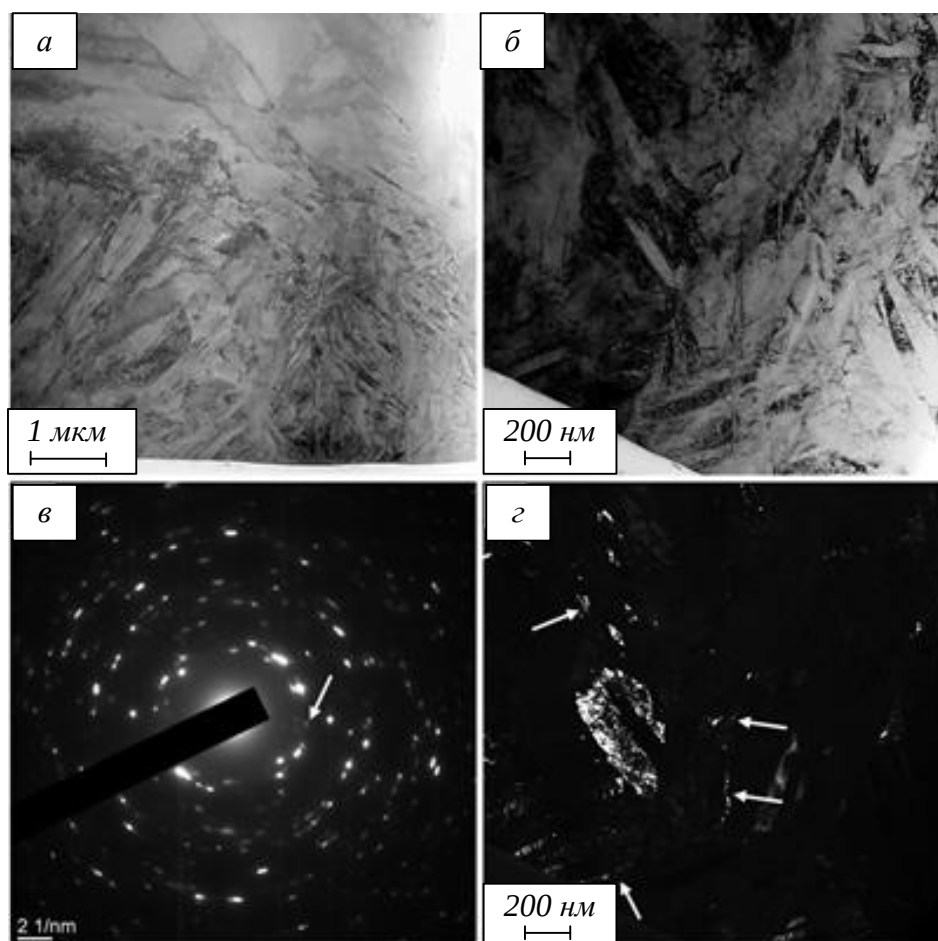


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава титана VT6sv после облучения мощным ионным пучком:
a, б – светлые поля; *в* – микроэлектроннограмма; *г* – темное поле, полученное в рефлексах $[101] \alpha\text{-Ti} + [103] \text{Al}_3\text{V}$;
 стрелками на поз. *г* указан рефлекс, в котором получено темное поле, на поз. *г* – наноразмерные выделения фазы Al_3V
 Fig. 4. Electron microscopic image of the structure of the titanium alloy VT6sv in the state after irradiation
 with a powerful ion beam:

a, б – bright fields; *в* – microelectron diffraction pattern; *г* – dark field obtained in reflections $[101] \alpha\text{-Ti} + [103] \text{Al}_3\text{V}$;
 the arrow in position *в* indicates the reflex in which the dark field is obtained, in position *г* – precipitates
 of the Al_3V phase are indicated

на пластинки в зависимости от температуры нагрева, в то время как термическая обработка за пределами температуры фазового перехода полностью разрушит исходное длинное столбчатое β -зерно, оставив только большое исходное разностное β -зерно, заполненное новым формирующимся игольчатым α' -мартенситом (тип – переплетения) и α -фазой. Полученные характе-

ристики твердости хорошо согласуются с наблюдаемыми структурными особенностями. В работе [22] определен оптимальный режим термической обработки титанового сплава, полученного 3D-печатью плазменной наплавкой проволочного материала: двухступенчатый отжиг, который обеспечивает требуемые физико-

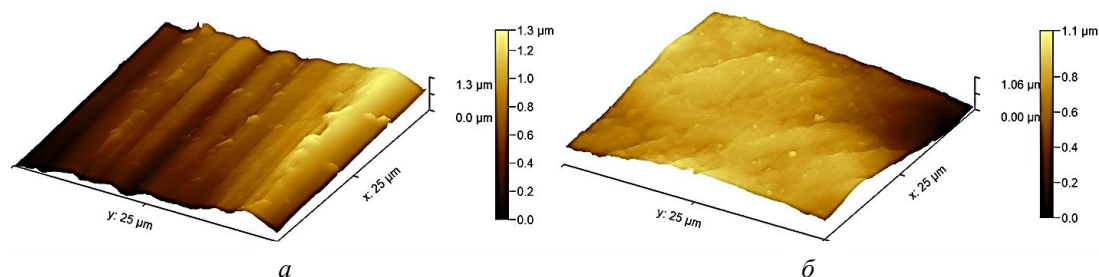


Рис. 5. АСМ-изображение поверхности исходного образца (*a*) и после импульсной ионно-пучковой обработки (*б*)
 Fig. 5. AFM image of the surface of the original sample (*a*) and after pulsed ion beam treatment (*б*)

Результаты измерения микрошероховатости

Table 2. Results of micro roughness measurement

Образец	R_t , μm	S_a , μm
Исходное состояние	1,300	0,212
После обработки	1,060	0,134
Примечание. R_t – это разность высот между пиками и впадинами поверхности; S_a – среднее отклонение высоты поверхности, рассчитанное по 2D-стандартам и распространенное на 3D-стандарты		

механические свойства получаемого металла. Режимы неполного и высокотемпературного полного отжига не приводят к улучшению прочностных характеристик материала по сравнению с их исходными значениями. Проведение закалки с последующим старением не измельчает первичные β -зерен. При старении закаленного образца происходит распад мартенсита и метастабильной β -фазы с образованием неблагоприятной крупнопластинчатой структуры ($\alpha + \beta$). Такие особенности структуры сплава не обеспечивают требуемых механических свойств, термообработанный сплав имеет достаточно высокие пластические свойства и самый высокий уровень ударной вязкости. Уровень предела прочности оказывается ниже исходных значений. По сравнению с традиционной термической обработкой, ионно-пучковую обработку можно использовать для улучшения характеристик титановых сплавов после печати и имеет широкие перспективы применения.

При изучении структурных особенностей, выявленных при печной термической обработке [9] методами электронной микроскопии получено, что после закалки структура напечатанного образца представляет собой пластинчатые α -Ti и первичный β -Ti. Последний в процессе закалки распадается с образованием α' -Ti, а при последующем низкотемпературном отжиге – на α_d -Ti. В структуре присутствуют два дополнительных компонента, представленные α/β -двойными структурами.

Выводы

Исследовано влияние импульсной ионной обработки на структуру и свойства сплавов, сформированных методом электронно-лучевой аддитивной печати с использованием проволоки марки ВТ6св.

Результаты экспериментов показали, что импульсная ионная обработка значительно улучшает микроструктуру поверхности титанового сплава, формируя модифицированный слой толщиной около 5,5 мкм. Под действием облучения в сплаве происходят фазовое $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение и формирование наночастиц состава Al_3V по границам

α -Ti-фазы. Эти структурные преобразования способствуют улучшению твердости материала: микротвердость увеличивается с 254,39 до 261,37 HV, при этом достигается более равномерное распределение твердости.

Импульсная ионная обработка сглаживает острые кромки, возникшие в процессе механической обработки поверхности, что приводит к улучшению шероховатости поверхности. Это способствует повышению биосовместимости медицинских имплантатов.

По сравнению с традиционной термической обработкой, импульсная ионная обработка демонстрирует более высокую эффективность в улучшении свойств титановых сплавов. В дальнейшем целесообразно сосредоточиться на оптимизации взаимосвязи между параметрами обработки и реакцией материала, что будет способствовать расширению применения рассматриваемой технологии в высокотехнологичных отраслях (медицине и аэрокосмической промышленности).

В целом можно констатировать, что импульсная ионная обработка представляет собой перспективное и эффективное решение для функционализации поверхности титановых сплавов, обладающее возможностью «выглаживания» поверхности и повышению ее износостойкости благодаря измельчению структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gaspar B. Microstructural characterization of Ti – 6Al – 4V and its relationship to sample geometry. *Materials Engineering*. 2012;1–22.
2. Ho W.F., Ju C.P., Chern J.H. Structure and properties of cast binary Ti – Mo alloys. *Biomaterials*. 1999;20(22):2115–2122. [https://doi.org/10.1016/s0142-9612\(99\)00114-3](https://doi.org/10.1016/s0142-9612(99)00114-3)
3. Suwas S., Vikram R.J. Texture Evolution in Metallic Materials During Additive Manufacturing. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*. 2021;6:991–1003.
4. Введение в физику кристаллизации металлов / Под. ред. Я.С. Уманского. Москва: Изд-во Мир, 1967:170.

5. Klimenov V., Kolubaev E., Chumaevskii A., Ustinov A., Strelkova I., Rubtsov V., Gurianov D., Han Z., Nikonov S., Batranin A., Khimich M. Influence of the Coarse Grain Structure of a Titanium Alloy Ti – 4Al – 3V Formed by Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing on Strain Inhomogeneities and Fracture. *Materials*. 2023;16(11):3901. <https://doi.org/10.3390/ma16113901>
6. Klimenov V.A., Kolubaev E.A., Han Z., Chumaevskii A.V., Klopotov A.A., Ustinov A.M., Kovalevskaya Z.G., Moskvichev E., Pan M. Influence of anisotropy properties and structural inhomogeneity on elasticity and fracture of titanium alloys produced by electron-beam melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;135:5575–5594.
7. Osipovich K., Kalashnikov K., Chumaevskii A., Gurianov D., Kalashnikova T., Vorontsov A., Zykova A., Utyaganova V., Panfilov A., Nikolaeva A., Dobrovolskii A., Rubtsov V., Kolubaev E. Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing: A Review. *Metals*. 2023;13(2):279. <https://doi.org/10.3390/met13020279>
8. Zhang T., Liu C.T. Design of titanium alloys by additive manufacturing: A critical review. *Advanced Powder Materials*. 2021;1(1):1–11. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2021.11.001>
9. Chumaevskii A., Tarasov S., Gurianov D., Moskvichev E., Rubtsov V., Savchenko N., Panfilov A., Korsunsky A., Kolubaev E. Analysis of the Structure and Properties of As-Built and Heat-Treated Wire-Feed Electron Beam Additively Manufactured (WEBAM) Ti – 4Al – 3V Spherical Pressure Vessel. *Metals*. 2024;14(12):1379. <https://doi.org/10.3390/met14121379>
10. Tekdir H., Yetim A.F. Additive manufacturing of multiple layered materials (Ti6Al4V/316L) and improving their tribological properties with glow discharge surface modification. *Vacuum*. 2021;184:109893.
11. Vanmeensel K., Lietaert K., Vrancken B., Dadbakhsh S., Li X., Kruth J.P., Krakhmalev P., Yadroitsev I., Humbeeck J.V. 8-Additively manufactured metals for medical applications. *Additive manufacturing Materials, Processes, Quantifications and Applications*. 2018:261–309.
12. Lu Y., Turner R., Brooks J., Basoalto H. Microstructural characteristics and computational investigation on electron beam welded Ti – 6Al – 4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;288:116837. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116837>
13. Popovich A.A., Sufiiarov V.S., Borisov E.V., Polozov I.A., Masaylo D.V., Grigoriev A.V. Anisotropy of mechanical properties of products manufactured using selective laser melting of powdered materials. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2017;58:389–395.
14. Xie B., Gao K. Research progress of surface treatment technologies on titanium alloys: a mini review. *Coatings*. 2023;13(9):1486. <https://doi.org/10.3390/coatings13091486>
15. Wang M., Li H.Q., Guo H., Feng L., Liu Sh.-Y., Fang X.-Y. Evolution of microstructure and intervariant boundaries of α phase in electron beam melted and heat-treated Ti – 6Al – 4V alloy. *Rare Metals*. 2021;40:2118–2126.
16. Slobodyan M., Pesterev E., Markov A. A review of high-energy processing techniques applied for additive manufacturing and surface engineering of cemented carbides and cermets. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;105(2):124–186. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.09.030>
17. Guehennec L.L., Soueidan A., Layrolle P., Amouriq Y. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. *Dental Materials*. 2007;23(7):844–854. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2006.06.025>
18. Panin A., Kazachenok M., Perevalova O., Martynov S., Panina A., Sklyarova E. Continuous Electron Beam Post-Treatment of EBF³-Fabricated Ti – 6Al – 4V Parts. *Metals*. 2019;9(6):699. <https://doi.org/10.3390/met9060699>
19. Remnev G.E., Isakov I.F., Opekounov M.S., Matvienko V.M., Ryzhkov V.A., Struts V.K., Grushin I.I., Zakoutayev A.N., Potyomkin A.V., Tarbokov V.A., Pushkaryov A.N., Kutuzov V.L., Ovsyannikov Yu.M. High intensity pulsed ion beam sources and their industrial applications. *Surface and Coatings Technology*. 1999;114(2-3):206–212. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00058-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00058-4)
20. Klimenov V., Kolubaev E., Chumaevskii A., Tarbokov V., Han Z. Prospective Surface Treatment Technologies for Ti Alloys Obtained by Additive Manufacturing. *Abstracts at 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024)*. Tomsk, 2024:296.
21. Tarbokov V.A., Pavlov S.K., Remnev G.E., Nochovnaya N.A., Eshkulov U.É. Titanium Alloy Surface Complex Modification. *Metallurgist*. 2019; 62:1187–1193. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00772-4>
22. Кривоносова Е.А., Акулова С.Н., Мышкина А.В. Исследование влияния различных видов термической обработки на физико-механические свойства титанового сплава. *Химия. Экология. Урбанистика*. 2021;1:354–358.

REFERENCES

1. Gaspar B. Microstructural characterization of Ti – 6Al – 4V and its relationship to sample geometry. *Materials Engineering*. 2012;22.
2. Ho W.F., Ju C.P., Chern J.H. Structure and properties of cast binary Ti – Mo alloys. *Biomaterials*. 1999; 20(22):2115–2122. [https://doi.org/10.1016/s0142-9612\(99\)00114-3](https://doi.org/10.1016/s0142-9612(99)00114-3)
3. Suwas S., Vikram R.J. Texture Evolution in Metallic Materials During Additive Manufacturing. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*. 2021;6:991–1003.
4. Umansky Ya.S. ed. *Introduction to the Physics of Metal Crystallization*. Moscow: Izd-vo Mir. 1967:170. (In Russ.).
5. Klimenov V., Kolubaev E., Chumaevskii A., Ustinov A., Strelkova I., Rubtsov V., Gurianov D., Han Z., Nikonov S., Batranin A., Khimich M. Influence of the Coarse Grain Structure of a Titanium Alloy Ti – 4Al – 3V Formed by Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing on Strain Inhomogeneities and Fracture. *Materials*. 2023;16(11):3901. <https://doi.org/10.3390/ma16113901>
6. Klimenov V.A., Kolubaev E.A., Han Z. Chumaevskii A.V., Klopotov A.A., Ustinov A.M., Kovalevskaya Z.G., Moskvichev E. Pan M. Influence of anisotropy properties and structural inhomogeneity on elasticity and fracture of titanium alloys produced by electron-beam melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024; 135:5575–5594.
7. Osipovich K., Kalashnikov K., Chumaevskii A., Gurianov D., Kalashnikova T., Vorontsov A., Zytkova A., Utyaganova V., Panfilov A., Nikolaeva A., Dobrovolskii A., Rubtsov V., Kolubaev E. Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing: A Review. *Metals*. 2023;13(2):279. <https://doi.org/10.3390/met13020279>
8. Zhang T., Liu C.T. Design of titanium alloys by additive manufacturing: A critical review. *Advanced Powder Materials*. 2021;1(1):1–11. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2021.11.001>
9. Chumaevskii A., Tarasov S., Gurianov D., Moskvichev E., Rubtsov V., Savchenko N., Panfilov A., Korsunsky A., Kolubaev E. Analysis of the Structure and Properties of As-Built and Heat-Treated Wire-Feed Electron Beam Additively Manufactured (WEBAM) Ti – 4Al – 3V Spherical Pressure Vessel. *Metals*. 2024;14(12):1379. <https://doi.org/10.3390/met14121379>
10. Tekdir H., Yetim A.F. Additive manufacturing of multiple layered materials (Ti6Al4V/316L) and improving their tribological properties with glow discharge surface modification. *Vacuum*. 2021;184:109893.
11. Vanmeensel K., Lietaert K., Vrancken B., Dadbakhsh S., Li X., Kruth J.P., Krakhmalev P., Yadroitsev I., Humbeeck J.V. 8-Additively manufactured metals for medical applications. *Additive manufacturing Materials, Processes, Quantifications and Applications*. 2018:261–309.
12. Lu Y., Turner R., Brooks J., Basoalto H. Microstructural characteristics and computational investigation on electron beam welded Ti – 6Al – 4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;288:116837. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116837>
13. Popovich A.A., Sufiiarov V.S., Borisov E.V., Polozov I.A., Masaylo D.V. Grigoriev A.V. Anisotropy of mechanical properties of products manufactured using selective laser melting of powdered materials. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2017;58:389–395.
14. Xie B., Gao K. Research progress of surface treatment technologies on titanium alloys: a mini review. *Coatings*. 2023;13(9):1486. <https://doi.org/10.3390/coatings13091486>
15. Wang M., Li H.Q., Guo H., Feng L., Liu Sh.-Y., Fang X.-Y. Evolution of microstructure and intervariant boundaries of α phase in electron beam melted and heat-treated Ti – 6Al – 4V alloy. *Rare Metals*. 2021;40:2118–2126.
16. Slobodyan M., Pesterev E., Markov A. A review of high-energy processing techniques applied for additive manufacturing and surface engineering of cemented carbides and cermets. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;105(2):124–186. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.09.030>
17. Guehennec L.L., Soueidan A., Layrolle P., Amouriq Y. Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. *Dental Materials*. 2007;23(7):844–854. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2006.06.025>
18. Panin A., Kazachenok M., Perevalova O., Martynov S., Panina A., Sklyarova E. Continuous Electron Beam Post-Treatment of EBF³-Fabricated Ti – 6Al – 4V Parts. *Metals*. 2019;9(6):699. <https://doi.org/10.3390/met9060699>
19. Remnev G.E., Isakov I.F., Opekounov M.S., Matvienko V.M., Ryzhkov V.A., Struts V.K., Grushin I.I., Zakoutayev A.N., Potyomkin A.V., Tarbokov V.A., Pushkaryov A.N., Kutuzov V.L., Ovsyannikov Yu.M. High intensity pulsed ion beam sources and their industrial applications. *Surface and Coatings Technology*. 1999;114(2-3):206–212. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00058-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00058-4)
20. Klimenov V., Kolubaev E., Chumaevskii A., Tarbokov V., Han Z. Prospective Surface Treatment Technologies for Ti Alloys Obtained by Additive Manufacturing. *Abstracts at 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024)*. Tomsk, 2024:296 – 296.
21. Tarbokov V.A., Pavlov S.K., Remnev G.E., Nochovnaya N.A., Eshkulov U.É. Titanium Alloy Surface Complex Modification. *Metallurgist*. 2019; 62:1187–1193. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00772-4>
22. Krivonosova E.A., Akulova S.N., Myshkina A.V. Study of the influence of different types of heat

treatment on the physical and mechanical properties of titanium alloy. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika*. 2021;1:354–358. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Цзэли Хань, аспирант, инженер, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: hanzelizy@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6502-6541

SPIN-код: 3444-2695

Чжэньюань Ли, д.т.н., доцент, Шэньянский политехнический университет

E-mail: zhengyuan-li@syu.edu.cn

ORCID: 0000-0002-1515-4008

Владислав Александрович Тарбоков, к.т.н., ведущий инженер, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: tarbokovv@tpu.ru

ORCID: 0000-0001-9366-5965

SPIN-код: 6043-8895

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

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7958

SPIN-код: 7576-4810

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

E-mail: ikv@ispms.tsc.ru

ORCID: 0000-0002-8003-271X

SPIN-код: 4432-8819

Василий Александрович Клименов, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: klimenov@tpu.ru

ORCID: 0000-0001-7583-0170

SPIN-код: 9036-3306

Information about the authors:

Zeli Han, postgraduate student, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University

E-mail: hanzelizy@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6502-6541

SPIN-код: 3444-2695

Zhengyuan Li, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Shenyang Polytechnic University.

E-mail: zhengyuan-li@syu.edu.cn

ORCID: 0000-0002-1515-4008

Vladislav A. Tarbokov, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engi, National Research Tomsk Polytechnic University

E-mail: tarbokovv@tpu.ru

ORCID: 0000-0001-9366-5965

SPIN-код: 6043-8895

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher, Institute of High-Current Electronics SB RAS

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7958

SPIN-код: 7576-4810

Konstantin V. Ivanov, Dr. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS

E-mail: ikv@ispms.tsc.ru

ORCID: 0000-0002-8003-271X

SPIN-код: 4432-8819

Vasilii A. Klimenov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, National Research Tomsk Polytechnic University

E-mail: klimenov@tpu.ru

ORCID: 0000-0001-7583-0170

SPIN-код: 9036-3306

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 27.04.2025

После доработки 15.05.2025

Принята к публикации 22.05.2025

Received 27.04.2025

Revised 15.05.2025

Accepted 22.05.2025

Оригинальная статья

УДК 539.2;669.017

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-37-43

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И
ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА**

© 2025 г. Л. П. Башенко

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

Аннотация. Модифицирование поверхностных слоев изделий из металлических материалов сопровождается изменением эксплуатационных характеристик: повышаются твердость, износостойкость, жаростойкость. В настоящее время для модифицирования поверхности применяются лазерная обработка, электронно-лучевое и плазменное легирование, в том числе электровзрывное легирование. Применение современных методов упрочнения поверхности с использованием концентрированных потоков энергии (электровзрывное легирование и электронно-пучковая обработка) особенно актуально для локального воздействия на изделия из титана и титановых сплавов. Целью работы являлось выявление формирования структурно-фазовых состояний при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке поверхности технически чистого титана марки ВТ1-0 с точки зрения повышения функциональных свойств для практического применения. Разработанный способ упрочнения поверхности титана включает электровзрывное науглероживание и последующую электронно-пучковую обработку зоны легирования. Особенности каждого метода определяют выбор режимов обработки. Проведено изучение тепловых процессов при этих обработках с учетом особенностей каждого метода, позволяющее обоснованно выбирать режимы обработки. Установлено влияние режимов электронно-пучковой обработки на микротвердость поверхностных слоев, формирование максимумов в глубине зоны легирования и кратное повышение микротвердости поверхностных слоев. Выявлены особенности структурно-фазовых состояний и механизмы упрочнения поверхностных слоев технически чистого титана при электровзрывном науглероживании и последующей электронно-пучковой обработке. В зоне обработки формируется градиентная многофазная структура, толщина слоев которой коррелирует с распределением микротвердости по глубине. На основании полученных экспериментальных данных сделан вывод, что комбинированная обработка поверхности технически чистого титана марки ВТ1-0, сочетающая электровзрывное науглероживание и последующую электронно-пучковую обработку зоны легирования, обеспечивает повышение микротвердости и глубины зоны упрочнения.

Ключевые слова: технически чистый титан, электровзрывное легирование, электронно-пучковая обработка, структура, функциональные свойства, глубина зоны обработки

Для цитирования: Башенко Л.П. Применение электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки для упрочнения поверхности титана. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):37–43. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-37-43](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-37-43)

Original article

**THE USE OF ELECTRO-EXPLOSIVE ALLOYING AND ELECTRON BEAM
TREATMENT TO HARDEN THE SURFACE OF TITANIUM**

© 2025 L. P. Bashchenko

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

Abstract. Modification of the surface layers of products made of metallic materials is accompanied by a change in performance characteristics: hardness, wear resistance, and heat resistance increase. Currently, laser processing,

electron beam and plasma alloying, including electro-explosive alloying, are used to modify the surface. The application of modern methods of surface hardening using concentrated energy flows (such as electro-explosive alloying and electron beam treatment) is especially relevant for local effects on titanium and titanium alloy products. The aim of the work was to identify the formation of structural and phase states during electro-explosive alloying and electron beam surface treatment of technically pure titanium grade VT1-0 from the point of view of increasing functional properties for practical use. The developed method for hardening the titanium surface includes electro-explosive carburization and subsequent electron beam treatment of the alloying zone. The features of each method determine the choice of processing modes. The thermal processes during these treatments have been studied, taking into account the specifics of each method, which makes it possible to reasonably choose the treatment modes. The effect of electron beam processing modes on the microhardness of the surface layers, the formation of maxima in the depth of the alloying zone, and a multiple increase in the microhardness of the surface layers has been established. The features of the structural and phase states and the mechanisms of hardening of the surface layers of technically pure titanium during electroexplosion carburization and subsequent electron beam treatment are revealed. A gradient multiphase structure is formed in the treatment area, the thickness of the layers of which correlates with the depth distribution of microhardness. Based on the experimental data obtained, it is concluded that the combined surface treatment of technically pure titanium grade VT1-0, combining electro-explosive carburization and subsequent electron beam treatment of the alloying zone, provides an increase in microhardness and depth of the hardening zone.

Keywords: technically pure titanium, electro-explosive alloying, electron beam processing, structure, functional properties, depth of the processing zone

For citation: Bashchenko L.P. The use of electro-explosive alloying and electron beam treatment to harden the surface of titanium. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):37–43. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-37-43](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-37-43)

Введение

Применение концентрированных потоков энергии (КПЭ) [1; 2] для поверхностной модификации обеспечивает существенное улучшение эксплуатационных характеристик изделий из металлических материалов [3 – 6]. Наблюдается изменение различных функциональных свойств: многократно повышаются твердость, износостойкость, жаростойкость [7 – 9].

Среди современных методов модифицирования поверхности выделяются лазерная обработка [10], электронно-лучевое и плазменное легирование [11 – 13], в том числе электровзрывное легирование (ЭВЛ) [14 – 16]. Для упрочнения поверхности в промышленности все чаще используют локальные методы упрочнения поверхности с использованием концентрированных потоков энергии (ЭВЛ [17; 18] и электронно-пучковая обработка (ЭПО) [19]) с использованием низкоэнергетических сильнооточных электронных пучков).

Широкую сферу применения имеют титановые сплавы. Они характеризуются низкой износостойкостью, повышенным коэффициентом трения при взаимодействии с большинством конструкционных материалов, склонностью к налипанию. Именно поэтому для титановых сплавов особенно актуально применение КПЭ [20 – 24].

Целью настоящей работы является выявление особенностей формирования структурно-фазовых состояний при ЭВЛ и ЭПО поверхности легирования технически чистого титана марки

BT1-0 с точки зрения повышения функциональных свойств для практического применения с учетом экономической эффективности обработки.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе материалом исследования являлся технически чистый титан марки BT1-0. Этот материал не содержит никаких специальных добавок, кроме примесей, суммарное содержание которых не превышает 0,3 %. Технически чистый титан марки BT1-0 выбран как модельный материал для надежной интерпретации результатов.

Исследования структуры упрочненных слоев проводили с использованием методов световой (микроскоп Olympus GX 51) и электронной сканирующей микроскопии (СЭМ) (микроскоп Carl Zeiss EVO50), рентгеноспектрального микроанализа, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (микроскоп ЭМ-125), рентгеноструктурного анализа (дифрактометры ДРОН-2,0 и ARL X'TRA). Упрочнение поверхности оценивали, определяя микротвердость модифицированных слоев (прибор HVS-1000A).

Результаты работы и их обсуждение

Функциональные свойства поверхности и всего изделия во многом зависят от особенностей структуры и фазового состава именно поверхностных слоев. При определении конкретных методов упрочнения металлов и сплавов учет этого обязателен. При использовании для по-

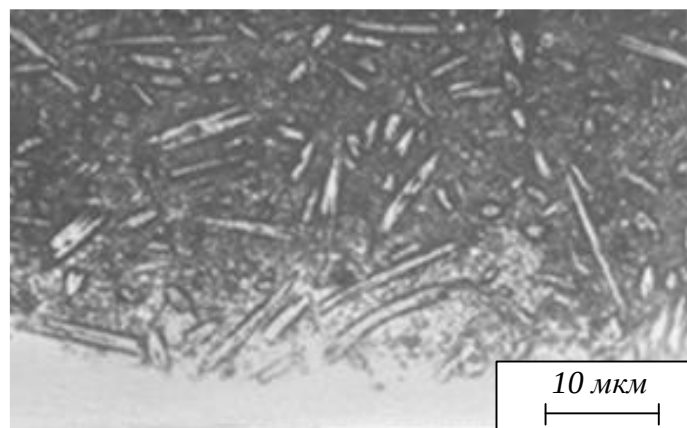


Рис. 1. Вид поперечного шлифа (структура) после ЭВЛ (науглероживание) титана (световая микроскопия)
Fig. 1. View of a cross-section (structure) after EVL (carburization) of titanium (light microscopy)

верхностного легирования лазерного, электронно-пучкового и плазменного нагрева поверхности наблюдаются самые лучшие показатели упрочнения. Структура, фазовый состав и свойства модифицированных слоев поверхности сильно зависят от технологических особенностей методов обработки. Большое влияние на формируемые структуру и фазовый состав, а, соответственно, и свойства, оказывают параметры воздействия при ЭВЛ и ЭПО. Поглощаемая плотность мощности (порядка $10^5 - 10^6$ Вт/см²), глубина воздействия (порядка 10 мкм), размеры зоны воздействия ($3 - 5$ см²) сопоставимы при ЭВЛ и ЭПО, именно поэтому возможно применение этих видов обработки совместно. При одновременном использовании ЭВЛ и ЭПО (при комбинированной обработке) формируются новые структурно-фазовые состояния поверхностных слоев металлов и сплавов. Таким образом, область практического применения рассматриваемых видов обработки увеличивается [16]. При используемых параметрах обработки образуются поверхностные слои с аморфной нано- и субмикроструктурной структурой. Толщина поверхностных слоев составляет порядка $10^{-7} - 10^{-6}$ м.

Параметры ЭВЛ: поглощаемая плотность мощности q_p 5,5 ГВт/м², длительность τ_p импульса 100 мкс. Оплавление и легирование поверхностного слоя при таком режиме ЭВЛ происходит без выплеска расплава. В качестве взрывающего проводника в настоящей работе использована углеродная лента марки ЛУ-П/0,1-50 массой 140 мг.

Электронно-пучковую обработку полученной поверхности легирования осуществляли на установке «Соло» (Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН) [19]. Параметры ЭПО: поглощаемая плотность мощности q_e 2,0, 2,25 и 3,0 ГВт/м², длительность τ_e импульсов 100 и 200 мкс; частота f следования импульсов 0,3 Гц; количество N импульсов 5 и 10.

Эксперимент проводили при давлении 0,02 Па в аргоне.

По результатам сканирующей электронной микроскопии видно, что при ЭВЛ происходит науглероживание титана. Формируемое несплошное покрытие характеризуется развитым рельефом и высокой шероховатостью [25; 26]. В структуре поверхности хорошо различимы три характерные морфологические составляющие: конгломераты частиц графита, титана и карбида титана глобулярной морфологии (75 % площади поверхности); частицы углеродных волокон (15 %); области твердого раствора на основе титана с наноразмерными включениями карбида титана (10 %).

На поперечных шлифах образцов при исследовании методом световой микроскопии выделяется зона легирования толщиной примерно 50 мкм. Углерод (в виде частиц углеродных волокон) распределен по всей глубине зоны легирования до самой границы с основой (рис. 1). При химическом травлении выявляется карбид титана (на снимке в виде светлых частиц глобулярной формы).

В зоне легирования (по результатам микроdifракционного ПЭМ-анализа) наблюдаются следующие фазы: карбид титана TiC; β -титан; графит наноразмерного диапазона с кубической и гексагональной кристаллической решеткой; оксид титана β -TiO₂. Зеренная структура титана содержит дислокации. Скалярная плотность дислокаций составляет примерно $5,6 \cdot 10^{10}$ см⁻².

Частицы карбида титана глобулярной формы (4 – 10 нм) формируются на поверхности и в приповерхностном слое углеродных волокон, а также на поверхности и в приповерхностном слое зерен титана.

После ЭПО покрытие объединяется с зоной легирования. Зона упрочнения двухслойная (рис. 2). Слой, расположенный около поверхности, толщиной около 20 мкм можно считать зоной переплавления при ЭПО, в которой при

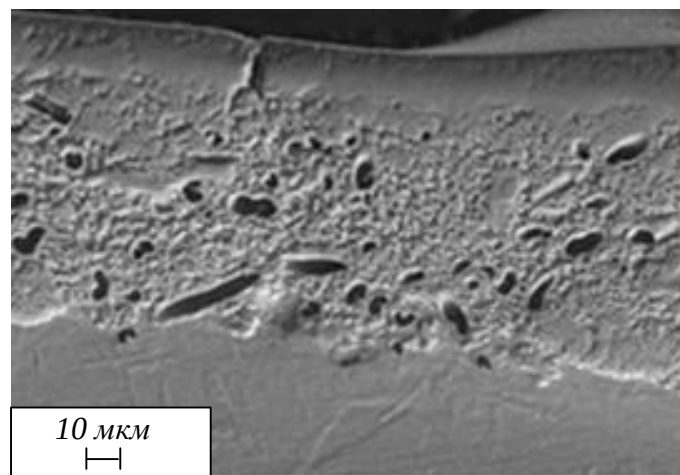


Рис. 2. Вид поперечного шлифа (структура) после ЭВЛ (науглероживание) и ЭПО титана
Fig. 2. View of cross-section (structure) after EVL and EPO of titanium

проведении СЭМ-анализа этого слоя частицы углеродных волокон не выявляются. В слое толщиной 60 мкм, находящемся под слоем переплавления, наблюдается большое количество карбида титана глобулярной морфологии и частицы не до конца провзаимодействовавших с титаном углеродных волокон. Общая толщина зоны упрочнения составляет около 80 мкм, то есть по сравнению с зоной науглероживания при ЭВЛ увеличивается в 1,6 раза.

В процессе фазовый состав на глубине 20 – 25 мкм выравнивается. После комбинированной обработки (по результатам рентгенофазового анализа) этот слой состоит из 63 % α -титана; 25 % TiC; 4 % TiB₂; 6 % TiB; 1 – 2 % B₄C (% по объему). По результатам микроструктурного и микрофракционного анализов видно, что в поверхностном слое присутствуют α -титан и карбид титана TiC. Включения карбида титана имеют глобулярную форму, их средние размеры составляют примерно 300 нм.

На глубине 5 – 8 мкм наблюдается двухфазный слой, состоящий из α -Ti и карбида титана TiC. Размеры кристаллитов карбидной фазы изменяются в пределах 150 – 250 нм.

На глубине 40 – 45 мкм наблюдается более грубая структура.

В процессе работы было изучено распределение микротвердости по глубине модифицированных слоев при различных режимах обработки: время обработки (длительность импульса) τ_e составляло 100 и 200 мкс. На рис. 3 представлен пример распределения микротвердости при 100 мкс.

Выявлено, что положение максимумов микротвердости коррелируется с положением границ раздела верхнего слоя, переплавленного при ЭПО, с нижележащей зоной легирования и зоны легирования с основой сплава. Общая глубина

зоны упрочнения с уровнем микротвердости около 2000 HV составляет 30 – 50 мкм.

Полученные распределения микротвердости и микроскопические исследования рельефа и структурно-фазовых состояний поверхностных слоев титана BT1-0 после электровзрывного карбоборирования и ЭПО поверхности легирования [22] дают основание сделать вывод, что упрочнение достигается вследствие формирования высокодисперсной структуры, упрочненной частицами карбида и боридов титана.

Выводы

Разработан способ упрочнения поверхности титана и определены его параметры. Способ включает электровзрывное науглероживание и последующую электронно-пучковую обработку зоны легирования. Установлено влияние режимов электронно-пучковой обработки на микротвердость поверхностных слоев, формирование максимумов значений микротвердости в глубине зоны легирования. Выявлены особенности структурно-фазовых состояний и механизмы упрочнения поверхностных слоев технически

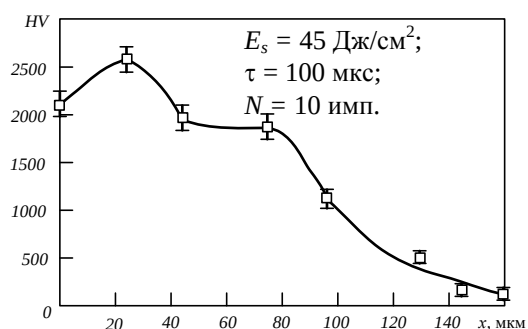


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине после комбинированной обработки
Fig. 3. Microhardness distribution by depth after combined treatment

чистого титана при электровзрывном науглероживании и последующей электронно-пучковой обработке. Комбинированная обработка поверхности технически чистого титана марки ВТ1-0, сочетающая электровзрывное науглероживание и последующую ЭПО зоны легирования, обеспечивает повышение микротвердости и глубины зоны упрочнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перевертов В.П., Андрончев И.К., Абулкасимов М.М. Технологии обработки материалов концентрированным потоком энергии. *Надежность и качество сложных систем*. 2015;3(11):69–79.
2. Перевертов В.П., Андрончев И.К., Абулкасимов М.М. Инновационные технологии обработки материалов концентрированным потоком энергии в ГПС. В кн.: *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2015;1:29–35.
3. Петров П.Ю. Исследования поверхностной обработки изделий (материалов) машиностроения электронным лучом. *Мировая наука*. 2020;3(36):602–618.
4. Fedun V.I., Kolyada Yu.E. Dynamics of phase transformations by electron beam surface modification of metals and alloys. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2010;4:316–320.
5. Astashynski V.M., Ananin S.I., Askerko V.V., Kostyukevich E.A., Kuzmitski A.M., Uglov V.V., Anishchik V.M., Astashynski V.V., Kvasov N.T., Danilyuk A.L. Materials surface modification using quasi-stationary plasma accelerators. *Show more Surface and Coatings Technology*. 2004;180-181:392–395.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.098>
6. Grishin Yu.M., Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Panasenko K.N., Chepegin D.V., Shashkovskiy S.G. Radiation-plasmodynamic method of surface hardening of steels and alloys. In: *Plasma technique and plasma technologies: collection of scientific papers*. Moscow: Publ. of NITs «Inzhener», 2003:193.
7. Cherenda N.N., Uglov V.V., Anishchik V.M., Stalmashonak A.K., Astashynski V.M., Kuzmickii A.M., Punko A.V., Thorwarth G.B., Stritzker B. Modification of high-speed steels by nitrogen compression plasma flow: structure, element composition, tribological properties. *Surface and Coatings Technology*. 2006;200(18-19):5334–5342.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.06.007>
8. Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N. Modification of material properties and coating deposition using plasma jets. *Physics Uspekhi*. 2005;48(5):487–514.
<https://doi.org/10.1070/PU2005v048n05ABEH002055>
9. Korotaev A.D., Tyumentsev A.N., Pinzhin Yu.P., Remnev G.E. Features of the morphology, defect substructure, and phase composition of metal and alloy surfaces upon high-power ion irradiation. *Surface and Coatings Technology*. 2004;185(1):38–49.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.11.021>
10. Vedernikova I.I., Poletaev V.A. Application of laser modification for strengthening the working surfaces of machine details. *JARITS*. 2019;15:18–25.
<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-15-18-25>
11. Nikolchuk I.S., Chumakov A.N., Kuznechik O.O., Minko D.V. Pulsed plasma surface treatment of constructional steel in the air. In: *7 International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology»: contributed papers*. Minsk, 2012:438–441.
12. Aleksandrov V.V., Belan N.V., Kozlov N.P., Mashtylev N.A., Popov G.A., Protasov Yu.S., Khvesyuk V.I. *Pulsed Plasma Accelerators*. Khar'kov: Kharkiv Aviation Institute. 1983:247.
13. Астапчик С.А., Голубев В.С., Маслаков А.Г. *Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке*. Минск: Белорусская наука, 2008:251.
14. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006:664.
15. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. *Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки металлов*. Москва: Круглый год, 2001:528.
16. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. *Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов*. Новокузнецк: СибГИУ, 2007:301.
17. Будовских Е.А. Закономерности формирования поверхностных слоев металлов и сплавов при электровзрывном легировании: автореф. дисс. докт. техн. наук. Новокузнецк, 2008:37.
18. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. *Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов*. Новокузнецк: СибГИУ, 2007:304.
19. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке. *Известия вузов. Физика*. 2008;51(5):60–70.

20. Lei M.K., Dong Z.H., Zhang Z., Hu Y.F., Zhu X.P. Wear and corrosion resistance of Ti_6Al_4V alloy irradiated by high-intensity pulsed ion beam. *Surf Coat Technol.* 2007;201(9):5613–5616. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.013>
 21. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynskiy V.M., Kuzmitskiy A.M. Thermal stability of the structure and phase composition of titanium treated with compression plasma flows. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* 2018;12:710–716. <https://doi.org/10.1134/S102745101804016X>
 22. Башенко Л.П. Упрочнение поверхности титана при электровзрывном науглероживании и карбоборировании и последующей электронно-пучковой обработке: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк, 2013:17.
 23. Асташинский В.М., Углов В.В., Черенда Н.Н., Шиманский В.И. Модификация титана при воздействии компрессионными плазменными потоками. Минск: Белорусская наука, 2016:179.
 24. Gao Y.-K. Influence of pulsed electron beam treatment on microstructure and properties of TA15 titanium alloy. *Applied Surface Science.* 2013;264:633–635. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.10.083>
 25. Башенко Л.П., Ефименко И.Т., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Иванов К.В., Ионина А.В., Громов В.Е. Особенности модифицирования поверхностных слоев титана при электровзрывном науглероживании. *Физика и химия обработки материалов.* 2012;2:65–69.
- REFERENCES**
1. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Abulkasimov M.M. Technologies for processing materials using concentrated energy flow. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem.* 2015;3(11):69–79. (In Russ.).
 2. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Abulkasimov M.M. Innovative technologies of materials processing by concentrated energy flow in GPS. In: *Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality»*. 2015;1:29–35. (In Russ.).
 3. Petrov P.Yu. Research of surface treatment of products (materials) of mechanical engineering by electron beam. *Mirovaya nauka.* 2020;3(36):602–618. (In Russ.).
 4. Fedun V.I., Kolyada Yu.E. Dynamics of phase transformations by electron beam surface modification of metals and alloys. *Problems of Atomic Science and Technology.* 2010;4:316–320.
 5. Astashynskiy V.M., Ananin S.I., Askerko V.V., Kostyukevich E.A., Kuzmitskiy A.M., Uglov V.V., Anishchik V.M., Astashynskiy V.V., Kvasov N.T., Danilyuk A.L. Materials surface modification using quasi-stationary plasma accelerators. *Show more Surface and Coatings Technology.* 2004;180-181:392–395. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.098>
 6. Grishin Yu.M., Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Panasenkov K.N., Chepegin D.V., Shashkovskiy S.G. Radiation-plasmodynamic method of surface hardening of steels and alloys. In: *Plasma technique and plasma technologies: collection of scientific papers.* Moscow: Publ. of NITs «Inzhener», 2003:193.
 7. Cherenda N.N., Uglov V.V., Anishchik V.M., Stalmashonak A.K., Astashynskiy V.M., Kuzmitskiy A.M., Punko A.V., Thorwarth G.B., Stritzker B. Modification of high-speed steels by nitrogen compression plasma flow: structure, element composition, tribological properties. *Surface and Coatings Technology.* 2006;200(18–19):5334–5342. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.06.007>
 8. Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N. Modification of material properties and coating deposition using plasma jets. *Physics Uspekhi.* 2005;48(5):487–514. <https://doi.org/10.1070/PU2005v048n05ABEH002055>
 9. Korotaev A.D., Tyumentsev A.N., Pinzhin Yu.P., Remnev G.E. Features of the morphology, defect substructure and phase composition of metal and alloy surfaces upon high-power ion irradiation. *Surface and Coatings Technology.* 2004;185(1):38–49. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.11.021>
 10. Vedernikova I.I., Poletaev V.A. Application of laser modification for strengthening the working surfaces of machine details. *JARITS.* 2019;15:18–25. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-15-18-25>
 11. Nikolchuk I.S., Chumakov A.N., Kuznechik O.O., Minko D.V. Pulsed plasma surface treatment of constructional steel in the air. In: *7 International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology»: contributed papers.* Minsk, 2012:438–441.
 12. Aleksandrov V.V., Belan N.V., Kozlov N.P., Mashtylev N.A., Popov G.A., Protasov Yu.S., Khvesyuk V.I. *Pulsed Plasma Accelerators.* Khar'kov: Kharkiv Aviation Institute, 1983:247.
 13. Astapchik S.A., Golubev V.S., Maslakov A.G. *Laser technologies in mechanical engineering*

- and metalworking. Minsk: Belorusskaya nauka. 2008:251. (In Russ.).
14. Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Laser processing technologies*. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2006:664. (In Russ.).
 15. Gribkov V.A., Grigor'ev F.I. Kalin B.A., Yakushin V.L. *Promising radiation beam technologies for metal processing*. Moscow: Kruglyi god, 2001:528. (In Russ.).
 16. Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Physical principles of electroexplosive alloying of metals and alloys*. Novokuznetsk: SibGIU, 2007:301. (In Russ.).
 17. Budovskikh E.A. Regularities of formation of surface layers of metals and alloys during electric explosive alloying; abstract of Doctor of Technical Sciences. Novokuznetsk. 2008:37. (In Russ.).
 18. Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Physical principles of electroexplosive alloying of metals and alloys*. Novokuznetsk: SibGIU. 2007:304. (In Russ.).
 19. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of the surface of metal-ceramic and ceramic materials using pulsed electron beam processing. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2008;51(5):60–70. (In Russ.).
 20. Lei M.K., Dong Z.H., Zhang Z., Hu Y.F., Zhu X.P. Wear and corrosion resistance of Ti6Al4V alloy irradiated by high-intensity pulsed ion beam. *Surf Coat Technol.* 2007;201(9):5613–5616. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.013>
 21. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynskii V.M., Kuzmitski A.M. Thermal stability of the structure and phase composition of titanium treated with compression plasma flows. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2018;12:710–716. <https://doi.org/10.1134/S102745101804016X>
 22. Bashchenko L.P. Hardening of titanium surface by electroexplosive carburization and carbonization with subsequent electron beam processing. Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Novokuznetsk, 2013:17. (In Russ.).
 23. Astashinskii V.M., Uglov V.V., Cherenda N.N., Shimanskii V.I. *Modification of titanium under the influence of compression plasma flows*. Minsk: Belorusskaya nauka, 2016:179. (In Russ.).
 24. Gao Y.-K. Influence of pulsed electron beam treatment on microstructure and properties of TA15 titanium alloy. *Applied Surface Science*. 2013;264:633–635. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.10.083>
 25. Bashchenko L.P., Efimenko I.T., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Ivanov K.V., Ionina A.V., Gromov V.E. Features of modification of titanium surface layers during electroexplosive carburization. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2012;2:65–69. (In Russ.).

Сведения об авторе:

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

Information about the author:

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

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

Поступила в редакцию 28.05.2025
 После доработки 12.06.2025
 Принята к публикации 16.06.2025

Received 28.05.2025
 Revised 12.06.2025
 Accepted 16.06.2025

Оригинальная статья

УДК 669-1

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-44-51

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА НАПЛАВЛЕНИЯ НА ТВЕРДОСТЬ СТАЛИ 12X18H10T ПОСЛЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

© 2025 г. К. Е. Еремицкая, Е. А. Носова, А. В. Балякин

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

Аннотация. Методом прямого лазерного выращивания на установке ИЛИСТ-Л были получены образцы из нержавеющей стали марки 12X18H10T при мощности лазерного излучения 1100 – 1500 Вт с толщиной стенки 10 мм для случая горизонтального и вертикального направлений выращивания образцов относительно большей стороны. Проведено исследование твердости и микротвердости образцов, выявлены их зависимости от режима выращивания. Установлено, что наиболее рациональным режимом, при котором достигаются однородность и высокий уровень свойств, является режим, мощность которого составляет 1400 Вт. Вертикальное направление выращивания, вызывающее более интенсивное охлаждение образцов, позволяет получить в среднем на 5 – 15 % более высокую микротвердость, чем горизонтальное направление выращивания. Повышение мощности от 1100 до 1400 Вт приводит к уменьшению этой разницы до нуля, но дальнейшее увеличение мощности до 1500 Вт вызывает повышение различий до 15 % за счет снижения микротвердости горизонтально выращенных образцов. Независимо от направления выращивания во всем диапазоне значений мощности (от 1100 до 1500 Вт) твердость стали марки 12X18H10T в приповерхностных областях имеет пониженные на 15 – 17 % значения по сравнению с центральной областью образцов. Исследование влияния параметров режима наплавления слоев на твердость и микротвердость изготавливаемой продукции из стали марки 12X18H10T методом прямого лазерного выращивания предоставляет основу для выбора мощности лазера и понимания его воздействия на механические свойства нержавеющей стали при разных направлениях выращивания.

Ключевые слова: прямое лазерное выращивание, нержавеющая сталь, режим наплавления, твердость, образцы, микротвердость

Для цитирования: Еремицкая К.Е., Носова Е.А., Балякин А.В. Исследование влияния параметров режима наплавления на твердость стали 12X18H10T после прямого лазерного выращивания. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):44–51. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-44-51](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-44-51)

Original article

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE DEPOSITION MODE ON THE HARDNESS OF 12CR18NI10TI STEEL AFTER DIRECT LASER CULTIVATION

© 2025 K. E. Eremitzkaya, E. A. Nosova, A. V. Balyakin

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

Abstract. Using the direct laser cultivation method at the ILIST-L installation, samples of stainless steel grade 12X18H10T were obtained at a laser radiation power of 1100 – 1500 W with a wall thickness of 10 mm for the case of horizontal and vertical directions of growing samples relative to the larger side. The hardness and

microhardness of the samples were studied, and their dependences on the growing regime were revealed. It has been established that the most rational mode, in which uniformity and a high level of properties are achieved, is the mode with a power of 1400 watts. The vertical growing direction, which causes more intense cooling of the samples, allows for an average of 5 to 15 % higher microhardness than the horizontal growing direction. An increase in power from 1100 to 1400 W reduces this difference to zero, but a further increase in power to 1500 W increases the differences by up to 15 % due to a decrease in the microhardness of horizontally grown samples. Regardless of the direction of cultivation, in the entire range of power values (from 1100 to 1500 W), the hardness of 12X18H10T grade steel in the near-surface areas has values reduced by 15 – 17 % compared to the central region of the samples. The study of the effect of the parameters of the layer deposition mode on the hardness and microhardness of manufactured products made of 12X18H10T grade steel by direct laser cultivation provides the basis for choosing the laser power and understanding its effect on the mechanical properties of stainless steel in different growing directions.

Keywords: direct laser growing, stainless steel, deposition mode, hardness, samples, microhardness

For citation: Eremit'skaya K.E., Nosova E.A., Balyakin A.V. Investigation of the effect of the deposition mode parameters on the hardness of 12Cr18Ni10T steel after direct laser cultivation. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):44–51. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-44-51](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-44-51)

Введение

Технология прямого лазерного выращивания (ПЛВ) является одной из аддитивных технологий, находящая широкое распространение в машиностроении благодаря возможности получения изделий сложной формы за счет послойного выращивания из металлического порошка, подаваемого в зону действия лазерного излучения сжатой струей газа [1 – 4].

Для получения изделий методом прямого лазерного выращивания используется широкий спектр материалов, в том числе наиболее распространенные в машиностроении нержавеющие стали аустенитного класса (08X18H9, 12X18H10T или 316L) [5 – 10].

При реализации технологии ПЛВ в зависимости от материала порошковой композиции и требований к изделию в оборудовании предусмотрены возможности выбора мощности, направления и скорости движения лазерного луча, направления движения подачи струи металла. Сочетание указанных параметров влияет на качество и скорость производства изделий. Например, для получения образцов и изделий из нержавеющей сталей марок 08X18H9 или 316L мощность лазерного излучения может варьироваться в диапазоне 200 – 1600 Вт, скорость перемещения лазерного луча 2,3 – 35 мм/с, скорость подачи порошковой смеси 0,6 – 6 г/с, размер лазерного пятна 2,9 – 5,6 мм [5; 11 – 14]. При этом достигаются пределы прочности 536 – 776 МПа и текучести 310 – 576 МПа, относительного удлинения 20 – 70 %, микротвердости 172 – 250 НВ. При выращивании относительно толстостенных и объемных изделий применяются следующие траектории выращивания: параллельное расположение выращенных «дорожек» как в одной плоскости, так и при чередовании слоев, а также

поворот дорожек под углом 90° по отношению к дорожкам предыдущего слоя. Направление выращивания изделий зависит от технических возможностей, в результате чего рабочие нагрузки при эксплуатации изделий могут быть направлены под различными углами по отношению к выращенным слоям и дорожкам. В зависимости от условий эксплуатации получаемых изделий требования к свойствам могут быть различны (от ярко выраженной анизотропии до максимальной равномерности свойств).

Наиболее распространенным вариантом проверки свойств изделий является измерение твердости, которое позволяет оценить средний уровень механических характеристик без разрушения изделия или при незначительном повреждении поверхности. Другой важной характеристикой является микротвердость, которая позволяет оценить механические свойства в локальных областях и выявить равномерность свойств по толщине образцов. Микротвердость дает возможность косвенно оценить структурные изменения в материале в результате выращивания в зависимости от параметров процесса. Например, в работе [15] для стали марки 316L изучен уровень микротвердости для зоны центра дорожки и области между дорожками и слоями: в центральной зоне микротвердость имеет пониженные на 3 – 5 % значения по сравнению с диффузионной (пограничной) зоной.

Целью настоящей работы является изучение влияния технологических параметров процесса ПЛВ (мощность лазерного излучения и направления выращивания) на твердость и микротвердость стали марки 12X18H10T.

Материалы, методы и принципы исследования

Образцы были получены из металлопорошковой композиции стали марки 12X18H10T, хи-

мический состав (ГОСТ 14086 – 68) которой следующий: 16,0 – 20,0 % Cr; 8,0 – 11,0 % Ni; 0,12 % C; менее 0,8 % Si; менее 1,0 % Mn; менее 0,02 % S; менее 0,035 % P; остальное Fe.

Образцы для исследований были выращены на установке ИЛИСТ-L по схеме, представленной на рис. 1, при мощности выращивания 1100, 1200, 1300, 1400 и 1500 Вт. Диаметр пятна лазера 2 мм, скорость движения луча 20 мм/с. Стратегия выращивания была выбрана с повторяющимися слоями-дорожками.

Из выращенных заготовок отрезали образцы размером $10 \times 10 \times 10$ мм с использованием смазывающе-охлаждающей жидкости.

Для исследуемых образцов были проведены измерения микротвердости с помощью аппаратно-программного комплекса NEXSYS ImageExpert, а также измерение твердости с помощью стационарного твердомера NOVOTEST TC-P.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлена зависимость микротвердости от направления выращивания и мощности лазерного излучения. Диапазон изменения микротвердости в зависимости от мощности лазера и направления выращивания находится в пределах 152 – 197 HV, что составляет примерно 25 – 26 % от среднего значения. Отметим, что для каждого значения мощности присутствуют

точки с пониженной микротвердостью, существенно отличающиеся от среднего уровня величин. Эти значения были получены при измерении в областях, близких к краю образцов. Наибольшие различия между микротвердостью в центральных и периферийных зонах образцов наблюдаются для вертикального выращивания, при мощности лазера 1500 Вт расхождения минимальны, но при этом наблюдается максимальные различия между значениями для вертикального и горизонтального выращивания.

Микротвердость в образцах, выращенных вертикально, имеет более высокие значения, чем у образцов, выращенных в горизонтальном направлении. Увеличение мощности лазера от 1100 до 1500 Вт при вертикальном выращивании приводит к снижению микротвердости, но наблюдается ее снижение при мощности 1200 и 1400 Вт. Увеличение мощности при горизонтальном выращивании образцов приводит к повышению микротвердости в среднем на 10 %, достигая максимальных значений 175 – 182 HV при мощности лазера 1400 Вт. При этой же мощности достигается примерно одинаковый уровень микротвердости для образцов, выращенных горизонтально и вертикально.

На рис. 3 представлена зависимость твердости от направления выращивания и мощности лазерного излучения.

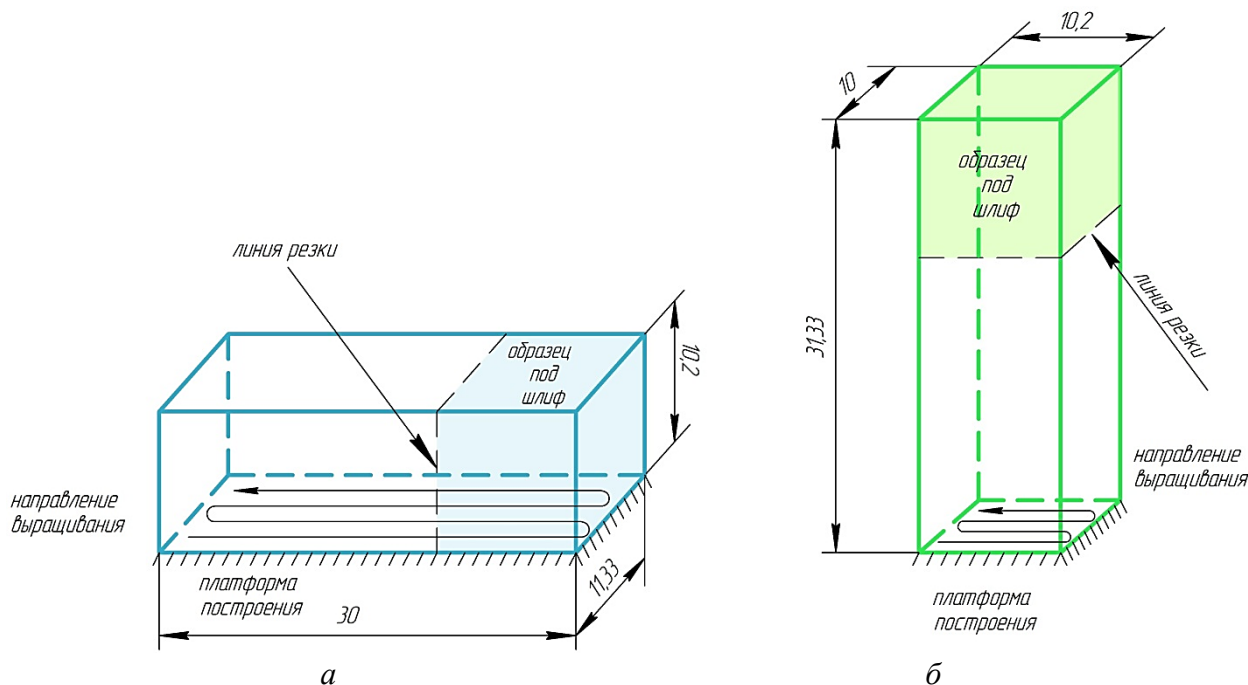


Рис. 1. Схемы изготовления образцов методом ПЛВ (размеры, мм, указаны после отделения от платформы построения):

a и *б* – горизонтальное и вертикальное выращивание

Fig. 1. Schemes for sample production by the DLD method (dimensions, mm, are given after separation from the construction platform):

a and *б* – horizontal and vertical sedimentation

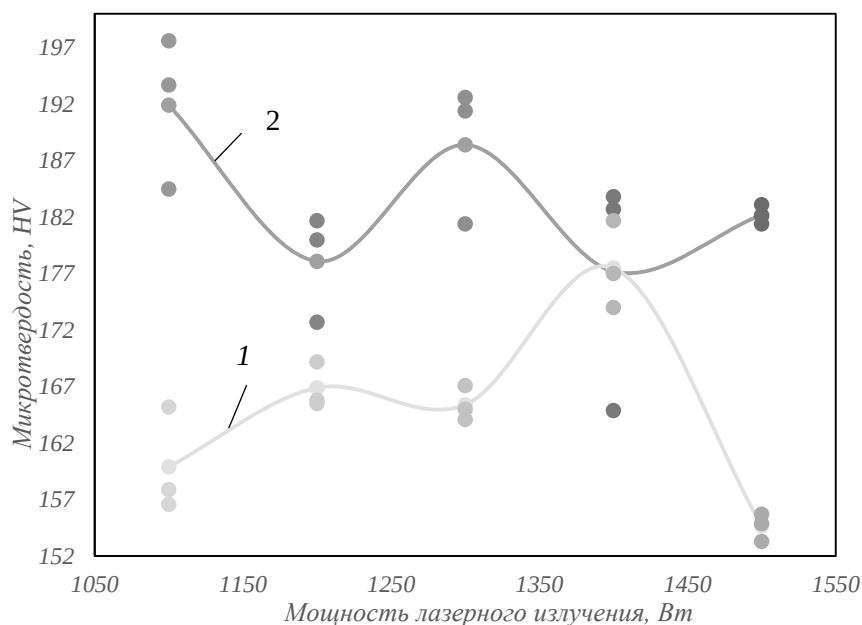


Рис. 2. Зависимость микротвердости от направления выращивания и мощности лазерного излучения:

1 и 2 – горизонтальное и вертикальное выращивание

Fig. 2. Dependence of microhardness on the direction of growth and laser power:

1 and 2 – horizontal and vertical sedimentation

Твердость образцов при изменении мощности (от 1100 до 1500 Вт) лазера при выращивании составляет 84 – 102 HRB, что составляет 20 % от среднего значения. Указанные данные со-

ответствуют образцам с вертикальным направлением выращивания. Для горизонтального выращивания диапазон изменения твердости находится в пределах 88 – 98 HRB,

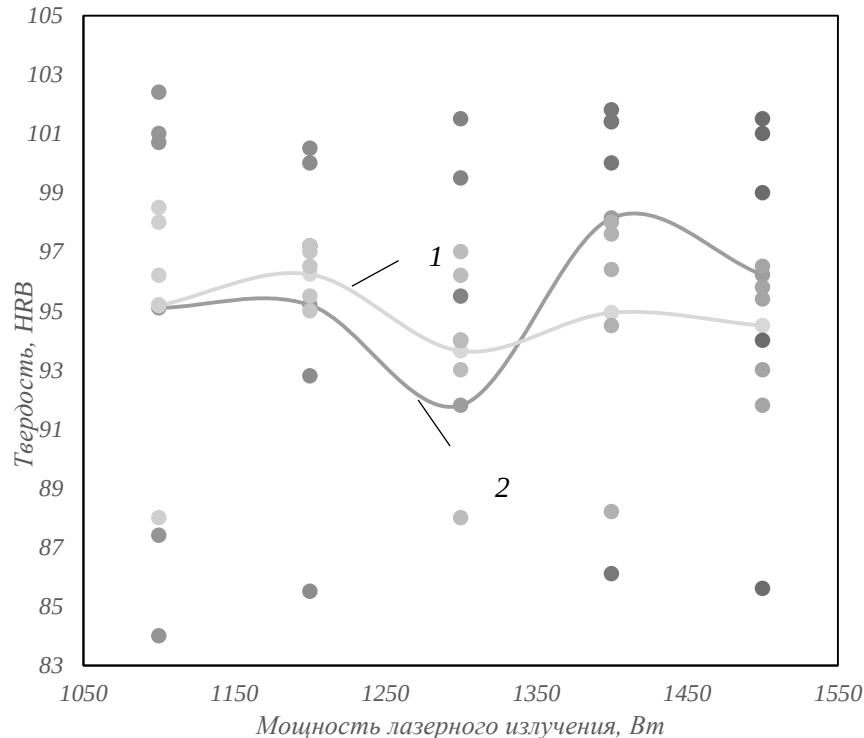


Рис. 3. Зависимость твердости от направления выращивания и мощности лазерного излучения

(твердость от 84,0 до 88,2 HRB получена на глубине 22 мм от поверхности образца):

1 и 2 – горизонтальное и вертикальное выращивание

Fig. 3 Hardness dependence on the direction of growth and laser power (hardness values from 84.0 to 88.2 HRB were obtained at a depth of 22 mm from the sample surface):

1 and 2 – horizontal and vertical sedimentation

что составляет около 11 % от среднего значения. Несмотря на схожую динамику кривых твердости, наибольшее значение твердости было получено у образцов, выращенных вертикально при мощности излучения 1400 Вт. Для образцов, выращенных горизонтально, максимум наблюдался при мощности 1200 Вт.

В работах [11; 13; 14] получено, что повышение мощности излучения от 200 до 1500 Вт приводит к снижению микротвердости от 180 до 150 HV. Эти результаты согласуются с полученными значениями, представленными в настоящей работе. Анализ результатов показывает, что переход от одного технологического режима к другому приводит к неоднородности распределения растворимых примесей по зерну [16].

В работе [15] в результате прямого лазерного выращивания образцов из стали марки 316L при мощности 1,4 кВт, скорости подачи порошка 14 г/мин и скорости сканирования 1000 мм/мин была получена микротвердость 172 – 187 HV для середины дорожки и 178 – 199 HV для зон между слоями. С увеличением размера зерна в зоне дорожек от 0,42 до 0,49 мкм и между слоями от 0,36 до 0,48 мкм твердость возрастает, подчиняясь закону Холла-Петча. Изменение микротвердости связано с размером зерна, хотя также обнаружено наличие оксидов на границе слоев, что также может служить причиной различий твердости в теле дорожки и на границах между ними.

В работе [17] после выращивания образцов из стали марки 316L при мощности 650 и 1300 Вт и скорости сканирования 6 и 12 мм/с при схеме выращивания с поворотом штриха на 90° последующего слоя относительно предыдущего в микроструктуре обнаружены дефекты сплавления. Проведенный элементный анализ показал неоднородность распределения элементов в пределах зерна и дорожек сплавления. В граничных областях наблюдается повышенное на 10 – 15 % относительно среднего значения содержание Cr, Ni, Mo, Mn, Si по сравнению с центром или телом зерна размером 2 – 4 мкм. Это может вызывать изменения микротвердости, в том числе и за счет влияния легирующих элементов на образование аустенитных или ферритных структур. Также выявлено скопление пор размером 0,5 – 1,0 мкм [15].

В работе [18] изучение влияния режима ПЛВ на свойства крупногабаритных заготовок из стали марки 316L при мощности 1600 Вт, скорости сканирования 800 мм/мин, скорости подачи порошка 10 г/мин позволило получить микротвердость 175 – 250 HV в области установившегося режима сплавления на расстоянии 7 – 8 мм и более от подложки из малоуглеродистой стали с

микротвердостью 125 – 150 HV, причем в переходной зоне или в области начала сплавления микротвердость достигает уровня 380 HV. Пористость, изученная на образцах в настоящей работе, показала повышенные значения (17 – 20 %) на сечениях у подложки и на расстоянии 47 мм от нее. Между этими сечениями пористость составляет 10 – 15 %. Изменения микротвердости с этими наблюдениями пористости связаны слабо.

Выводы

Проведение испытаний на микротвердость и твердость образцов из стали марки 12X18H10T с толщиной стенки 10 мм, полученных технологией ПЛВ при мощности лазерного излучения 1100 – 1500 Вт вертикальном и горизонтальном направлении выращивания, показало, что наиболее рациональным режимом, при котором достигаются однородность и высокий уровень свойств, является режим, мощность которого составляет 1400 Вт.

Вертикальное направление выращивания, вызывающее более интенсивное охлаждение образцов, позволяет получить в среднем на 5 – 15 % более высокие значения микротвердости, чем при горизонтальное направление. Повышение мощности от 1100 до 1400 Вт приводит к уменьшению этой разницы до нуля, но дальнейшее увеличение мощности до 1500 Вт вызывает увеличение различий до 15 % за счет снижения микротвердости горизонтально выращенных образцов.

Независимо от направления выращивания во всем диапазоне мощности от 1100 до 1500 Вт твердость стали марки 12X18H10T в приповерхностных областях имеет пониженные значения на 15 – 17 % по сравнению с центральной областью образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров В.Б. Актуальность метода прямого лазерного выращивания в аддитивном производстве. Технологии обработки. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук. Прочие технологии*. 2024;4–5(91):152–156. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-4-5-152-156>
2. Ронжин Д.А., Григорьянц А.Г., Холопов А.А. Влияние технологических параметров на структуру металла изделий, полученных методом прямого лазерного выращивания из титанового порошка ВТ-6. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2022;9(750):30–42. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-9-30-42>
3. Gong G., Ye J. et al. Research status of laser additive manufacturing for metal: a review.

- Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:855–884.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.050>
4. Madhavadasa V., Srivastava D. et al. A review on metal additive manufacturing for intricately shaped aerospace components. *CIRP J ournal of Manufacturing. Science and Technology*. 2022;39:18–36.
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.07.005>
 5. Грязнов М.Ю., Шотин С.В., Чувильдеев В.Н., Семенычева А.В., Мусяев Р.К., Юхимчук А.А. Повышение механических характеристик нержавеющей стали 316L методом послойного лазерного сплавления и исследование влияния пористости на них. *Проблемы прочности и пластичности*. 2023;85(3):375–389.
<https://doi.org/10.32326/1814-9146-2023-85-3-375-389>
 6. Zhao C., Bai Y., Zhang Y., Wang X., Xue J.M., Wang H. Influence of scanning strategy and building direction on microstructure and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel. *Materials & Design*. 2021;209:1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109999>
 7. Dwivedi S., Dixit A.R., Kumar A. Wetting behavior of selective laser melted (SLM) biomedical grade stainless steel 316L. *Materials Today: Proceedings*. 2022;56(1):46–50.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.046>
 8. Zhang C., Zhang L., Xu H., Li P., Qian B. Performance of pool boiling with 3D grid structure manufactured by selective laser melting technique. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;128:570–580.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.021>
 9. Колмаков А.Г., Иванников А.Ю., Каплан М.А., Кирсанкин А.А., Севостьянов М.А. Коррозионностойкие стали в аддитивном производстве. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(9):619–650.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-619-650>
 10. Vukkum V.B., Gupta R.K. Review on corrosion performance of laser powder-bed fusion printed 316L stainless steel: Effect of processing parameters, manufacturing defects, post-processing, feedstock, and microstructure. *Materials & Design*. 2022;221:1–45.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110874>
 11. Ишкиняев Э.Д., Петровский В.Н., Польский В.Н., Джумаев П.С., Сергеев К.Л., Щекин А.С., Панов Д.В., Ушаков Д.В. Исследование механических характеристик образцов из нержавеющей стали, полученных методом прямого лазерного выращивания. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2019;10(3):233–237.
<https://doi.org/10.1134/S2079562919020064>
 12. Долгова С.В., Маликов А.Г., Голышев А.А., Никулина А.А. Влияние режимов лазерной наплавки на геометрические размеры стального трека. *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. 2024;26(2):57–70.
<https://doi.org/10.17212/1994-6309-2024-26.2-57-70>
 13. Складар М.О., Туричин Г.А., Климова О.Г., Зотов О.Г., Топалов И.К. Исследование влияния параметров прямого лазерного выращивания на микроструктуру изделий из стали 316L. *Сталь*. 2016;12:71–75.
 14. Zhang A., Wu W., Wu M., Liu Y., Zhang Y., Wang Q. Influence of laser power on mechanical properties and pitting corrosion behavior of additively manufactured 316L stainless steel by laser powder bed fusion (L-PBF). *Optics & Laser Technology*. 2024;176:1–17.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110886>
 15. Tan Z.E., Pang J.H.L., Kaminski J., Pepin H. Characterisation of porosity, density, and microstructure of directed energy deposited stainless steel AISI 316L. *Additive Manufacturing*. 2019;25:286–296.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.014>
 16. Jardin R.T., Tuninetti V., Tchuindjang J.T., Duchêne L., Hashemi N., Tran H. S., Carrus R., Mertens A., Habraken A. M. Optimizing laser power of directed energy deposition process for homogeneous AISI M4 steel microstructure. *Optics & Laser Technology*. 2023;163:1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109426>
 17. Mukherjee M. Effect of build geometry and orientation on microstructure and properties of additively manufactured 316L stainless steel by laser metal deposition. *Materialia (Elsevier)*. 2019;7:100359.
<https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100359>
 18. Feenstra D.R., Cruz V., Gao X., Molotnikov A., Biribilis N. Effect of build height on the properties of large format stainless steel 316L fabricated via directed energy deposition. *Additive Manufacturing*. 2020;34:1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101205>

REFERENCES

1. Fedorov V.B. Actuality of the method of direct laser growing in additive manufacturing. Processing technologies. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk. Prochie tekhnologii*. 2024;4-5(91):152–156. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-4-5-152-156>

2. Ronzhin D.A., Grigor'yants A.G., Kholopov A.A. The influence of technological parameters on the metal structure of products obtained by direct laser growth from VT-6 titanium powder. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye*. 2022;9(750):30–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-9-30-42>
3. Gong G., Ye J. et al. Research status of laser additive manufacturing for metal: a review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:855–884. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.050>
4. Madhavadasa V., Srivastava D. et al. A review on metal additive manufacturing for intricately shaped aerospace components. *CIRP Journal of Manufacturing. Science and Technology*. 2022;39:18–36. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.07.005>
5. Gryaznov M.Yu., Shotin S.V., Chuvil'deev V.N., Semenycheva A.V., Musyaev R.K., Yukhimchuk A.A. Improving the mechanical properties of 316L stainless steel by layer-by-layer laser melting and studying the influence of porosity on them. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2023;85(3):375–389. (In Russ.). <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2023-85-3-375-389>
6. Zhao C., Bai Y., Zhang Y., Wang X., Xue J.M., Wang H. Influence of scanning strategy and building direction on microstructure and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel. *Materials & Design*. 2021;209:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109999>
7. Dwivedi S., Dixit A.R., Kumar A. Wetting behavior of selective laser melted (SLM) biomedical grade stainless steel 316L. *Materials Today: Proceedings*. 2022;56(1):46–50. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.046>
8. Zhang C., Zhang L., Xu H., Li P., Qian B. Performance of pool boiling with 3D grid structure manufactured by selective laser melting technique. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;128:570–580. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.021>
9. Kolmakov A.G., Ivannikov A.Yu., Kaplan M.A., Kirsankin A.A., Sevost'yanov M.A. Corrosion-resistant steels in additive manufacturing. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2021;64(9):619–650. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-9-619-650>
10. Vukcum V.B., Gupta R.K. Review on corrosion performance of laser powder-bed fusion printed 316L stainless steel: Effect of processing parameters, manufacturing defects, post-processing, feedstock, and microstructure. *Materials & Design*. 2022;221:1–45. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110874>
11. Ishkinyayev E.D., Petrovskii V.N., Pol'skii V.N., Dzhumaev P.S., Sergeev K.L., Shchekin A.S., Panov D.V., Ushakov D.V. Study of mechanical characteristics of stainless steel samples obtained by direct laser growth method. *Yadernaya fizika i inzhiniring*. 2019;10(3):233–237. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2079562919020064>
12. Dolgova S.V., Malikov A.G., Golyshev A.A., Nikulina A.A. The influence of laser cladding modes on the geometric dimensions of a steel track. *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*. 2024;26(2):57–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2024-26.2-57-70>
13. Sklyar M.O., Turichin G.A., Klimova O.G., Zotov O.G., Topalov I.K. Study of the influence of direct laser growth parameters on the microstructure of 316L steel products. *Stal'*. 2016;12:71–75. (In Russ.).
14. Zhang A., Wu W., Wu M., Liu Y., Zhang Y., Wang Q. Influence of laser power on mechanical properties and pitting corrosion behavior of additively manufactured 316L stainless steel by laser powder bed fusion (L-PBF). *Optics & Laser Technology*. 2024;176:1–17. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110886>
15. Tan Z.E., Pang J.H.L., Kaminski J., Pepin H. Characterisation of porosity, density, and microstructure of directed energy deposited stainless steel AISI 316L. *Additive Manufacturing*. 2019;25:286–296. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.014>
16. Jardin R.T., Tuninetti V., Tchuindjang J.T., Duchêne L., Hashemi N., Tran H.S., Carrus R., Mertens A., Habraken A.M. Optimizing laser power of directed energy deposition process for homogeneous AISI M4 steel microstructure. *Optics & Laser Technology*. 2023;163:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109426>
17. Mukherjee M. Effect of build geometry and orientation on microstructure and properties of additively manufactured 316L stainless steel by laser metal deposition. *Materialia (Elsevier)*. 2019;7:100359. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100359>
18. Feenstra D.R., Cruz V., Gao X., Molotnikov A., Birbilis N. Effect of build height on the properties of large format stainless steel 316L fabricated via directed energy deposition. *Additive Manufacturing*. 2020;34:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101205>

Сведения об авторах

Ксения Евгеньевна Еремицкая, магистрант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
E-mail: ksenyaeremitskaya@gmail.com
ORCID: 0009-0006-1235-6276
SPIN-код: 5155-6867

Екатерина Александровна Носова, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
E-mail: nosova.ea@ssau.ru
ORCID: 0000-0002-5490-3235
SPIN-код: 7286-4426

Андрей Владимирович Балякин, старший преподаватель кафедры технологий производства двигателей, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
E-mail: balaykinav@ssau.ru
ORCID: 0000-0002-1558-1034
SPIN-код: 2614-5059

Information about the authors:

Ksenya E. Eremitzkaya, Master's student, Samara National Research University
E-mail: ksenyaeremitskaya@gmail.com

ORCID: 0009-0006-1235-6276
SPIN-код: 5155-6867

Ekaterina A. Nosova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University
E-mail: nosova.ea@ssau.ru
ORCID: 0000-0002-5490-3235
SPIN-код: 7286-4426

Andrey V. Balyakin, Senior Lecturer, Department of Engine Manufacturing Technologies, Samara National Research University
E-mail: balaykinav@ssau.ru
ORCID: 0000-0002-1558-1034
SPIN-код: 2614-5059

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 12.02.2025

После доработки 17.03.2025

Принята к публикации 26.03.2025

Received 12.02.2025

Revised 17.03.2025

Accepted 26.03.2025

Оригинальная статья

УДК 669.187.4

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-52-61

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ НА СТОЙКОСТЬ
ОГНЕУПОРНОЙ ФУТЕРОВКИ**

© 2025 г. Е. В. Женин, А. Н. Шаповалов

Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС» (Россия, 462359, Оренбургская обл., Новотроицк, ул. Фрунзе, 8)

Аннотация. Одним из направлений повышения эффективности сталеплавильного производства является увеличение срока службы огнеупорной футеровки. Стойкость футеровки определяется составом и свойствами огнеупоров, условиями ее выполнения и последующей эксплуатацией. Изучено влияние параметров выплавки стали на стойкость огнеупорной футеровки гибких модульных печей (ГМП), эксплуатируемых в условиях электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) АО «Уральская Сталь» с 2019 г. Особенностью ГМП является возможность работы как в режиме дуговой сталеплавильной печи (ДСП), так и в режиме без использования электрической энергии, то есть по технологии конвертерной плавки с повышенной долей чугуна. Стойкость футеровки ГМП за исследуемые кампании изменялась в широких пределах от 270 до 450 плавов при среднем значении в 328 плавов. Приведены результаты исследования влияния основных технологических параметров выплавки стали в гибкой модульной печи на стойкость футеровки стен и подины. Показано, что основными технологическими факторами, определяющими стойкость футеровки и длительность кампании ГМП, являются продолжительность простоев (межплавочных периодов), окисленность шлака и содержание в нем оксида MgO. Получены количественные зависимости влияния исследуемых технологических параметров плавки на стойкость огнеупорной футеровки. Разработаны технологические рекомендации, позволяющие продлить срок службы огнеупорной футеровки: снижение продолжительность межплавочных периодов, уменьшение переокисления металла и шлака в результате остановки продувки при заданном содержании углерода (в соответствии с выплавляемой маркой стали), повышение содержания оксида MgO в шлаке до 8 – 10 %. Выполнение технологических рекомендаций позволит увеличить стойкость огнеупорной футеровки минимум на 25 % с соответствующим снижением расходов на огнеупоры и ремонты.

Ключевые слова: сталеплавильное производство, гибкая модульная печь, огнеупорная футеровка, стойкость футеровки, межплавочные простои, окисленность шлака

Для цитирования: Женин Е.В., Шаповалов А.Н. Влияние параметров выплавки стали на стойкость огнеупорной футеровки. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):52–61. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-52-61](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-52-61)

Original article

**INFLUENCE OF STEELMAKING PARAMETERS ON THE REFRACTORY
LINING LIFE**

© 2025 E. V. Zhenin, A. N. Shapovalov

Novotroitsk branch of NUST MISIS (8 Frunze Str., Novotroitsk, Orenburg Region, 462359, Russian Federation)

Abstract. One of the ways to increase the efficiency of steelmaking is to increase the service life of refractory lining. The durability of the lining is determined by the composition and properties of the refractories, the conditions of its execution and subsequent operation. The influence of steel smelting parameters on the resistance of the refractory lining of flexible modular furnaces (GMP) operated in the conditions of the Ural Steel electric steelmaking plant (ESPC) since 2019 has been studied. A special feature of the GMP is the ability to operate both in the mode of an arc steelmaking furnace (chipboard) and in a mode without the use of electric energy, that is, using converter melting technology with an increased proportion of cast iron. The durability of the GMP lining during the studied campaigns varied widely from 270 to 450 heats, with an average of 328 heats. The

results of a study of the influence of the main technological parameters of steel smelting in a flexible modular furnace on the stability of the lining of walls and hearths are presented. It is shown that the main technological factors determining the durability of the lining and the duration of the GMP campaign are the duration of downtime (inter-melting periods), the oxidation of slag and the content of MgO oxide in it. Quantitative dependences of the influence of the studied technological parameters of melting on the resistance of the refractory lining are obtained. Technological recommendations have been developed to extend the service life of the refractory lining: reducing the duration of inter-melting periods, reducing overoxidation of metal and slag as a result of stopping purging at a given carbon content (in accordance with the grade of steel being smelted), increasing the content of MgO oxide in the slag to 8 – 10 %. The implementation of technological recommendations will increase the resistance of refractory lining by at least 25 % with a corresponding reduction in costs for refractories and repairs.

Keywords: steelmaking, flexible modular furnace, refractory lining, lining life, intermelting downtime, slag oxidation

For citation: Zhenin E.V., Shapovalov A.N. Influence of steelmaking parameters on the refractory lining life. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):52–61. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-52-61](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-52-61)

Введение

Одним из направлений повышения эффективности сталеплавильного производства является увеличение срока службы огнеупорной футеровки. Стойкость футеровки определяется составом и свойствами огнеупоров [1 – 5], условиями ее выполнения и последующей эксплуатацией [6 – 8]. Учитывая большое количество факторов, влияющих на срок службы футеровки, продолжительность межремонтного периода сталеплавильного агрегата может изменяться в широких пределах. Это осложняет планирование ремонтов, увеличивает простои и снижает производительность. Поэтому прогнозирование стойкости футеровки сталеплавильного агрегата является актуальной производственной задачей, решаемой индивидуально в каждом конкретном случае. Настоящая работа посвящена изучению влияния параметров выплавки стали на стойкость огнеупорной футеровки гибких модульных печей (ГМП), эксплуатируемых в условиях электросталеплавильного цеха (ЭСЦ) АО «Уральская Сталь» с 2019 г. [9; 10].

Исходные данные

Поставленную в работе задачу решали на основе статистического анализа производственных данных по 21-й кампании гибких модульных печей. В исследуемом периоде футеровку ГМП (рабочая футеровка подины и стен) выполняли по стандартной технологии из идентичных огнеупоров на основе периклаза. Это позволило исключить влияние эксплуатационных свойств огнеупоров на износ футеровки. Учитывая имеющиеся литературные данные о влиянии технологических факторов на условия службы и стойкость футеровки сталеплавильных агрегатов [6 – 8; 11 – 14], основное внимание в настоящей работе уделили изучению влияния состава шихты, продолжительности плавки и параметрам

шлакового режима. Усредненные технологические величины производства стали в ГМП, а также данные о стойкости футеровки за исследуемые кампании представлены в таблице.

Особенностью рассматриваемой печи является возможность работы как в режиме дуговой сталеплавильной печи (ДСП), так и в режиме без использования электрической энергии, то есть по технологии конвертерной плавки с повышенной долей чугуна. В рассматриваемые кампании долю технологии ДСП изменяли от 0 до 100 % (при среднем значении 72,3 %). Несмотря на различия в составе шихты и тепловых балансах в рассматриваемых режимах работы ГМП, плавку проводили при высокой доле жидкого чугуна при интенсивном окислительном рафинировании с получением низкоуглеродистого полупродукта (вне зависимости от марки выплавляемой стали) [15 – 17]. Такая особенность технологии связана с задачей по удалению фосфора до уровня 0,005 – 0,010 %, что возможно только при условии формирования высокоосновного окислительного шлака. Учитывая скоротечность процесса такой шлак формируется в конце плавки при низком остаточном содержании углерода. Поэтому единственным отличием технологии выплавки полупродукта является содержание жидкого чугуна в металлошихте, которое изменяется от 40 – 60 (для ДСП) до 90 – 95 % (для кислородного конвертера).

Стойкость футеровки ГМП за исследуемые кампании в среднем составила 328 плавов. При этом в зависимости от условий эксплуатации продолжительность кампании ГМП изменялась в широких пределах (от 270 до 450 плавов). Такая вариативность во многом обусловлена изменениями технологических параметров плавки (см. таблицу), что позволяет изучить их влияние.

Усредненные показатели работы ГМП**Average results of FMF operation**

Параметр	Значение параметра	
	Диапазон	Среднее
Доля ДСП технологии, %	0 – 100	72,3
Длительность плавки, мин	72 – 100	81,5
Длительность простоев, мин	13,9 – 43,0	24,4
Доля жидкого чугуна в металлошихте, %	54,3 – 124,4	77,6
Стойкость футеровки, плавов	270 – 450	327,5
Состав полупродукта перед выпуском, %:		
C	0,043 – 0,058	0,051
Mn	0,027 – 0,062	0,045
P	0,004 – 0,006	0,005
S	0,014 – 0,026	0,021
Состав печного шлака перед выпуском, %:		
CaO	34,22 – 43,50	38,08
SiO ₂	12,59 – 17,15	14,18
FeO	17,27 – 40,15	27,63
MnO	2,17 – 5,15	3,31
MgO	3,68 – 7,82	5,71
Al ₂ O ₃	1,43 – 4,52	2,60
Основность шлака CaO/SiO ₂ , ед.	2,49 – 2,98	2,69
Температура полупродукта перед выпуском, °C	1653 – 1663	1658

Результаты анализа производственных данных и их обсуждение*Режим работы ГМП и доля жидкого чугуна*

За исследуемые кампании ГМП работали с различным сочетанием режимов при расходе жидкого чугуна от 54 до 124 т на плавку. Из теории сталеплавильных процессов известно, что с увеличением в составе металлошихты доли чугуна, являющегося основным источником кремнезема в шлаке, условия службы основной футеровки ухудшаются [11 – 13]. Однако для рассматриваемых условий влияние режима ведения плавки и содержания жидкого чугуна в составе металлошихты отсутствует (рис. 1). Выявленная особенность связана с преимущественным удалением кремнезема, образующегося при окислении кремния чугуна, с первичным шлаком, что минимизирует отрицательное влияние этого фактора на стойкость огнеупорной футеровки.

Продолжительности плавки и межплавочных простоев

Повышение продолжительности плавки способствует снижению стойкости огнеупорной футеровки вследствие увеличения длительности теплового, химического и механического воздействий на футеровку. При этом в рассматриваемых кампаниях длительность плавки без простоев изменяли незначительно (в пределах 50 – 60 мин), а основное негативное воздействие на условия службы футеровки оказывали про-

стои, связанные с логистическими и техническими проблемами. Влияние продолжительности простоев на стойкость огнеупорной футеровки представлено на рис. 2.

Увеличение межплавочных простоев существенно сокращают стойкость огнеупорной футеровки. Такое влияние объясняется увеличением колебаний температуры за цикл плавки. Это приводит к появлению в футеровке термических напряжений [18 – 21] как в процессе ее охлаждения, так и при дальнейшем разогреве в начале следующей плавки. Результатом температурных колебаний является зарождение, расширение и рост существующих трещин в огнеупорной кладке. На углах и краях огнеупора появляются сколы, а новые трещины образуются из-за теплового удара и быстрого расширения огнеупора. Таким образом, снижение стабильности в работе печи, выражающееся в увеличении межплавочных простоев, ухудшает условия эксплуатации футеровки и снижает ее стойкость.

Влияние основности шлака

Основность шлака (CaO/SiO₂) практически не влияет на стойкость огнеупорной футеровки (рис. 3). Это связано со стабильным поддержанием уровня основности (более 2,4 ед.), что минимизирует разрушающее действие кремнезема на футеровку. При относительно стабильной технологии наведения шлака изменение его основности в диапазоне 2,4 – 3,0 ед. за исследуемые кампании печи практически не оказывает влияние на стойкость футеровки.

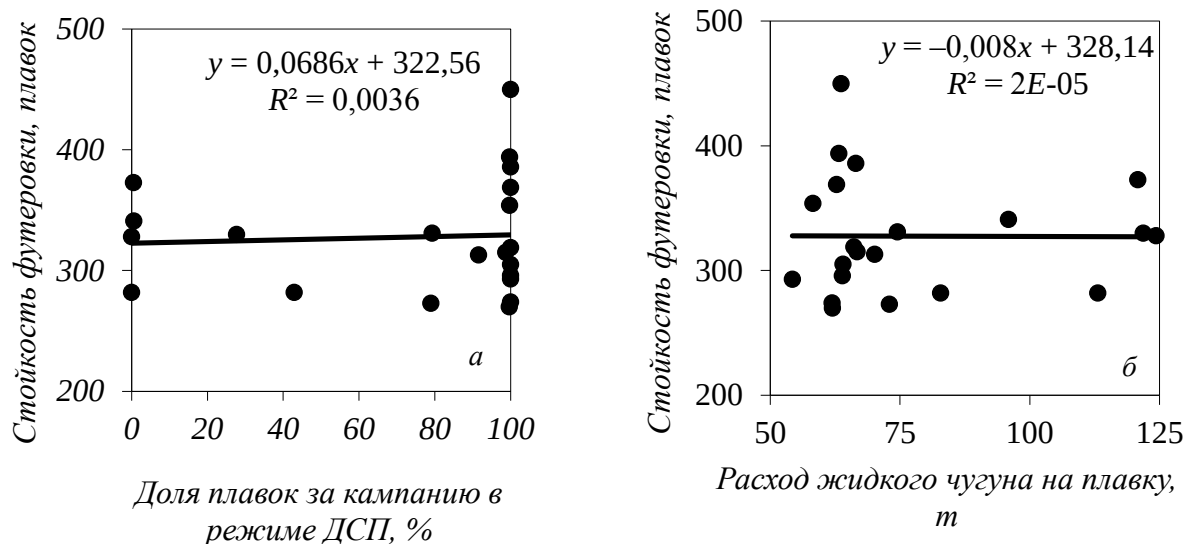


Рис. 1. Влияние доли плавов по режиму ДСП (а) и расхода жидкого чугуна (б) на стойкость футеровки ГМП
Fig. 1. Influence of the heats proportion in the EAF mode (a) and the consumption of liquid iron (б) on the FMF lining life

Влияние окисленности шлака

Оксиды железа, определяющие окислительную способность шлака, активно взаимодействуют с основными оксидами огнеупорной футеровки, образуя с ними ферриты различного состава. Поэтому поверхность агрегата, контактирующая со шлаком, подвергается активному химическому воздействию, что вызывает дополнительную коррозию огнеупоров, снижая стойкость футеровки (рис. 4). При этом снижение окисленности шлака в процессе рафинирования проблематично, так как содержание в шлаке оксидов железа повышается по мере обезуглероживания расплава. Эта взаимосвязь между остаточным содержанием углерода в стальном по-

лупродукте и содержанием оксида FeO в шлаке перед выпуском представлена на рис. 5.

Учитывая технологические особенности плавки с получением на выпуске низкоуглеродистого полупродукта, повышение содержание оксидов железа в шлаке в конце плавки неизбежно. Основной причиной проведения плавки стали с обезуглероживанием до 0,1 % и менее является стремление персонала обеспечить минимальное содержание фосфора (на уровне не более 0,010 %) в стальном полупродукте. Однако фактическое содержание фосфора в полупродукте в исследуемые периоды составило 0,04 – 0,06 %, что намного ниже требуемого, поэтому избыточное обезуглероживание расплава

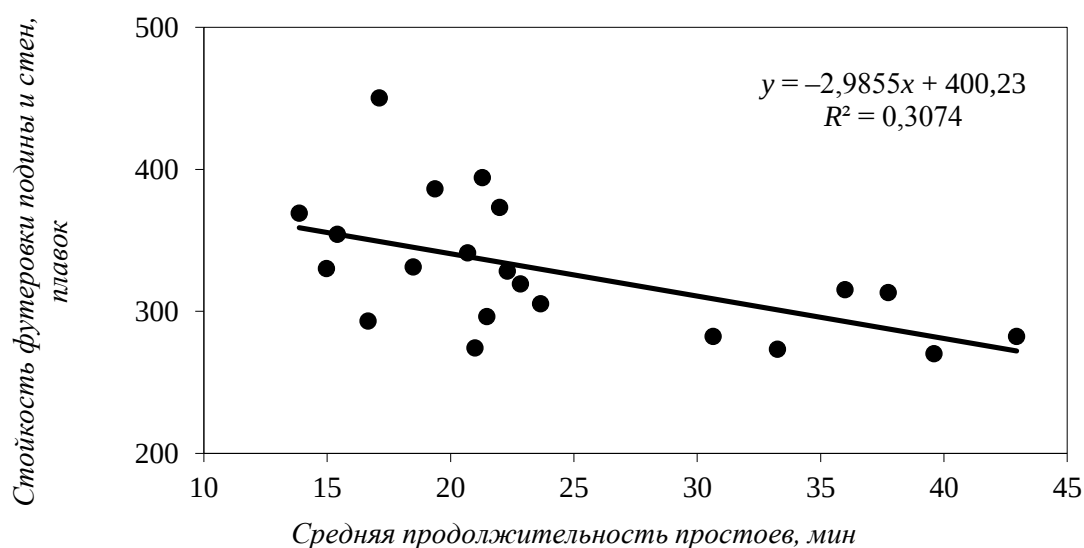


Рис. 2. Влияние длительности простоев на стойкость футеровки подины и стен
Fig. 2. Influence of downtime duration on the bottom and wall linings life

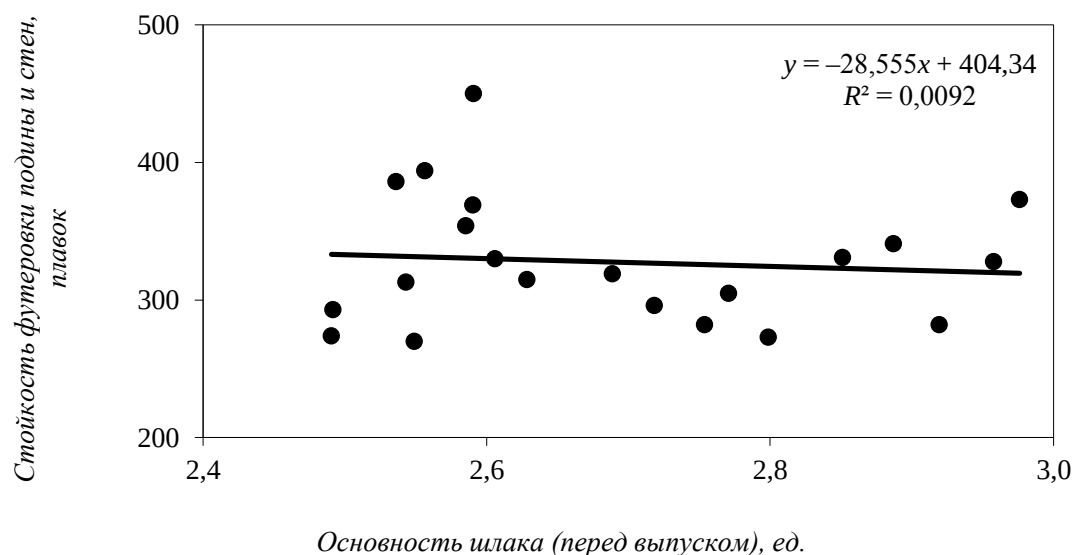


Рис. 3. Влияние основности шлака на стойкость футеровки подины и стен
Fig. 3. Influence of slag basicity on the bottom and wall linings life

нецелесообразно. К сожалению, у технологического персонала отсутствуют возможности по оперативному контролю состава полупродукта, поэтому прекращение продувки осуществляют после визуального снижения количества отходящих газов. Для остановки продувки при заданном содержании углерода (в соответствии с выплавляемой маркой стали) необходимо оснащение печей системами контроля состава отходящих газов.

Содержание MgO в шлаке

Износ огнеупора является результатом одновременно протекающих процессов физического размыывания поверхности футеровки (эрозии) и химического растворения (коррозии) огнеупора в шлаке [22 – 25]. Учитывая, что концентрация любого компонента в шлаке ограничивается пределами растворимости, то повышение содержания оксида MgO в печном шлаке способствует увеличению стойкости огнеупоров на основе периклаза, что подтверждается практическими данными [26 – 28]. Представленные на рис. 6 данные

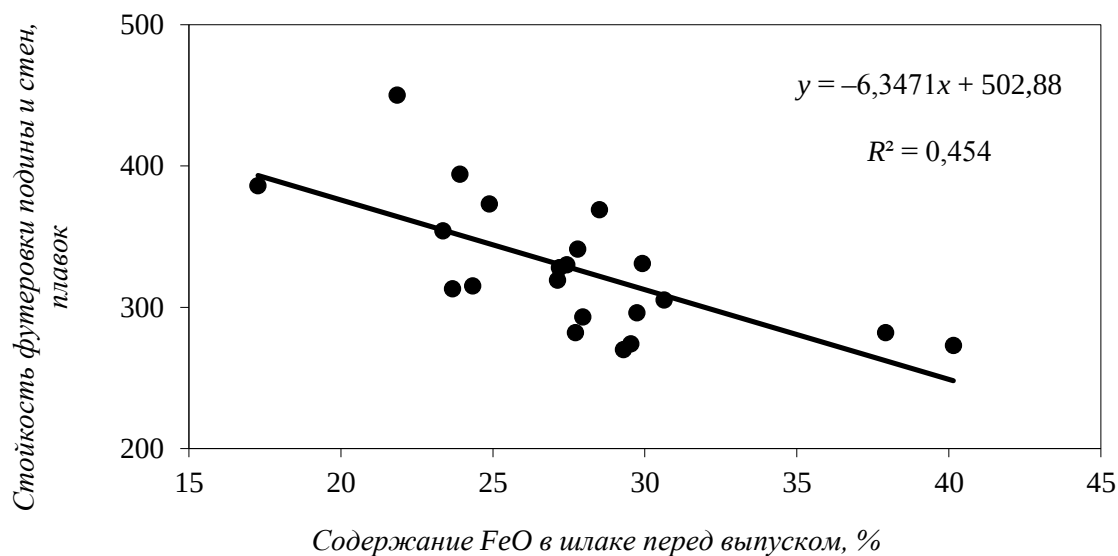


Рис. 4. Влияние содержания оксида FeO в печном шлаке на стойкость футеровки подины и стен
Fig. 4. Influence of FeO content in furnace slag on the bottom and wall linings life

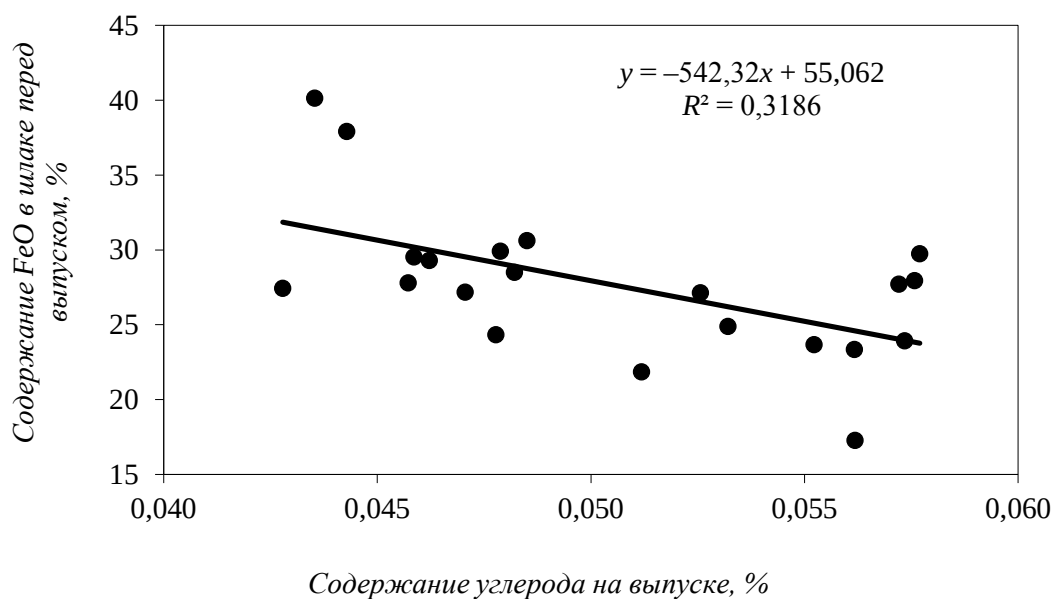


Рис. 5. Влияние содержания углерода в стальном полупродукте на окисленность печного шлака
Fig. 5. Influence of carbon content in semi-finished steel on oxidation of furnace slag

подтверждают существенное влияние магнезии в печном шлаке на стойкость огнеупорной футеровки ГМП. Поэтому не менее важным, с точки зрения стойкости футеровки, фактором является содержание оксида MgO в шлаке.

Помимо влияния оксида MgO на скорость эрозии магнезиальной футеровки, необходимо учитывать и то, что он в печном шлаке образует прочные соединения с оксидами кремния и железа, снижая активность последних. Оба эффекта приводят к значительному улучшению стойкости футеровки к шлаковому воздействию. Поэтому для повышения стойкости огнеупорной

футеровки целесообразно повысить содержание оксида MgO в печном шлаке до уровня не менее 8 – 10 %, что обеспечивается использованием доломита и других источников [27 – 30].

Тепловые условия плавки оказывают существенное влияние на процесс эксплуатации футеровки сталеплавильного агрегата, повышая термические нагрузки в огнеупорных материалах. Однако влияние этого фактора установить не удалось из-за отсутствия достоверной информации о тепловых режимах работы ГМП и незначительного колебания температуры металла перед выпуском.

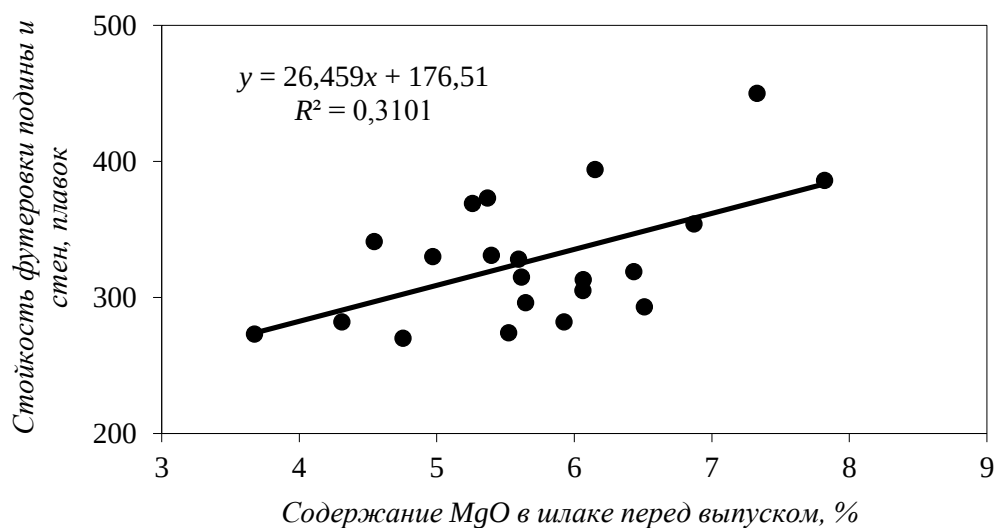


Рис. 6. Влияние содержания оксида MgO в печном шлаке на стойкость футеровки подины и стен
Fig. 6. Influence of MgO content in furnace slag on the bottom and wall linings life

Выводы

Для улучшения условий эксплуатации футеровки и повышения продолжительности кампании ГМП можно рекомендовать следующие технологические мероприятия:

- снижение продолжительности межплавочных периодов для минимизации термического воздействия на футеровку;
- уменьшение переокисления металла и шлака в результате останова продувки при заданном содержании углерода (в соответствии с выплавляемой маркой стали);
- повышение содержания оксида MgO в шлаке до 8 – 10 %.

Выполнение разработанных технологических рекомендаций позволит увеличить стойкость огнеупорной футеровки минимум на 25 % с соответствующим снижением расходов на огнеупоры и ремонты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Briggs J. The Refractories Industry – A Review. *Materials Technology*. 2005;20(4):225–232. <https://doi.org/10.1080/10667857.2005.11753145>
2. Вислогузова Э.А., Кашеев И.Д., Земляной К.Г. Анализ влияния качества периклазоуглеродистых огнеупоров на стойкость футеровки конвертеров. *Новые огнеупоры*. 2013;3:127–133. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2013-3-127-133>
3. Серова Л.В., Чудинова Е.В., Хороших М.А. Разработка критериев оценки качества периклазоуглеродистых огнеупоров и их влияние на повышение стойкости футеровок конвертеров. *Черные металлы*. 2015;5(1001):21–23.
4. Roy I., Halder D., Mishra B. Development of Improved Quality Magnesia Carbon Brick by Incorporation of Industrial Grade Functionalised Multi-Walled Carbon Nanotube. *Inter-ceram – International Ceramic Review*. 2017;66:58–62. <https://doi.org/10.1007/BF03401231>
5. Манашев И.Р. Возможности повышения стойкости футеровок металлургических агрегатов путем применения в производстве огнеупоров новых композиционных СВС-материалов. *Теория и технология металлургического производства*. 2022;2(41):4–11.
6. Шевченко Е.А., Шаповалов А.Н., Дёма Р.Р., Колдин А.В. Влияние технологических параметров плавки на стойкость футеровки дуговой сталеплавильной печи в условиях АО «Уральская Сталь». *Новые огнеупоры*. 2019;7:3–7. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-7-3-7>
7. Sadri A., Cornett H., Mosnier M., Ying W.L., Ferrer B. Furnace Refractory Lining Barrier Monitoring Tools and Techniques. In: *Metal-lurgy and Materials Society of CIM (eds) Proceedings of the 63rd Conference of Metallurgists, COM 2024*. Springer, Cham. 2025:793–802. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67398-6_135
8. Nath D., Maji S., Singh A.K. Modeling of Arcing, Scrap Melting, and Temperature Evolution in the Refractory of a Lab-Scale Direct Current-Electric Arc Furnace. *Steel research international*. 2025;2300696. <https://doi.org/10.1002/srin.202300696>
9. Кузнецов М.С., Гареев Р.Р., Михеев А.Е. Пути повышения стойкости футеровки рабочего слоя металлургических агрегатов электросталеплавильного производства АО «Уральская Сталь». *Теория и технология металлургического производства*. 2021;2(37):7–10.
10. Исаков И.Ф., Валиахметов А.Х., Кузнецов М.С., Проскуровский Д.А., Шепелев Д.А. Особенности технологии выплавки стали в 120-тонных гибких модульных печах АО «Уральская Сталь». *Теория и технология металлургического производства*. 2021;2(37):19–23.
11. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. 2000:544.
12. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали. Москва: Мир; ООО «Издательство АСТ». 2003:528.
13. Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю., Киселев А.Д. Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010:547.
14. Dai Y., Li J., Yan W. and Shi C. 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>
15. Shapovalov A.N., Dema R.R., Nefed'ev S.P. Improving the Efficiency of Steel De-Oxidation at the Ural Steel. *Materials Science Forum*. 2020;989:400–405. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.400>
16. Шаповалов А.Н., Голубцов В.А., Бакин И.В., Рябчиков И.В. Применение комплексных модификаторов для снижения загрязненности стали коррозионно-активными неметаллическими включениями. *Черные металлы*. 2020;6(1062):4–10.

17. Куницын Г.А., Кузнецов М.С., Шаповалов А.Н., Бакин И.В. Применение комплексных модификаторов при производстве стали с повышенными требованиями по неметаллическим включениям. *Черные металлы*. 2022;5(1085):9–15.
<https://doi.org/10.17580/chm.2022.05.02>
18. Кашеев И.Д. Рабочие свойства и применение огнеупоров в промышленных печах. *Новые огнеупоры*. 2008;2:3–5.
19. Schacht C. ed. *Refractory Linings: Thermomechanical Design and Applications*: CRC Press, Boca Raton. 2019:504.
<https://doi.org/10.1201/9780203741078>
20. Oliveira R.L.G., Rodrigues J.P.C., Pereira J.M., Lourenço P.B., Marschall H.U. Thermomechanical behaviour of refractory dry-stacked masonry walls under uniaxial compression, *Engineering Structures*. 2021;240:112361.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112361>
21. Григорьев А.С., Данильченко С.В., Заболотский А.В., Мигашкин А.О., Турчин М.Ю., Хадыев В.Т. Особенности разрушения футеровки в оборудовании разного размера. *Новые огнеупоры*. 2022;1(12):3–11.
<https://doi.org/10.17073/1683-4518-2022-12-3-11>
22. Lee W.E., Zhang S. Melt corrosion of oxide and oxide-carbon refractories. *International Materials Reviews*. 1999;44(3):77–104.
<https://doi.org/10.1179/095066099101528234>
23. Qin J., Qi, J. L. Analysis on the Refractory Erosion of the Electric Arc Furnace and Study on the Measures of Protecting the Furnace Lining. *Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd*. 2012; 602–604:2082–2086.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.602-604.2082>
24. Biswas S., Sarkar D. Refractory Practice in Electric Arc Furnace. In: *Introduction to Refractories for Iron- and Steelmaking*. Springer, Cham. 2020:249–267.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-43807-4_5
25. Pang Z., Zuo H. Corrosion Behavior of MgO – C Refractory in the Electric Arc Furnace that Entirely Uses Direct Reduced Iron as Raw Materials. In: *Advances in Pyrometallurgy (TMS 2024). The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. 2024.157–170.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-50176-0_12
26. Кушнарёв А.В., Вислогузова Э.А., Устенко А.С., Ремиго С.А. Опыт использования MgO-содержащих материалов для повышения стойкости футеровок конвертеров. *Новые огнеупоры*. 2007;4:3–5.
27. Шевченко Е.А., Шаповалов А.Н., Братковский Е.В. Повышение стойкости футеровки дуговых сталеплавильных печей путем совершенствования шлакового режима с применением магнийсодержащих материалов. *Черные металлы*. 2018;9:16–21.
28. 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.
29. Кашеев И.Д., Терентьев Е.А., Демидов К.Н., Борисова Т.В., Маряев И.Г. Свойства и структура магнезиальных модификаторов конвертерных шлаков. *Новые огнеупоры*. 2007;2:27–32.
30. Сметанников А.В., Шуклин А.В., Захарова Т.П., Фейлер С.В., Неунывахина Д.Т. Применение перспективных флюсообразующих материалов для повышения стойкости футеровки дуговой сталеплавильной печи. *Сталь*. 2019;7:28–30.

REFERENCES

1. Briggs, J. The Refractories Industry – A Review. *Materials Technology*. 2005;20(4):225–232.
<https://doi.org/10.1080/10667857.2005.11753145>
2. Visloguzova E.A., Kashcheev I.D., Zemlyanoi K.G. Analysis of the influence of the quality of periclase-carbon refractories on the durability of converter linings. *Novye огнеупоры*. 2013;3:127–133. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/1683-4518-2013-3-127-133>
3. Serova L.V., Chudinova E.V., Khoroshikh M.A. Development of criteria for assessing the quality of periclase-carbon refractories and their impact on increasing the durability of converter linings. *Chernye metall*. 2015;5(1001):21–23. (In Russ.).
4. Roy I., Halder D., Mishra B. Development of Improved Quality Magnesia Carbon Brick by Incorporation of Industrial Grade Functionalised Multi-Walled Carbon Nanotube. *Inter-ceram – International Ceramic Review*. 2017;66:58–62.
<https://doi.org/10.1007/BF03401231>
5. Manashev I.R. Possibilities of increasing the durability of linings of metallurgical units by using new composite SHS materials in the production of refractories. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2022;2(41):4–11. (In Russ.).
6. Shevchenko E.A., Shapovalov A.N., Dema R.R., Koldin A.V. The influence of technological parameters of melting on the durability of the lining of an electric arc furnace under the condi-

- tions of JSC Ural Steel. *Novye ognepory*. 2019;7:3–7. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-7-3-7>
7. Sadri A., Cornett H., Mosnier M., Ying W.L., Ferrer B. Furnace Refractory Lining Barrier Monitoring Tools and Techniques. In: *Metalurgy and Materials Society of CIM. Proceedings of the 63rd Conference of Metallurgists, COM 2024*. Springer, Cham. 2025:793–802.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-67398-6_135
 8. Nath D., Maji S., Singh A.K. Modeling of Arcing, Scrap Melting, and Temperature Evolution in the Refractory of a Lab-Scale Direct Current-Electric Arc Furnace. *Steel research international*. 2025;2300696.
<https://doi.org/10.1002/srin.202300696>
 9. Kuznetsov M.S., Gareev R.R., Mikheev A.E. Ways to increase the durability of the lining of the working layer of metallurgical units of electric steelmaking production of JSC Ural Steel. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2021;2(37):7–10. (In Russ.).
 10. Iskakov I.F., Valiakhmetov A.Kh., Kuznetsov M.S., Proskurovskii D.A., Shepelev D.A. Features of steel smelting technology in 120-ton flexible modular furnaces of Ural Steel JSC. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2021;2(37):19–23. (In Russ.).
 11. Bigeev A.M., Bigeev V.A. *Metallurgy of steel. Theory and technology of steel smelting*. Magnitogorsk: MG TU im. G.I. Nosova. 2000:544. (In Russ.).
 12. Kudrin V.A. *Theory and technology of steel production*. Moscow: Mir; OOO «Izdatel'stvo AST». 2003:528. (In Russ.).
 13. Gudim Yu.A., Zinurov I.Yu., Kiselev A.D. Steel production in arc furnaces. Designs, technology, materials: monograph. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2010:547. (In Russ.).
 14. Dai Y., Li J., Yan W. and Shi C. 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>
 15. Shapovalov A.N., Dema R.R., Nefed'ev S.P. Improving the Efficiency of Steel De-Oxidation at the Ural Steel. *Materials Science Forum*. 2020;989:400–405.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.400>
 16. Shapovalov A.N., Golubtsov V.A., Bakin I.V., Ryabchikov I.V. Application of complex modifiers to reduce contamination of steel with corrosion-active non-metallic inclusions. *Chernye metally*. 2020;6(1062):4–10. (In Russ.).
 17. Kunitsyn G.A., Kuznetsov M.S., Shapovalov A.N., Bakin I.V. Application of complex modifiers in the production of steel with increased requirements for non-metallic inclusions. *Chernye metally*. 2022;5(1085):9–15. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/chm.2022.05.02>
 18. Kashcheev I.D. Performance properties and application of refractories in industrial furnaces. *Novye ognepory*. 2008;2:3–5. (In Russ.).
 19. Schacht C. ed. *Refractory Linings: Thermomechanical Design and Applications*. CRC Press, Boca Raton. 2019:504.
<https://doi.org/10.1201/9780203741078>
 20. Oliveira R.L.G., Rodrigues J.P.C., Pereira J.M., Lourenço P.B., Marschall H.U. Thermomechanical behaviour of refractory dry-stacked masonry walls under uniaxial compression, *Engineering Structures*. 2021;240:112361.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112361>
 21. Grigoriev A.S., Danilchenko S.V., Zabolotsky A.V., Migashkin A.O., Turchin M.Yu., Khadyev V.T. Features of the Fracture of Refractory Linings Depending on the Equipment Size. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2023;63:585–592.
<https://doi.org/10.1007/s11148-023-00773-6>
 22. Lee W.E., Zhang S. Melt corrosion of oxide and oxide-carbon refractories. *International Materials Reviews*. 1999; 44(3):77–104.
<https://doi.org/10.1179/095066099101528234>
 23. Qin J., Qi, J.L. Analysis on the Refractory Erosion of the Electric Arc Furnace and Study on the Measures of Protecting the Furnace Lining. *Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd*. 2012;602-604:2082–2086.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.602-604.2082>
 24. Biswas S., Sarkar D. Refractory Practice in Electric Arc Furnace. *Introduction to Refractories for Iron- and Steelmaking*. Springer, Cham. 2020:249–267.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-43807-4_5
 25. Pang Z., Zuo H. Corrosion Behavior of MgO-C Refractory in the Electric Arc Furnace that Entirely Uses Direct Reduced Iron as Raw Materials. In: *Advances in Pyrometallurgy. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. 2024:157–170.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-50176-0_12
 26. Kushnarev A.V., Visloguzova E.A., Ustenko A.S., Remigo S.A. Experience of using MGO-containing materials to increase the durability of converter linings. *Novye ognepory*. 2007;4:3–5. (In Russ.).
 27. Shevchenko E.A., Shapovalov A.N., Bratkovskii E.V. Increasing the durability of the lining of electric arc steel-making furnaces by improving the slag regime using magnesium-

containing materials. *Chernye metally*. 2018;9:16–21. (In Russ.).

28. Babenko A.A., Smirnov L.A., Protopopov E.V., Mikhailova L.Yu. Theoretical foundations and technology of smelting steel semi-finished products in converters and EAF under magnesia slags. *Izvestiya vuzov. Chernaya Metallurgiya*. 2020;63(7):491–498. (In Russ.).
29. Kashcheev I.D., Terent'ev E.A., Demidov K.N., Borisova T.V., Maryasev I.G. Properties and structure of magnesia modifiers of converter slags. *Novye ognepory*. 2007;27–32. (In Russ.).
30. Smetannikov A.V., Shuklin A.V., Zakharova T.P., Feiler S.V., Neunyvakhina D.T. Application of advanced flux-forming materials to improve the durability of arc furnace linings. *Stal'*. 2019;7:28–30. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Евгений Вячеславович Женин, к.т.н., доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС»

E-mail: zhenin.ev@misis.ru

SPIN-код: 321471

Алексей Николаевич Шаповалов, к.т.н., доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС»

E-mail: alshapo@misis.ru

ORCID: 0000-0003-0888-814X

SPIN-код: 477659

Information about the authors:

Evgenij V. Zhenin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of University of Science and Technology MISIS

E-mail: zhenin.ev@misis.ru

SPIN-код: 321471

Aleksey N. Shapovalov, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of University of Science and Technology MISIS

E-mail: alshapo@misis.ru

ORCID: 0000-0003-0888-814X

SPIN-код: 477659

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 27.02.2025

После доработки 10.03.2025

Принята к публикации 18.03.2025

Received 27.02.2025.

Revised 10.03.2025

Accepted 18.03.2025

Оригинальная статья

УДК 666.1.038

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-62-74

**ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ
МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ И
ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

© 2025 г. М. А. Гурьев^{1,2}, С. Г. Иванов^{1,3,4}, А. М. Гурьев^{1,4,5}, Б. Д. Лыгденов^{4,6}

¹Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (Россия, 656038, Алтайский край, Барнаул, пр. Ленина, 46)

²Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd (КНР, 312500, Чжэцзян, Синчан, Индустриальный парк Руао, 18)

³Инновационный центр современных текстильных технологий (Лаборатория Цзяньху) (КНР, 312000, Шаосин, ул. Хуаше, 2)

⁴Ключевая лаборатория цифрового текстильного оборудования Хубэй, Уханьский текстильный университет (КНР, 430200, Ухань, Саншан Авеню, 1)

⁵Zhejiang Pinuo Machinery Co., Ltd., (КНР, 312000, г. Синчан, Парк Индустрии, 3)

⁶Zhejiang Tianxiong Industrial Technology Co., Ltd (КНР, 312500, Синчан, Индустриальный парк Руао, 7)

Аннотация. Рассмотрены структурно-фазовое состояние, дюрометрия, металлография образцов, вырезанных из плоского листового проката стали марки 20, подвергнутых пластической деформации на растяжение. Часть образцов перед растяжением была подвергнута поверхностному упрочнению методом химико-термической обработки (ХТО), вторая часть – термической обработке (ТО). Оба метода обработки осуществляли при одном и том же температурном режиме (850 °С с выдержкой 180 мин). При этом для рассматриваемого материала не ставили задачу изменения механических свойств при термической обработке. Микроструктуру исследовали в направлениях вдоль и поперек направления прокатки. Исследовали влияние термической и химико-термической обработок на показатели статической прочности и ударной вязкости образцов после соответствующих процессов. При пластической деформации растяжения толщина диффузионного слоя не изменяется за исключением области, находящейся в зоне разрушения: толщина диффузионного слоя несколько увеличивается, но сам слой при этом уже представляет конгломерат раздробленных осколков боридных игл, тем не менее достаточно прочно связанных с матричным материалом. Показано, что пластическая деформация приводит к росту анизотропии зерна в направлении действия сил, а также при пластической деформации происходит его измельчение путем дробления чрезмерно вытянутых включений на более мелкие фрагменты в направлении, перпендикулярном действию деформирующей силы. Проведенные измерения анизотропии зерна показывают, что в обоих случаях она близка к единице (0,99 при ХТО и 1,02 при ТО), что позволяет говорить о том, что в обоих случаях наблюдаются равноосные зерна, по форме близкие к глобулярной. Сравнение микроструктуры сердцевин образцов (борированного и не борированного), претерпевших идентичное термическое воздействие, показало, что микроструктура сердцевин рассматриваемых образцов абсолютно идентична: совпадают как фазовый состав, так и структурное состояние.

Ключевые слова: структура, анизотропия, пластическая деформация, термическая обработка, зерно

Для цитирования: Гурьев М.А., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д. Влияние пластической деформации на структуру малоуглеродистой стали после поверхностного упрочнения и термической обработки. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):62–74. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-62-74](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-62-74)

Original article

**INFLUENCE OF PLASTIC DEFORMATION ON THE STRUCTURE
OF LOW-CARBON STEEL AFTER SURFACE HARDENING
AND HEAT TREATMENT**

© 2025 M. A. Gur'ev^{1, 2}, S. G. Ivanov^{1, 3, 4}, A. M. Gur'ev^{1, 4, 5}, B. D. Lygdenov^{4, 6}

¹Polzunov Altai State Technical University (46 Lenin Avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation)

²Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd (18 Ruao Industry Park No, Xinchang, Zhejiang Province, 312500, People's Republic of China)

³Innovative center of modern textile technologies (Jianhu Laboratory) (2 Huashe Street, Shaoxing, 312000, People's Republic of China)

⁴Hubei Key Laboratory of Digital Textile Machinery, Wuhan Textile University (1 Sunshine Avenue, Wuhan, 430200, People's Republic of China)

⁵Zhejiang Pinuo Machinery Co., Ltd. (3 Industry Park, Xinchang, 312000, People's Republic of China)

⁶Zhejiang Tianxiong Industrial Technology Co., Ltd (7 Ruao Industry Park No, Xinchang, Zhejiang, 312000, People's Republic of China)

Abstract. The structural and phase state, durometry, and metallography of samples cut from flat rolled steel of grade 20 subjected to plastic tensile deformation are considered. Some of the samples were subjected to surface hardening by chemical heat treatment (CTO) before stretching, the second part was subjected to heat treatment (TO). Both treatment methods were carried out at the same temperature regime (850 C with 180 min exposure). At the same time, the task of changing the mechanical properties during heat treatment was not set for the material in question. The microstructure was studied in the directions along and along the rivers of the rolling direction. The effect of thermal and chemical-thermal treatments on the static strength and impact strength of the samples after the corresponding processes was investigated. During plastic stretching deformation, the thickness of the diffusion layer does not change, except for the area located in the fracture zone: the thickness of the diffusion layer increases slightly, but the layer itself is already a conglomerate of fragmented fragments of boride needles, nevertheless, quite firmly connected to the matrix material. It is shown that plastic deformation leads to an increase in the anisotropy of the grain in the direction of the forces, and during plastic deformation, it is crushed by crushing excessively elongated inclusions into smaller fragments in the direction perpendicular to the action of the deforming force. The measurements of grain anisotropy show that in both cases it is close to unity (0.99 for CTO and 1.02 for TO), which suggests that in both cases equi-axial grains are observed, which are close to globular in shape. A comparison of the microstructure of the core of both samples (borated and non-borated), which underwent identical thermal treatment, showed that the microstructure of the core of the samples under consideration is absolutely identical: both the phase composition and the structural state coincide.

Keywords: structure, anisotropy, plastic deformation, heat treatment, grain

For citation: Gur'ev M.A., Ivanov S.G., Gur'ev A.M., Lygdenov B.D. Effect of plastic deformation on the structure of low-carbon steel after surface hardening and heat treatment. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):62–74. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-62-74](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-62-74)

Введение

Любой процесс разрушения происходит в два этапа: образование трещины и ее распространение. Характер разрушения в очень сильной степени зависит от механизма распространения трещины. Для пластичных материалов характерно то, что впереди растущей трещины и вокруг нее развивается область пластических деформаций. При этом процесс распространения трещины происходит относительно медленно. Такие трещины часто характеризуют термином

«стабильные». В этом случае материал сопротивляется дальнейшему развитию трещины, если только напряжение не увеличивается.

Под механикой разрушения понимается установление количественных связей между свойствами материала, уровнем действующих напряжений, присутствием трещины в образце и механизмом распространения трещины [1].

Исследования механики разрушения материалов под воздействием внешних напряжений, предварительно подвергнутых различным мето-

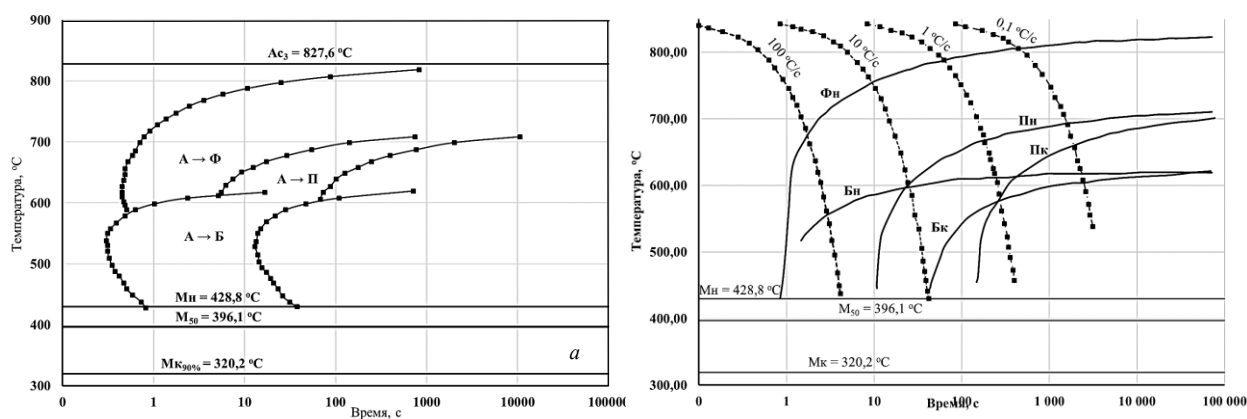


Рис. 1. Диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита (а) и распада аустенита при непрерывном охлаждении (б)

Fig. 1. Diagrams of the isothermal decay of supercooled austenite (a) and the decay of austenite under continuous cooling (b)

дам механического и термического упрочнений, являются весьма актуальными и позволяют применять упрочняющие технологии с учетом режимов эксплуатации и возможных последствий при критических напряжениях.

Методы исследования и материалы

Химический состав использованных в работе сталей определяли при помощи оптико-эмиссионного спектрометра G.N.R. SolarisCCDPlus. В ходе исследований получили следующие результаты: $0,215 \pm 0,005\%$ (здесь и далее по массе) C; $0,236 \pm 0,003\%$ Si; $0,575 \pm 0,007\%$ Mn; $0,034 \pm 0,001\%$ Cr; $0,002 \pm 0,001\%$ Mo; $0,039 \pm 0,001\%$ Ni; $0,001 \pm 0,000\%$ Al; $0,012 \pm 0,001\%$ S; $0,013 \pm 0,001\%$ P. Согласно данным оптико-эмиссионного анализа, исследуемая сталь относится к марке 20 по ГОСТ 1050 – 2013.

Диаграммы изотермического и неизотермического распада переохлажденного аустенита стали марки 20 с химическим составом представлены на рис. 1. Диаграммы были построены при помощи измененного программного комплекса, созданного по данным работ [2 – 11], исходный код программного комплекса, взятого за основу, представлен в работе [4].

Химико-термическую и термическую обработку образцов проводили в камерных печах типа СНОЛ, оборудованных ПИД-контроллерами Термодат. В качестве образцов использовали пропорциональные образцы для испытаний на растяжение согласно ГОСТ 1497 – 84 (тип III, № 7). Для каждого образца использовали соответствующие образцы-свидетели диаметром 10 мм и высотой 15 мм для проведения металлографических исследований. Для исключения обезуглероживания образцов при термической обработке (ТО) их помещали в жаростойкий контейнер и засыпали чугунной стружкой слоем, имеющим толщину не менее 15 мм. Химико-термическую обработку (ХТО)

образцов проводили в порошковой засыпке, для этого образцы помещали в жаростойкий контейнер и засыпали порошковой насыщающей средой [12] таким образом, чтобы толщина порошковой засыпки составляла 10 мм (между образцами; между образцами, стенками и дном контейнера). Температуры насыщения были выбраны 850, 950 и 1050 °C, выдержка составляла 2,5 ч после нагрева контейнера с образцами до температуры насыщения. Термическую обработку образцов проводили параллельно с химико-термической обработкой при тех же условиях. После высокотемпературной выдержки контейнеры с образцами извлекали из печи и охлаждали на «спокойном» воздухе до комнатной температуры. После чего осуществляли распаковку образцов. Материал, подвергавшийся химико-термической обработке, промывали в мыльно-содовом растворе от остатков насыщающей смеси. Готовые образцы подвергали испытанию на растяжение с использованием универсальной разрывной машины Instron-3369. После испытаний и проведения всех необходимых измерений от разорванных образцов отбирали металлографические темплеты при помощи прецизионного отрезного станка MICRACUT-201, для этого отрезали части образцов в месте образования шейки и разрушения образца. Длина отрезаемого образца составляла 15 мм, что обеспечивало гарантированный охват металлографическими исследованиями не только места разрушения, но и мест, прилегающих к месту разрушения, но при этом не подвергшихся значительной пластической деформации. Дополнительно аналогичные металлографические исследования проводили на цилиндрических образцах-свидетелях, которые не подвергали механическим испытаниям. Исследовали структурно-фазовое состояние и микротвердость при нагрузке 100 г в сердцевине образца, а также распределение микротвердости по поперечному сечению диффузионного боридного слоя.

Показатели твердости в деформированной и недеформированной областях**Hardness values in deformed and undeformed areas**

Микротвердость, HV				Разница показателей микротвердости в области отрыва и недеформированной области, %		
Область отрыва		Недеформированная область		Образец ХТО	Образец ТО	Между ТО и ХТО
ХТО	ТО	ХТО	ТО	ХТО	ТО	ХТО
215	273	197	218	9,1	25,2	64,0
266	273	212	214	25,5	27,6	8,0
232	269	226	217	2,7	24,0	89,0

Структурно-фазовое состояние контролировали в направлениях вдоль и поперек направления прокатки. Исследовали влияние термической и химико-термической обработок на статическую прочность и ударную вязкость образцов после соответствующих процессов. Для проведения металлографических исследований все вырезанные металлографические темплеты запрессовывали в специальный компаунд BAKELIT при помощи металлографического пресса METAPRESS. После запрессовки проводили шлифовку и последующую полировку металлографических образцов при помощи автоматического шлифовально-полировального станка DIGIPREP-P. В качестве шлифовальных материалов использовали специализированные диски с алмазным напылением на металлической связке зернистостью 54, 10 и 6 мкм. Далее проводили полировку на специализированных сукнах MET-FOKS и METAPO-V алмазными суспензиями с зернистостью 5,0; 3,0; 1,0 и 0,5 мкм. После полировки образцы подвергали травлению в 4 %-ых спиртовых растворах пикриновой и азотной кислот. Проводили цветное травление реактивами Берахи и щелочным пикратом натрия [13 – 14]. Металлографические исследования проводили при помощи программно-аппаратного комплекса ThixoMet-PRO, включающего в себя металлографический инвертированный оптический микроскоп CarlZeissAxioObserverZ1m [15] по методикам, представленным в работе [16].

Результаты исследования и их обсуждение

Показатели микротвердости основного металла в зонах деформации и не подвергшихся деформации представлены в таблице.

Твердость в области отрыва превосходит значения этого показателя, измеренного в недеформированной области. При этом величина расхождения носит переменный характер, изменяясь в интервале от 2,7 до 25,5 % относительно твердости недеформированного участка. Средневзвешенные значения твердости в области деформации на 12,3 % больше средневзвешенных значений твердости недеформированных образцов.

Определение всех показателей проводили в абсолютно одинаковых условиях: размеры полей зрения и прочие параметры измерений были идентичны.

Средневзвешенное значение размера зерна в обоих случаях соответствует 8 баллу (рис. 2), однако общее количество зерен, средний диаметр и средний условный размер зерна в области пластической деформации примерно на 5 – 8 % меньше по сравнению с недеформированной областью.

Зерно в обоих случаях ориентировано горизонтально (так как анизотропия больше единицы), при этом в зоне деформации уровень анизотропии зерна приблизительно на 11 % больше по сравнению с недеформированной областью. Отсюда следует вывод о том, что пластическая деформация приводит к росту анизотропии зерна в направлении действия сил, при этом происходит измельчение зерна путем дробления чрезмерно вытянутых зерен на более мелкие фрагменты в направлении перпендикулярном действию деформирующей силы. Это подтверждается визуальным сравнением микроструктуры соответствующих областей (рис. 2). Толщина диффузионного слоя на образце в деформированной и недеформированной областях представлена на рис. 3 и 4.

При пластической деформации растяжения в направлении компланарном диффузионному слою его толщина не изменяется за исключением области, находящейся в зоне разрушения. В рассматриваемой области толщина диффузионного слоя несколько увеличивается, но сам слой при этом уже представляет конгломерат раздробленных осколков боридных игл, тем не менее достаточно прочно связанных с матричным материалом. При этом на некотором расстоянии от места наибольшей пластической деформации (порядка 5 мм от места разрушения) слой боридов ничем не отличается от слоя на недеформированных участках. По мере приближения к месту разрушения в слое наблюдается возрастающее количество трещин, направленных по нормали к поверхности диффузионного покрытия. На расстоянии порядка 1,0 – 1,5 мм от места наибольшей пластической деформации слой боридов практически полностью разрушается.

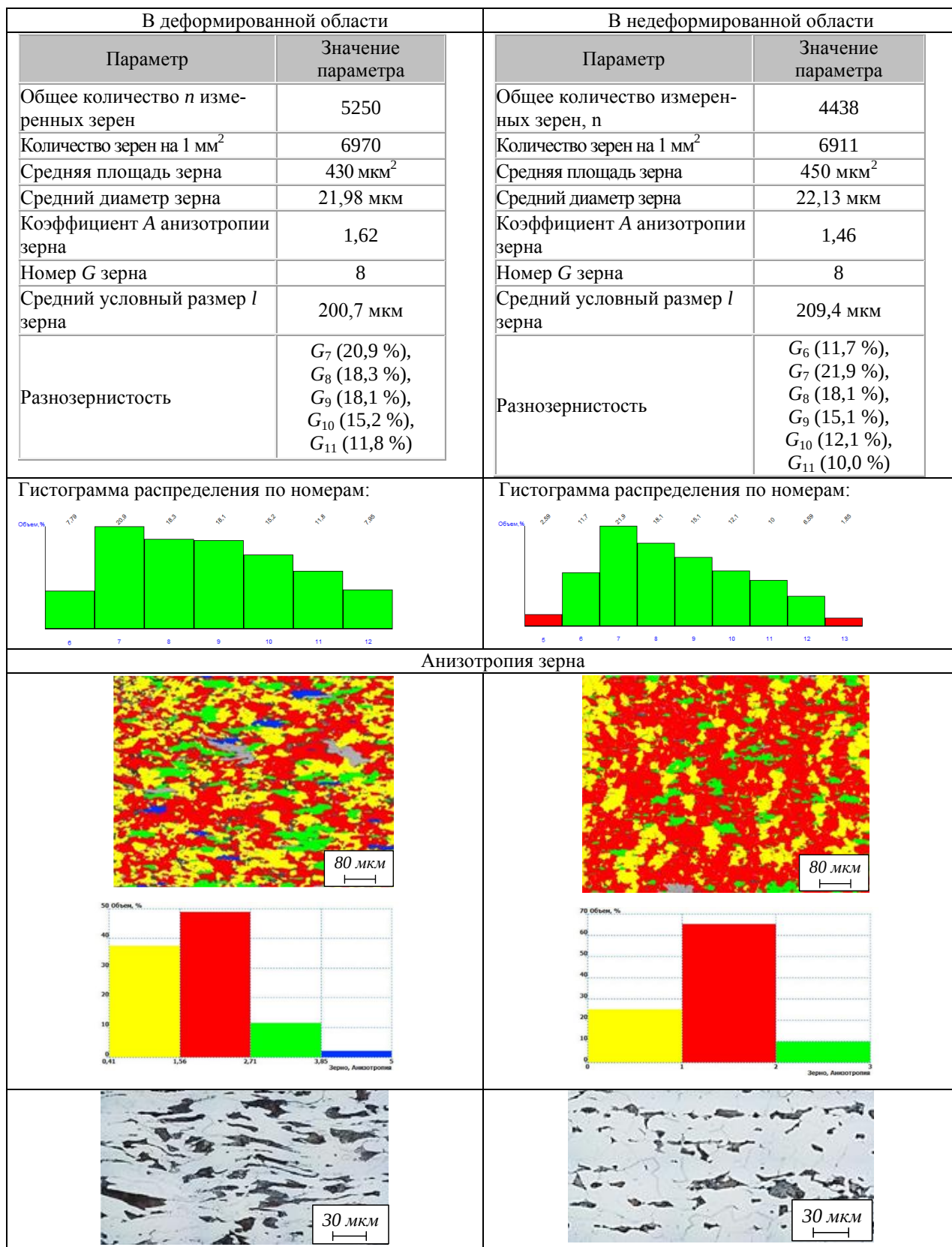


Рис. 2. Структурно-фазовое состояние материала в зоне наибольшей деформации (возле очага разрушения) (а) и в недеформированной зоне (б)

Fig. 2. Structural-phase state of the material in the zone of greatest deformation (near the source of destruction) (a) and in the undeformed zone (b)

деформации и разрушения образца наблюдается дробление и многочисленные сколы диффузионного слоя.

Разницу в размере и ориентации зерен в сердцевине образца и в подбородной зоне про-

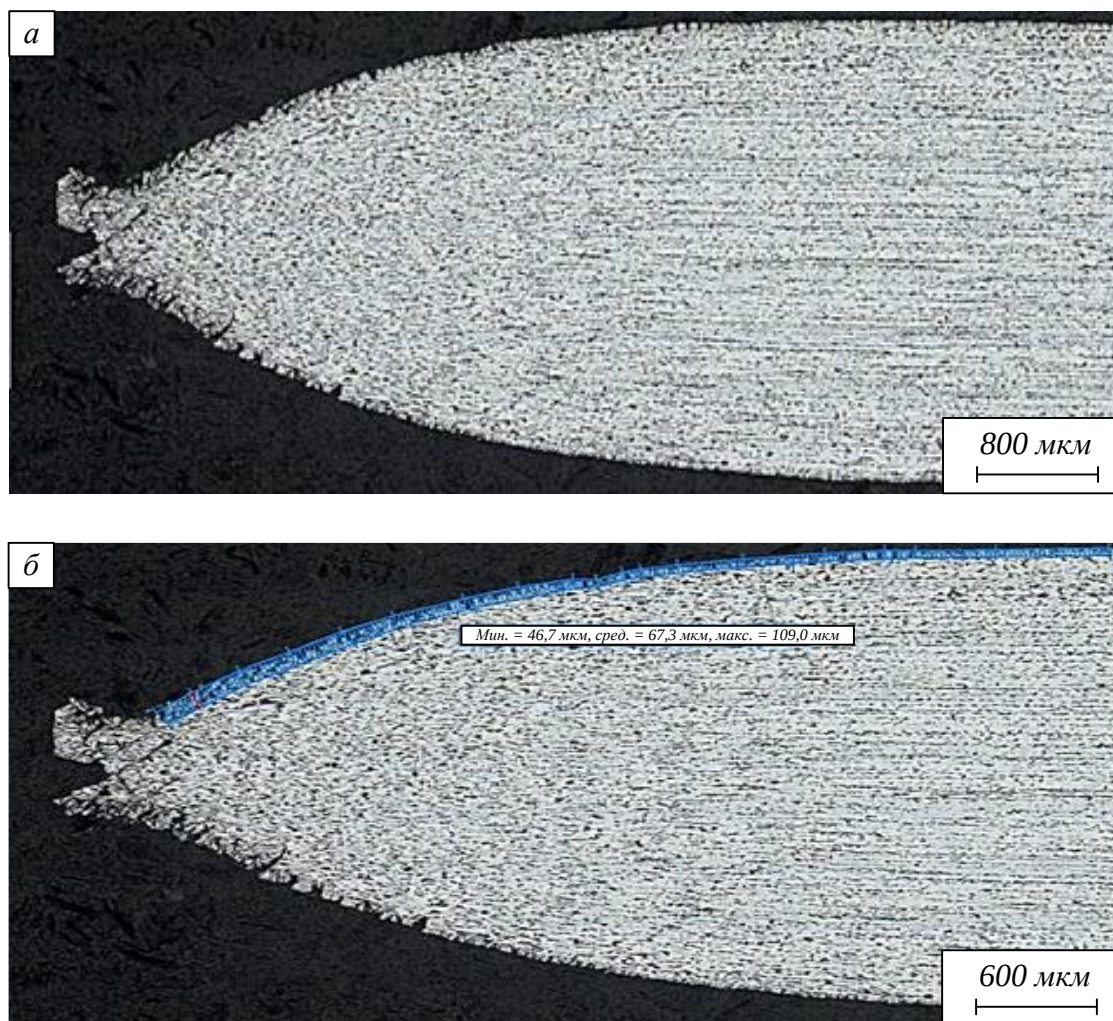


Рис. 3. Микроструктура в зоне деформации и разрушения образца:
 а – изображение микроструктуры; б – изображение микроструктуры с наложенными результатами измерения толщины диффузионного слоя

Fig. 3. Image of the microstructure in the zone of deformation and destruction of the sample:
 а – image of the microstructure; б – image of the microstructure with superimposed results of measuring the thickness of the diffusion layer

веденные исследования на образце после деформации не выявили.

Результаты исследования показали, что в подборидной зоне наблюдается некоторый рост зерна (на один балл по сравнению с сердцевиной) [17 – 20]. В подборидной зоне наблюдается незначительное изменение анизотропии зерна (зерно несколько вытягивается в направлении по нормали к диффузионному слою). Этот эффект объясним прежде всего тем, что в рассматриваемом направлении диффузионные потоки имеют преимущественное направление, что в свою очередь, стимулирует рост зерна предпочтительно в этих направлениях, который также контролируется диффузионными процессами [21 – 26].

Разброс значений внутри конкретной области находится на уровне нескольких единиц (или на уровне статистической погрешности), но при этом разница между значениями твердости и показателей размера зерна в разных зонах,

например, в зоне деформации свидетельствует о том, что твердость у борированного образца несколько меньше (в среднем на 12 – 15 %) по сравнению с образцом, не подвергавшимся борированию (рис. 5) [21]. Разница между твердостью в недеформированной зоне находится в пределах статистической погрешности и инвариантно к типу термической обработки (ТО или ХТО). Твердость материала определяется преимущественно его химическим составом и только потом уже параметрами температурно-временного воздействия на него [19; 25]. Снижение твердости можно объяснить некоторым «протекторным» действием боридного слоя, в котором при растяжении формируются трещины, направленные по нормали к поверхности образца, и простираются, как правило, через весь слой (рис. 3, 4), играя тем самым роль концентраторов напряжений [18]. Эти трещины, являясь концентраторами напряжений, снижают

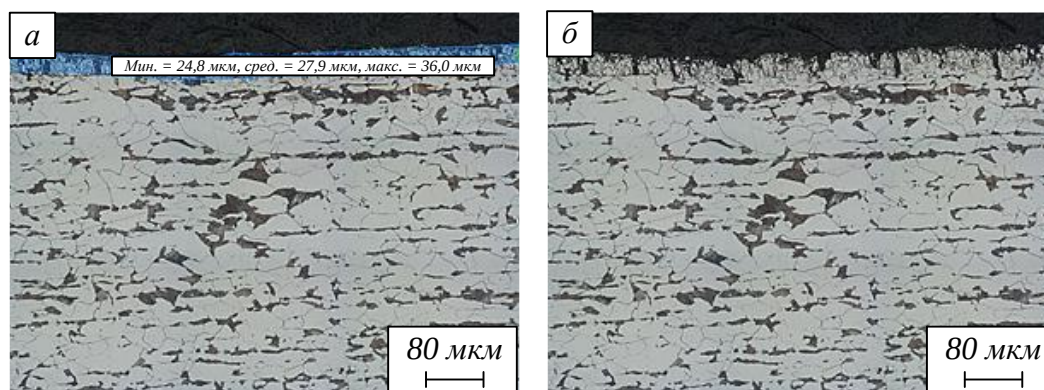


Рис. 4. Микроструктура в недеформированной зоне образца:

а – изображение микроструктуры с наложенными результатами измерения толщины диффузионного слоя;

б – изображение микроструктуры без наложения результатов измерения

Fig. 4. Microstructure in the undeformed zone of the sample:

a – image of the microstructure with superimposed results of measuring the thickness of the diffusion layer;

b – image of the microstructure without superimposing the measurement results

порог пластической деформации материала, что в свою очередь приводит к проявлению наклепа в меньшей степени.

Средневзвешенный размер зерна в зоне наибольшей пластической деформации термообработанной стали соответствует 10 баллу, тогда как в зоне, не подвергшейся значительной пластической деформации, средневзвешенный размер зерна соответствует 8 баллу (против 10 и 9 балла у борированной стали) (рис. 6). Аналогично положение выглядит и с параметром анизотропии зерна: с одной стороны, рассматриваемый параметр определяет степень равноосности зерна, а с другой стороны – показывает ориентацию зерна в пространстве. В зоне наибольшей пластической деформации усредненный параметр анизотропии зерна соответствует значению около 2,5, что указывает на то, что, во-первых, зерно имеет вытянутую форму, причем длина зерна приблизительно в 2,5 раза больше его ширины, а во-вторых, зерно ориентировано вдоль горизонтальной оси.

Зерно в зоне, не подвергавшейся интенсивной пластической деформации, имеет некоторую анизотропию, но ее усредненный показатель соответствует значению 1,5, что также свидетельствует о некоторой продольной деформации.

В зоне пластической деформации отожженного образца наблюдается измельчение зерна приблизительно в 4 раза, о чем свидетельствует рост бальности размеров зерна на две единицы: в зоне наибольшей пластической деформации борированного образца средний условный номер зерна соответствовал 8 баллу, тогда как в отожженном образце этот же показатель возрос до 10 баллов. Степень анизотропии зерна при этом изменяется не значительно (1,62 и 1,70 для борированного и отожженного образцов). Рассматриваемый факт может объясняться тем, что по мере возрастания

показателя степени анизотропии зерна, характеризующего степень его вытянутости вдоль направления действия растягивающей силы при проведении испытания, увеличивается и его степень наклепа, что приводит в свою очередь к возрастанию количества дислокаций в кристаллической решетке зерна и упрочнению материала. При достижении определенного порогового значения (для стали марки 20 это пороговое состояние соответствует параметру анизотропии зерна на уровне около 1,7 – 1,8) происходит дробление зерна на два или более фрагментов, при этом параметр анизотропии зерна несколько уменьшается. Если напряжения на материал продолжают действовать, цикл повторяется до тех пор, пока уровень прочности материала (сталь 20) не будет исчерпан и образец не разрушится. В случае борированного образца происходит некоторое снижение пластичности, и как следствие, анизотропия зерна уменьшается примерно до 1,6 – 1,7.

При этом возрастает общая степень упрочнения материала за счет наличия высокопрочного диффузионного покрытия. Уровень пластичности при этом серьезно падает по причине того, что при попытках растяжения высокопрочного боридного слоя на нем практически сразу возникают надрывы в виде трещин, простирающихся от внешней поверхности диффузионного покрытия на всю его глубину, во многих случаях даже захватывая некоторую часть подборидной зоны. Об этом могут свидетельствовать результаты измерения микротвердости в области отрыва: средние показатели микротвердости в зоне отрыва отожженного образца (272 HV) на 14 % превышают средние значения этого показателя в зоне разрыва борированного образца (238 HV). Анализ образца-свидетеля, прошедшего термическую обработку по аналогии с борированным образцом, но не подвергавшегося

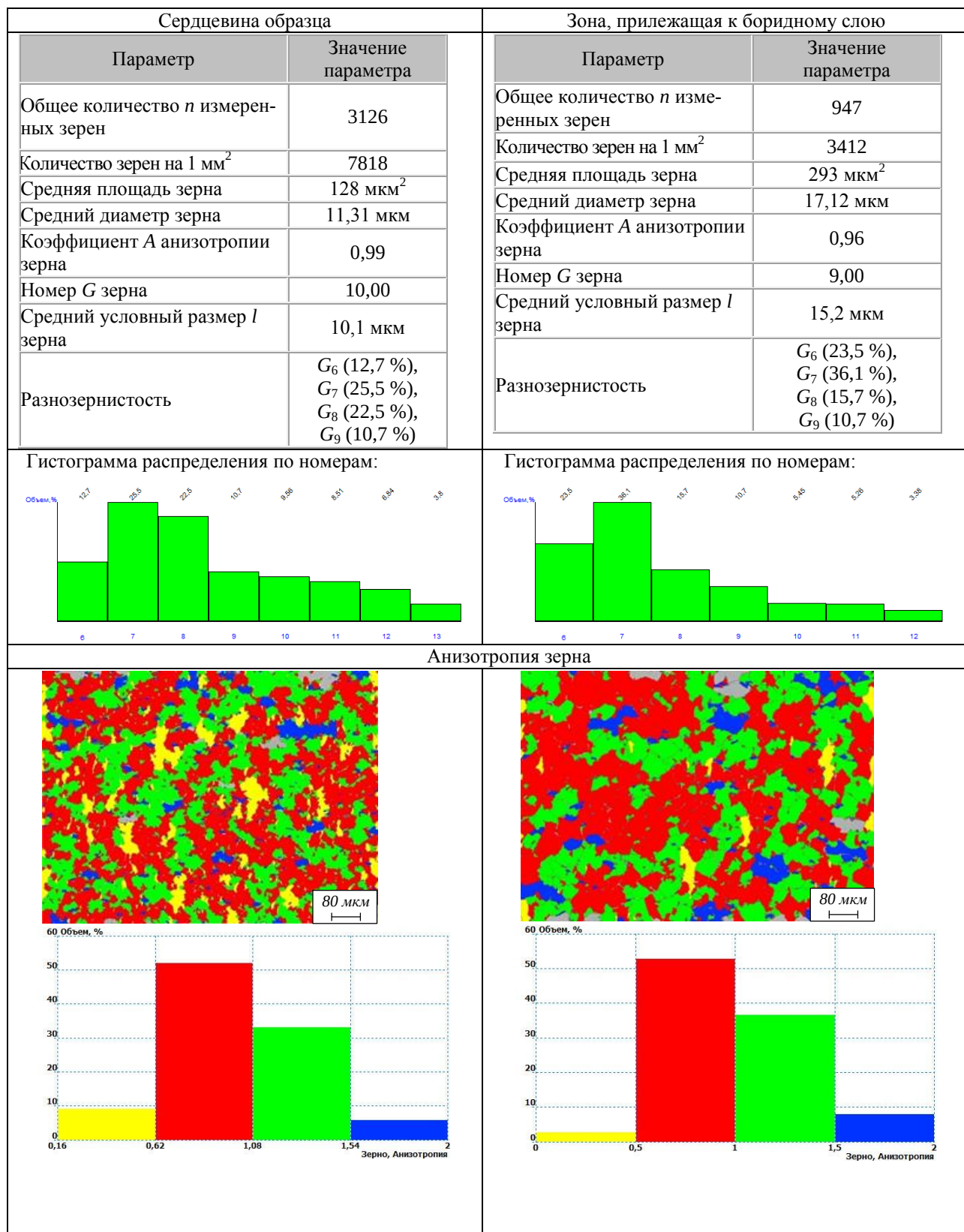


Рис. 5. Состояние борированной стали:
 а – сердцевина образца; б – подбординная зона
 Fig. 5. Condition of borated steel:
 а – core of the sample; б – sub-core zone

диффузионному насыщению поверхности и пластической деформации после термической обработки, был проведен аналогичным образом и его

результаты представлены на рис. 7, 8. Сравнение микроструктуры сердцевины образцов (борированного и не борированного), пре-

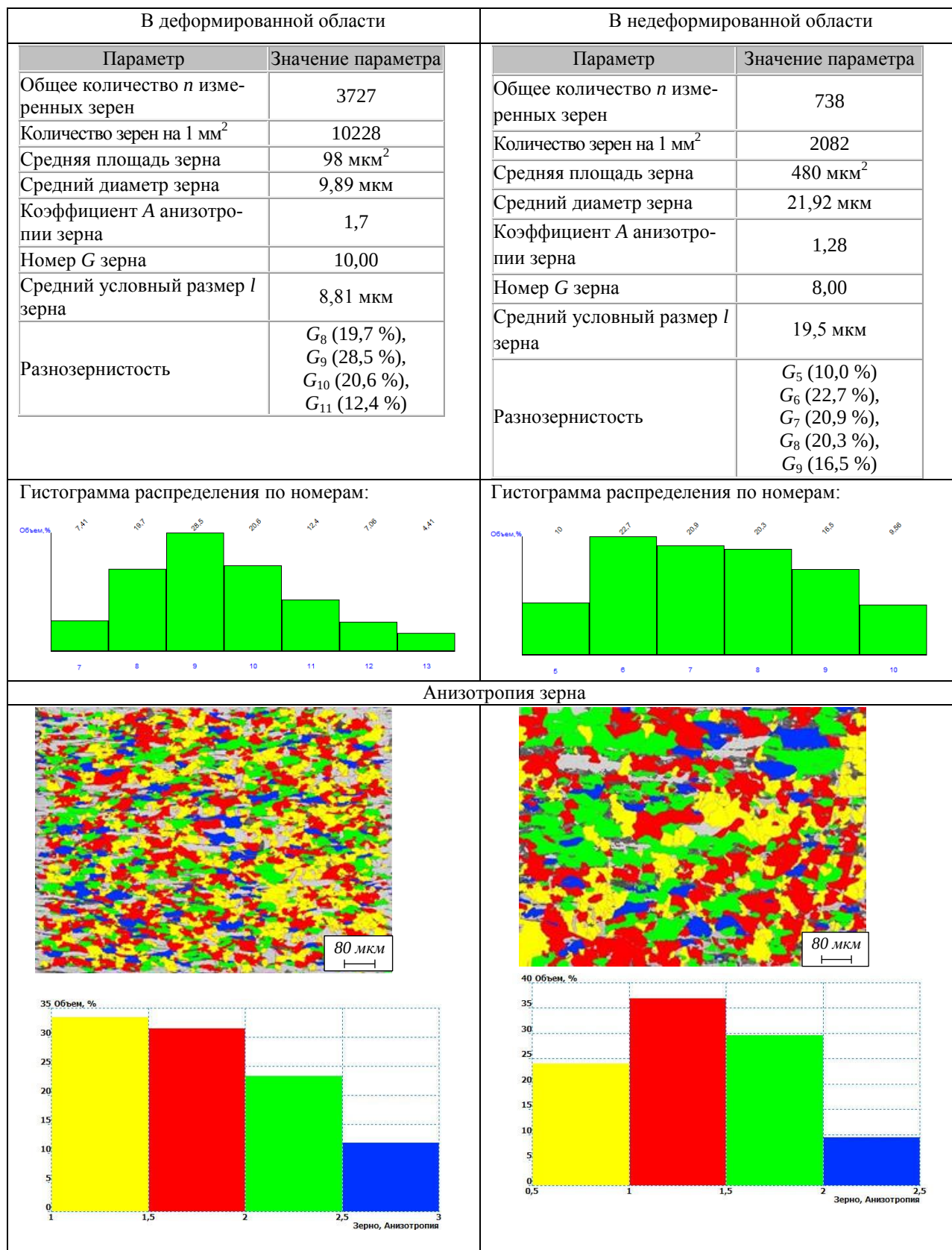


Рис. 6. Состояние борированной стали:
 a – область деформации; $б$ – недеформированная область
 Fig. 6. Condition of borated steel:
 a – deformation area; $б$ – undeformed area

терпевших идентичное термическое воздействие, показало, что микроstructures сердцевин

ны образцов абсолютно идентичны: совпадают как фазовый состав, так и структурное состоя-

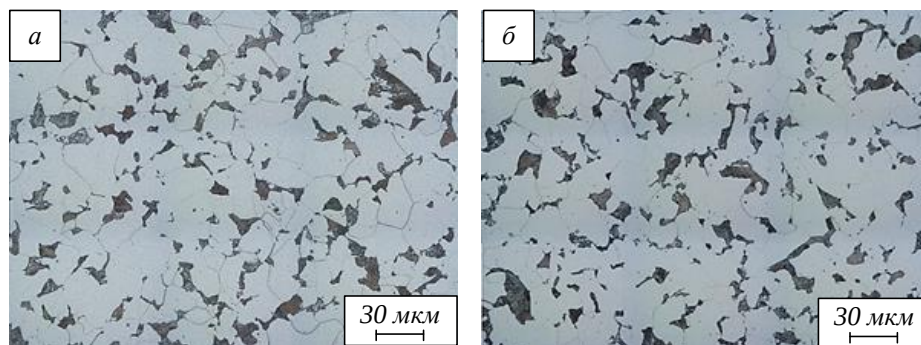


Рис. 7. Микроструктура сердцевины образцов, претерпевших идентичные термические воздействия:

a – отожженный образец; *б* – борированный образец

Fig. 7. Microstructure of the core of samples subjected to identical thermal effects:

a – annealed sample; *б* – borated sample

ние (рис. 7). Однако, проведенный анализ (рис. 8) показал, что размер зерна в образце, подвергнутом термической обработке, в 2 раза больше, чем в сердцевине образца, подвергнувшегося ХТО.

При этом в обоих случаях наблюдается нормальный закон распределения по величине зерна с экстремумом в номере зерна 7. Проведенные измерения анизотропии зерна показывают, что в обоих случаях она близка к единице (0,99 при ХТО и 1,02 при ТО), что позволяет говорить о том, что в обоих случаях наблюдаются равноосные зерна, по форме близкие к глобулярной.

Выводы

В зоне пластической деформации отожженного образца наблюдается измельчение зерна приблизительно в 4 раза, о чем свидетельствует рост балльности размеров зерна на две единицы. В зоне наибольшей пластической деформации борированного образца средний условный номер зерна соответствовал 8 баллу, тогда как в отожженном образце этот же показатель возрос до значения 10 балла. Степень анизотропии зерна при этом изменилась не значительно. Сравнение микроструктуры сердцевины образцов (борированного и не борированного), претерпевших идентичное термическое воздействие, показало, что микроструктура сердцевины обоих образцов абсолютно идентична: совпадают как фазовый состав, так и структурное состояние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каллистер У.Д. мл. *Материаловедение: от технологии к применению (металлы, керамики, полимеры)* (пер. с англ. под ред. Малкина А.Я.). Изд-во «Научные основы и технологии»: 2011:896.
2. Saunders N., Guo Z., Li X., Miodownik A.P., Schillé J.-P. The Calculation of TTT and CCT diagrams for General Steels. *JOM*. 2003;55(12):60.
3. Trzaska J., Jagiełło A.S., Dobrzański L.A. The calculation of CCT diagrams for engineering steels. *Archives of materials science and engineering*. 2009;39:13–20.
4. Collins J., Piemonte M., Taylor M., Fellowes J., Pickering E., Rapid A. Open-Source CCT Predictor for Low Alloy Steels, and Its Application to Compositionally Heterogeneous Material. *Metals*. 2023;13:1168. <https://doi.org/10.3390/met13071168>
5. Cha S.C. et al. CALPHAD-based alloy design for advanced automotive steels. Part I: Development of bearing steels with enhanced strength and optimized microstructure. *Calphad*. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.calphad.2016.04.007>
6. Avrami M. Kinetics of Phase Change I: General Theory. *J. Chem. Phys.* 1939;7:1103. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1750380>
7. Cahn J.W. Transformation Kinetics During Continuous Cooling. *Acta Metall.* 1956;4:572–575. [http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160\(56\)90158-4](http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160(56)90158-4)
8. Lee J.L.; Pan Y.T.; Hsieh K.C. Assessment of Ideal TTT Diagram in C-Mn Steel. *Mater. Trans. JIM*. 1998;39:196–202. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans1989.39.196>
9. Callister W.D., Rethwisch D.G. *Fundamentals of Materials Science and Engineering, An Integrated Approach*. John Wiley: Hoboken, NJ, 2008:911.
10. Shackelford J.F. *Introduction to Materials Science for Engineers*. Pearson, Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 2009:533.
11. Kalpakjian S., Schmid S. *Manufacturing Engineering and Technology*. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 2009:1216.
12. Пат. № 2345175. Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей / А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, Б.Д. Лыгденов, С.А. Земляков, О.А. Власова, Е.А. Кошелева, М.А. Гурьев; заявл. 03.04.2007; опубл. 27.01.2009. Бюл. № 3.
13. Гурьев А.М., Гурьев М.А., Земляков С.А., Иванов С.Г. Выявление особенностей морфологии и фазового состава сталей методами специального металлографического травления. В кн.: *Эволюция дефектных структур в конденсированных средах. Сборник тезисов XVI Международной школы-семинара*. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. 2020:83–84.

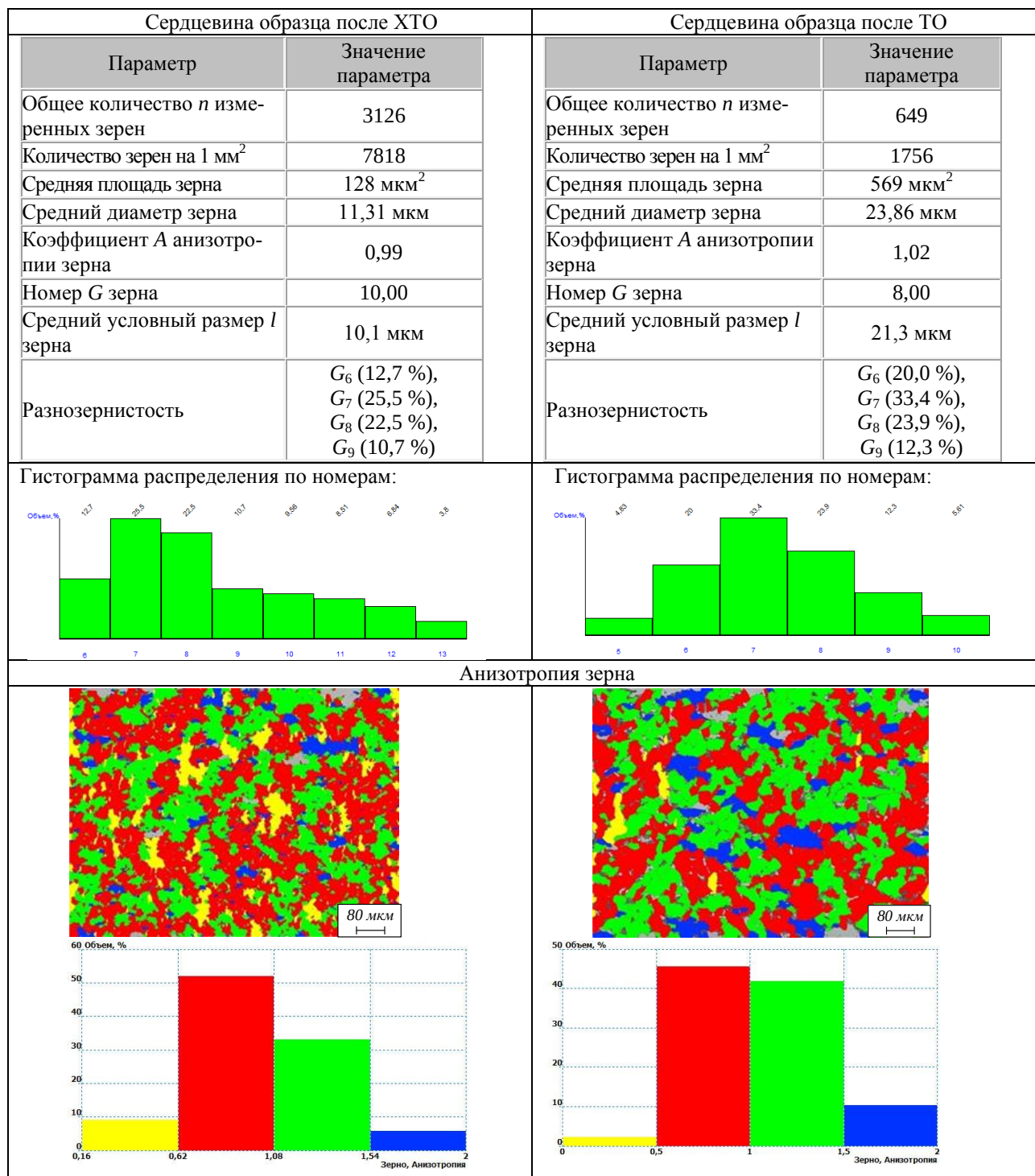


Рис. 8. Сравнительный анализ сердцевины образцов, претерпевших идентичные термические воздействия:

 a – отожженный образец; b – борированный образец

Fig. 8. Comparative analysis of the core of samples subjected to identical thermal effects:

 a – annealed sample; b – borated sample

14. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А. Методика пробоподготовки образцов высоколегированных сталей для автоматического анализа карбидной фазы. *Ползуновский вестник*. 2020;3:102–105.
15. Иванов С.Г., Гурьев А.М., Земляков С.А., Гурьев М.А., Романенко В.В. Особенности методики подготовки образцов для автоматического анализа карбидной фазы стали X12Ф1 после цементации в вакууме с

применением программного комплекса «Thixomet-PRO». *Ползуновский вестник*. 2020;2:165–168.

16. Иванов С.Г., Гурьев М.А., Гурьев А.М., Романенко В.В. Фазовый анализ боридных комплексных диффузионных слоев на углеродистых сталях при помощи цветного травления. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2020;17(1):74–77.

17. Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Мосоров В.И., Бутуханов В.А. Перспективные диффузионные покрытия. *Международный журнал экспериментального образования*. 2015;12(4):573.
18. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Гурьев М.А., Шунчи М., Власова О.А. Борирование малоуглеродистой стали. *Международный журнал экспериментального образования*. 2015;12(4):572–573.
19. Mei S., Zhang Y., Zheng Q., Fan Y., Lygdenov B., Guryev A. Compound boronizing and its kinetics analysis for H13 steel with rare earth CeO₂ and Cr₂O₃. *Applied Sciences*. 2022;12(7):3636.
20. Гурьев А.М., Грешилов А.Д., Лыгденов Б.Д. Диффузионное борирование – перспективное направление в поверхностном упрочнении изделий из стали и сплавов. *Ползуновский альманах*. 2010;1:80–88.
21. Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Козлов Э.В., Бутуханов В.А., Чжу Ч. Формирование диффузионного слоя на рабочей поверхности инструмента, работающего в условиях динамического износа. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015;58.2:117–120.
22. Arslan-Kaba M., Karimzadehkhoei M., Keddami M., Timur S., Sireli G.K. An experimental and modelling study on pulse current integrated CRTD-Bor process. *Mater. Chem. Phys.* 2023;302:127735.
23. Campos I., Oseguera J., Figueroa U., García J.A., Bautista O., Kelemenis G. Kinetic study of boron diffusion in the paste boriding process. *Mater. Sci. Eng. A*. 2003;352:261–265.
24. Guo P., Ma S., He X., Lv P., Luo Y., Jia J., Cui X., Xu L., Xing J. Effects of boride orientation and Si content on high-temperature oxidation resistance of directionally solidified Fe–B alloys. *Materials*. 2022;15:7819.
25. Kul M., Yilmaz Y., Oskay K., Kumruoğlu L.C. Effect of chemical composition of boriding agent on the optimization of surface hardness and layer thickness on AISI 8620 steel by solid and liquid boriding processes. *Adv. Mater. Sci.* 2022;22:14–22.
26. Zhang S., Zhang H., Zhang H., Zhao X., Li Y. Study on diffusion kinetics and law of chromium on the surface of low-carbon steel. *Coatings*. 2023;13:98.
- ally Heterogeneous Material. *Metals*. 2023;13:1168. <https://doi.org/10.3390/met13071168>
5. Cha S.C. et al. CALPHAD-based alloy design for advanced automotive steels. Part I: Development of bearing steels with enhanced strength and optimized microstructure, *Calphad*. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.calphad.2016.04.007>
6. Avrami M. Kinetics of Phase Change I: General Theory. *J. Chem. Phys.* 1939;7:1103. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1750380>
7. Cahn J.W. Transformation Kinetics During Continuous Cooling. *Acta Metall.* 1956;4:572–575. [http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160\(56\)90158-4](http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160(56)90158-4)
8. Lee J.L.; Pan Y.T.; Hsieh K.C. Assessment of Ideal TTT Diagram in C-Mn Steel. *Mater. Trans. JIM*. 1998;39:196–202. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans1989.39.196>
9. Callister W.D., Rethwisch D.G. *Fundamentals of Materials Science and Engineering, An Integrated Approach*. John Wiley: Hoboken, NJ, 2008:911.
10. Shackelford J.F. *Introduction to Materials Science for Engineers*. Pearson, Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 2009:533.
11. Kalpakjian S., Schmid S. *Manufacturing Engineering and Technology*. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 2009:1216.
12. Gur'ev A.M., Ivanov S.G., Lygdenov B.D., Zemlyakov S.A., Vlasova O.A., Kosheleva E.A., Gur'ev M.A. Method of strengthening parts made of structural and tool steels. Pat. no. 2345175 RF. *Bul. Izobretenii*. 2009;3. (In Russ.).
13. Gur'ev A.M., Gur'ev M.A., Zemlyakov S.A., Ivanov S.G. Identification of the morphological features and phase composition of steels using special metallographic etching methods. In: *Evolution of defect structures in condensed matter. Collection of abstracts of the XVI International School-Seminar*. Barnaul: Altaiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. I.I. Polzunova. 2020: 83–84. (In Russ.).
14. Ivanov S.G., Gur'ev A.M., Zemlyakov S.A., Gur'ev M.A. Methodology for sample preparation of high-alloy steel samples for automatic analysis of the carbide phase. *Polzunovskii vestnik*. 2020;3:102–105. (In Russ.).
15. Ivanov S.G., Gur'ev A.M., Zemlyakov S.A., Gur'ev M.A., Romanenko V.V. Features of the method of sample preparation for automatic analysis of the carbide phase of Kh12F1 steel after vacuum cementation using the ThixometPRO software package. *Polzunovskii vestnik*. 2020;2:165–168. (In Russ.).
16. Ivanov S.G., Gur'ev M.A., Gur'ev A.M., Romanenko V.V. Phase analysis of boride complex diffusion layers on carbon steels using color etching. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2020;17(1):74–77. (In Russ.).
17. Lygdenov B.D., Gur'ev A.M., Mosorov V.I., Bутуханов В.А. Promising diffusion coatings. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*. 2015;12(4):573. (In Russ.).

REFERENCES

1. Callister U.D. *Materials Science: From Technology to Application (Metals, Ceramics, Polymers) (trans. from English edited by Malkin A.Ya.)*. Izd-vo «Nauchnye osnovy i tekhnologii»: 2011. 896p. (In Russ.).
2. Saunders N., Guo Z., Li X., Miodownik A.P., Schillé J.-P. The Calculation of TTT and CCT diagrams for General Steels. *JOM*. 2003;55(12):60.
3. Trzaska J., Jagiello A.S., Dobrzański L.A. The calculation of CCT diagrams for engineering steels. *Archives of materials science and engineering*. 2009;39:13–20.
4. Collins J., Piemonte M., Taylor M., Fellowes J., Pickering E., Rapid A. Open-Source CCT Predictor for Low Alloy Steels, and Its Application to Composition-

18. Gur'ev A.M., Lygdenov B.D., Gur'ev M.A., Shunchi M., Vlasova O.A. Boriding of low carbon steel. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*. 2015;12(4):572–573. (In Russ.).
19. Mei S., Zhang Y., Zheng Q., Fan Y., Lygdenov B., Guryev A. Compound boronizing and its kinetics analysis for H13 steel with rare earth CeO₂ and Cr₂O₃. *Applied Sciences*. 2022;12(7):3636.
20. Gur'ev A.M., Greshilov A.D., Lygdenov B.D. Diffusion boriding is a promising direction in surface hardening of steel and alloy products. *Polzunovskii al'manakh*. 2010;1:80–88. (In Russ.).
21. Lygdenov B.D., Gur'ev A.M., Kozlov E.V., Butukhanov V.A., Chzhu Ch. Formation of a diffusion layer on the working surface of a tool operating under dynamic wear conditions. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 2015;58(2):117–120. (In Russ.).
22. Arslan-Kaba M., Karimzadehkhoei M., Keddami M., Timur S., Sireli G.K. An experimental and modelling study on pulse current integrated CRTD-Bor process. *Mater. Chem. Phys.* 2023;302:127735.
23. Campos I., Oseguera J., Figueroa U., García J.A., Bautista O., Kelemenis G. Kinetic study of boron diffusion in the paste boriding process. *Mater. Sci. Eng. A*. 2003;352:261–265.
24. Guo P., Ma S., He X., Lv P., Luo Y., Jia J., Cui X., Xu L., Xing J. Effects of boride orientation and Si content on high-temperature oxidation resistance of directionally solidified Fe–B alloys. *Materials*. 2022;15:7819.
25. Kul M., Yilmaz Y., Oskay K., Kumruoğlu L.C. Effect of chemical composition of boriding agent on the optimization of surface hardness and layer thickness on AISI 8620 steel by solid and liquid boriding processes. *Adv. Mater. Sci.* 2022;22:14–22.
26. Zhang S., Zhang H., Zhang H., Zhao X., Li Y. Study on diffusion kinetics and law of chromium on the surface of low-carbon steel. *Coatings*. 2023;13:98.

Сведения об авторах:

Михаил Алексеевич Гурьев, к.т.н., доцент, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd
E-mail: agtu-otm2010@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9191-1787
SPIN-код: 6084-1112

Сергей Геннадьевич Иванов, д.т.н., профессор, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Инновационный центр современных текстильных технологий (Лаборатория Цзяньху), Ключевая лаборатория цифрового текстильного оборудования Хубэй, Уханьский текстильный университет
E-mail: serg225582@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5965-0249
SPIN-код: 1249-4949

Алексей Михайлович Гурьев, д.т.н., профессор, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Ключевая лаборатория цифрового текстильного оборудования Хубэй, Уханьский текстильный университет, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd
E-mail: gurievam@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7570-8877
SPIN-код: 1134-0006

Бурьял Дондокович Лыгденов, д.т.н., профессор, Ключевая лаборатория цифрового текстильного оборудования Хубэй, Zhejiang Tianxiong Industrial Technology Co., Ltd
E-mail: lygdenov59@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3580-6165
SPIN-код: 2406-7272

Information about the authors:

Mikhail A. Gur'ev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd
E-mail: agtu-otm2010@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9191-1787
SPIN-код: 6084-1112

Sergei G. Ivanov, Doctor of Technical Sciences, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Innovation Center for Modern Textile Technology (Jianhu Laboratory), Hubei Key Laboratory of Digital Textile Machinery, Wuhan Textile University
E-mail: serg225582@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5965-0249
SPIN-код: 1249-4949

Aleksei M. Gur'ev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Hubei Key Laboratory of Digital Textile Machinery, Wuhan Textile University, Zhejiang Pinuo Machinery Co., Ltd
E-mail: gurievam@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7570-8877
SPIN-код: 1134-0006

Bur'yal D. Lygdenov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Hubei Key Laboratory of Digital Textile Machinery Zhejiang Tianxiong Industrial Technology Co., Ltd
E-mail: lygdenov59@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3580-6165
SPIN-код: 2406-7272

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
 The authors declare no conflict of interest

Поступила в редакцию 24.03.2025
 После доработки 19.05.2025
 Принята к публикации 26.05.2025

Received 24.03.2025
 Revised 19.05.2025
 Accepted 26.05.2025

Оригинальная статья

УДК 669.184.244.62

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-75-84

**АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПОДОБИЯ И МЕТОДИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНВЕРТЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ. СООБЩЕНИЕ 1**

© 2025 г. Е. В. Протопопов, А. А. Уманский, Е. А. Беленецкий, С. С. Фатьянов,
С. А. Полежаев, Е. М. Запольская

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

Аннотация. Рабочее пространство конвертера рассматривается как совокупность отдельных реакционных зон, что способствует изучению механизма физико-химических явлений в каждой зоне и в целом в системе кислородные струи – металл – шлак – отходящий поток газов. Выполнение условий подобия позволяет в некотором диапазоне качественно реализовывать высокотемпературное моделирование, а частичное нарушение тех или иных условий подобия будет приводить к осуществлению только приближенного моделирования. Выполнены анализ и обоснование основных положений методики высокотемпературного моделирования конвертерного процесса с комбинированной продувкой конвертерной ванны. Сформированы основные условия аэрогидродинамического и динамического подобия при использовании для продувки расплава разноимпульсных газовых потоков, которые в совокупности с условиями геометрического и физического подобий позволяют с большей достоверностью переносить полученные результаты с модели на образец. Предварительно для каждого эксперимента разрабатывается технологическая карта, обеспечивающая заданные параметры дутьевого и шлакового режимов плавки с использованием присадок фракционных извести и плавикового шпата. Рассмотренные условия и основные безразмерные критерии подобия позволяют переносить полученные результаты на промышленные образцы. Разработан и усовершенствован комплекс лабораторных установок и методик, позволяющих с использованием фото- и видеосъемки визуализировать процесс взаимодействия газовых струй с шлако-металлической эмульсией в конвертере, получать информацию о параметрах образующихся реакционных зон и выходе газов на поверхность металлической ванны.

Ключевые слова: теория подобия, высокотемпературное моделирование, конвертер, комбинированная продувка

Для цитирования: Протопопов Е.В., Уманский А.А., Беленецкий Е.А., Фатьянов С.С., Полежаев С.А., Запольская Е.М. Анализ условий подобия и методики высокотемпературного моделирования конвертерных процессов. Сообщение 1. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):75–84. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-75-84](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-75-84)

Original article

**THE ANALYSIS OF SIMILARITY CONDITIONS AND
THE METHODOLOGY OF HIGH-TEMPERATURE MODELING
OF CONVERTER PROCESSES. MESSAGE 1**

© 2025 E. V. Protopopov, A. A. Umanskii, E. A. Belenetskii, S. S. Fat'yanov, S. A. Polezhaev,
E. M. Zapol'skaya

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass, 650007, Russian Federation)

Abstract. The working space of the converter is considered as a set of separate reaction zones, which contributes to the study of the mechanism of physico-chemical phenomena in each zone and in the oxygen jets – metal – slag – exhaust gas system as a whole. The fulfillment of similarity conditions allows high-temperature modeling to be

qualitatively implemented in a certain range, and a partial violation of one or another of the considered similarity conditions will lead to the implementation of only approximate modeling. The analysis and substantiation of the main provisions of the methodology of high-temperature modeling of the converter process with combined purging of the converter bath has been performed. The basic conditions of aerohydrodynamic and dynamic similarity are formed when using multi-pulse gas flows for purging a melt, which, together with the conditions of geometric and physical similarity, make it possible to transfer the results obtained from the model to the sample with greater reliability. A technological map is developed preliminarily for each experiment, providing the specified parameters of blast and slag melting modes using fractional lime and fluorspar additives. The considered conditions and the basic dimensionless similarity criteria make it possible to transfer the results obtained to industrial designs. A set of laboratory facilities and techniques has been developed and improved that make it possible to visualize the interaction of gas jets with a slag-metal emulsion in a converter using photo and video recordings, to obtain information about the parameters of the reaction zones formed and the gases escaping to the surface of a metal bath.

Keywords: similarity theory, high temperature modeling, converter, combined purge

For citation: Protopopov E.V., Umanskii A.A., Belenetskii E.A., Fat'yanov S.S., Polezhaev S.A., Zapol'skaya E.M. Analysis of similarity conditions and methods of high-temperature modeling of converter processes. Message 1. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):75–84. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-75-84](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-75-84)

Введение

В соответствии с накопленным уровнем знаний значительный объем информации может быть получен в лабораторных условиях при использовании высокотемпературного моделирования с соблюдением подобия процессов, происходящих в натурных условиях [1 – 6], которые в дальнейшем могут привести к новым технологическим и конструктивным решениям [7 – 10]. В отличие от производственных плавок исследования на моделях конвертеров позволяют отбирать большое количество различных проб, широко варьировать условия и характер проведения экспериментов, проводить наблюдения за ходом продувки и, что особенно важно, получать информацию об аэродинамике процесса с фиксацией физических явлений фото- и видеосъемкой.

Впервые представленный в работе [1] принцип рассмотрения рабочего пространства конвертера как совокупность отдельных реакционных зон, безусловно, способствовал сосредоточению усилий на изучении механизма физико-химических явлений в каждой зоне и в целом в системе кислородные струи – металл – шлак – отходящий поток газов. Достигнутые при этом результаты исследований положительно сказались в прикладном аспекте на совершенствовании технологии процесса с верхней продувкой, созданию целого ряда новых конструкций дутьевых устройств с подачей разноимпульсных газовых струй для интенсификации продувки, а также позволили более осознанно подойти к освоению различных вариантов технологии с донным и/или комбинированным дутьем [11 – 15].

Следует отметить, что при газовой продувке жидкой ванны условия достаточно полного по-

добия гидродинамических и массообменных процессов можно выразить в общем виде следующим критериальным соотношением [8; 17; 18]:

$$F(\text{Sh}; \text{Fo}; \text{Fr}; \text{En}; \text{Re}; \text{We}; \bar{\rho}; \bar{\nu}; \bar{u}; \text{Ma}; \kappa; \bar{l}_1; \bar{l}_2 \dots \bar{l}_n; \text{Sc}) = 0, \quad (1)$$

где Sh; Fo; Fr; En; Re; We; Ma; Sc – числа Шервуда, Фурье, Фруда, Эйлера, Рейнольдса, Вебера, Маха, Шмидта; $\bar{\rho}$, $\bar{\nu}$, $\bar{u}$ и $\bar{l}_i$ – критерии, характеризующие геометрические размеры агрегатов, соотношения плотностей, вязкостей и скоростей взаимодействующих фаз.

Одновременное соблюдение равенства для модели и образца такого числа критериев практически невозможно, а отсутствие равенства затрудняет проведение соответствующих исследований и может привести к ошибкам в рекомендациях. Поэтому, как правило, в каждом конкретном случае в зависимости от поставленных задач исследования используется только определяющие процесс критерии или их модификация.

Представляя высокотемпературное моделирование как метод экспериментальных исследований аэрогидродинамических, физико-химических или тепловых явлений на уменьшенной модели промышленного конвертера, необходимо обеспечить, чтобы аналогичные явления в модели и образце были полностью подобны:

- физический процесс, характеризующийся одинаковыми физико-химическими величинами, подчиняющийся законам аэрогидродинамики и тепломассообмена, описываемый одинаковыми дифференциальными уравнениями;
- геометрическое подобие модели образцу;

– динамическое подобие модели образцу.

В рассматриваемом случае безразмерные определяющие критерии подобия в модели и образце должны иметь одинаковые численные значения.

Выполнение этих условий позволяет в некотором диапазоне качественно реализовывать высокотемпературное моделирование, а частичное нарушение тех или иных из перечисленных выше условий подобия будет приводить к осуществлению только приближенного моделирования.

В условиях экспериментов легко выполняется геометрическое подобие образца и модели по основным параметрам рабочего пространства конвертерного агрегата с возможным дополнительным характерным размещением донных или боковых дутьевых устройств. Рассматриваемое условие выполняется без особых затруднений с соблюдением следующего соотношения:

$$\frac{H_{CB}}{H_{CB}} = \frac{H_P}{H_P} = \frac{H_{Ц}}{H_{Ц}} = \frac{H_K}{H_K} = \frac{H_B}{H_B} = \frac{h'_B}{h_B} = \dots$$

$$= \frac{D'_Г}{D_Г} = \frac{D'_{Ц}}{D_{Ц}} = \frac{D'_д}{D_д} = C_L, \quad (2)$$

где H_P , $H_{Ц}$, H_K и H_{CB} – высота рабочего пространства, цилиндрической, конической частей конвертера и свободного рабочего пространства над уровнем ванны в спокойном состоянии; h_B – глубина металлической ванны в спокойном состоянии; $D_Г$ и $D_{Ц}$ – диаметр горловины и ванны в цилиндрической части конвертера; $D_д$ – диаметр окружности расположения донных фурм; H_B – высота размещения боковых фурм от уровня днища; C_L – константа геометрического подобия линейных величин; здесь и далее штрих относится к обозначениям для модели.

При такой сложной совокупности процессов, определяющих технологический режим конвертерной плавки, аэрогидродинамические процессы, связанные с организацией рационального дутьевого режима, играют решающую роль. Обеспечение физического подобия «горячей» модели и образца будут соблюдаться в полной мере, при этом физические характеристики (плотность ρ , вязкость ν , поверхностное натяжение σ и другие) взаимодействующих газовой (г), металлической (м) и шлаковой (ш) фаз будут совершенно одинаковыми по величине в точках образца и модели при одних и тех же исходных условиях эксперимента:

$$\frac{\rho'_м}{\rho_м} = \frac{\rho'_ш}{\rho_ш} = \frac{\rho'_г}{\rho_г} = \frac{\nu'_м}{\nu_м} = \frac{\nu'_ш}{\nu_ш} = \frac{\nu'_г}{\nu_г} = \frac{\sigma'_м}{\sigma_м} = \frac{\sigma'_ш}{\sigma_ш} = C_\Phi, \quad (3)$$

а их отношение C_Φ будет постоянным и равным единице.

Обеспечив геометрическое подобие рабочего пространства конвертера, в котором протекают одинаковой природы физико-химические явления, необходимо задаться основными условиями аэрогидродинамического подобия, под которыми подразумевается, прежде всего, выполнение динамического подобия.

Поскольку при комбинированной продувке конвертерной ванны основные и вспомогательные кислородные струи, а также струи всевозможных технологических газов управляют практически всеми физико-химическими процессами, происходящими между газовой, металлической и шлаковой фазами, важно обеспечить подобие на модели и образце параметров режима продувки:

– струйного течения разноимпульсных газовых потоков, формируемых в различного типа верхних донных и боковых дутьевых устройствах, а также характер их взаимодействия с расплавом и отходящими газами;

– особенности воздействия верхних многоярусных, боковых или донных кислородных или других газовых струй непосредственно на металлическую и шлаковую фазы конвертерной ванны;

– поведения конвертерной ванны в ходе продувки (характерного изменения уровня ванны, вспенивания металлической и шлаковой фаз, возникновения волн, брызг и направленных циркуляционных потоков, образования выбросов шлако-металлической эмульсии и выносов мелких капель металла).

Так как процесс организации продувки конвертерной ванны является определяющим во всем сложном комплексе взаимосвязанных явлений при выплавке стали, то особенно важно соблюсти динамическое подобие в дутьевом режиме операции.

В соответствии с ранее полученными данными [6] для обеспечения подобия струйного течения газов на модели и образце должны соблюдаться равенства следующих безразмерных комплексов физических величин: $\rho_0/\rho_0 w_0^2$, k , w_0/a_0 , $p_0/\rho_0 a_0^2$.

При анализе работ [8; 19; 20] видно, что эти комплексы являются известными критериями (числами) Эйлера ($\epsilon_u = \rho_0/\rho_0 w_0^2$), Пуассона ($k = C_p/C_v$, где C_p и C_v – изобарная и изохорная теплоемкости газов Маха ($Ma = w_0/a_0$), где w_0 и a_0 – скорость истечения газа из сопла и скорость звука.

Для выполнения аэродинамического подобия струйных газовых потоков необходимо выполнение следующей критериальной зависимости:

$$f(\epsilon_u^{\text{нач}}, \epsilon_u^{\text{вых}}, Ma, k, n, \bar{\rho}, \bar{T}) = 0. \quad (5)$$

Причем обеспечение на «горячей» модели и образце одинаковых численных значений $\varepsilon_{\text{нач}}^{\text{нач}}$, $\varepsilon_{\text{вых}}^{\text{вых}}$, Ma , k , n , $\bar{p}$, $\bar{T}$ для струйных разноимпульсных газовых потоков достигается, например, при обычной верхней или комбинированной кислородной продувке соблюдением равенства удельного расхода дутья G_{O_2} , $\text{м}^3 (\text{кг} \cdot \text{с})$, давления и температуры подаваемого на продувку кислорода перед соплами геометрически подобных многоструйных фурм, общепринятый подход к расчету которых описан в работах [8; 9; 21].

Важнейшей характеристикой истекающей из сопла газовой струи является ее импульс [8; 22]:

$$i = m w_{\text{вых}} + F_{\text{вых}}(P_{\text{вых}} - P_{\text{окр}}), \quad (6)$$

где m – массовый расход газа через сопло в единицу времени; F – площадь сечения выходного сопла.

При использовании сопел Лаваля и получении сверхзвуковых скоростей истечения при работе сопла в расчетном режиме ($P_{\text{вых}} = P_{\text{окр}}$), импульс газовой струи будет

$$i = m w_{\text{вых}}, \quad (7)$$

где $w_{\text{вых}}$, $P_{\text{вых}}$ – скорость, м/с, и давление, МПа, струи в выходном сечении сопла; $P_{\text{окр}}$ – давление в рабочем пространстве конвертера, МПа.

Причем увеличение импульса струи всегда будет способствовать увеличению ее дальности (динамического напора) и повышать интенсивность ее взаимодействия с ванной. Если все длины измерять в диаметрах сопла, то при одинаковом давлении и температуре газа перед соплом, геометрически подобных соплах и одинаковых газах для основных параметров в струе (например, осевая и осредненная скорости струи, угол раскрытия, плотность, температура и т.д.) получаются идентичные значения.

При определении оптимального вида параметра (критерия) динамического подобия, наиболее важного для изучения характеристик аэродинамических процессов в двухфазных средах для описания процесса целесообразно использовать одну из форм критерия Ньютона, представляющего собой отношение потенциальной энергии к кинетической [22; 23]:

$$Ne = \frac{f l}{m w_{\text{вых}}^2}, \quad (8)$$

где f – сила; l – длина траектории, проходимой частицами в подобных системах за подобные отрезки времени.

Поэтому при условии постоянства критерия Ньютона в «горячей» модели и образце, а также

представления, что аэрогидродинамические явления, происходящие в конвертерной ванне, в преобладающей степени определяются взаимодействием инерционных сил газовых струй и сил тяжести расплава, можно преобразовать его как число C_g динамического подобия при продувке конвертерной ванны [2; 4; 18; 20]:

$$\frac{m_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}{m_{\text{Mg}} g l_0} = \frac{\rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2 F_{\Gamma}}{\rho_{\text{M}} F_{\text{ц}} h_{\text{Bg}}} = \frac{I_{\Gamma}}{m_{\text{Mg}} g} = C_g = \text{idem}, \quad (9)$$

где I_{Γ} – полный импульс газовых струй, определяющий силу воздействия струй на ванну, кг м/с^2 ; m – садка конвертера; F_{Γ} – площадь критического сечения дутьевых сопел, м^2 ; $F_{\text{ц}}$ – площадь сечения конвертерной ванны в цилиндрической части, м^2 ; g – ускорение силы тяжести, м/с^2 ; C_g – критерий динамического подобия процесса продувки конвертерной ванны.

Тогда с учетом критерия C_g и конструктивных особенностей фурмы применительно к верхней многоструйной кислородной продувке основные условия динамического подобия будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} i_{O_2}^B \cos \alpha \frac{n^B}{(m_{\text{Mg}})} &= \text{idem}; \\ H_{\text{ф}}/d_{\text{вых}} &= \text{idem}; \\ d_0^B/D_{\text{ц}} &= \text{idem}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $i_{O_2}^B$ – импульс отдельной верхней кислородной струи; n^B и α – количество сопел в головке фурмы и угол наклона их к вертикали соответственно; $H_{\text{ф}}$ – высота фурмы над уровнем ванны; $d_{\text{вых}}$ – диаметр окружности расположения сопла на торце головки.

В случае верхней подачи двух регулируемых разноимпульсных потоков кислорода через специальные конструкции дутьевых устройств в условиях динамического подобия (9) и (10) необходимо использовать следующее соотношение:

$$\left. \begin{aligned} i_{O_2\text{доп}}^B \cos \alpha_{\text{доп}} n_{\text{доп}}^B - i_{O_2\text{осн}}^B \cos \alpha n_{\text{осн}}^B &= \\ &= \text{idem}; \\ H_{\text{я}}/d_{\text{вых}}^{\text{доп}} &= \text{idem}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где $i_{O_2\text{доп}}^B$ и $i_{O_2\text{осн}}^B$ – импульсы разноскоростных основных и дополнительных кислородных струй; $n_{\text{осн}}^B$ и $n_{\text{доп}}^B$ – число основных и дополнительных сопел в фурме; $H_{\text{я}}$ – расстояние между ярусами основных и дополнительных сопел по стволу фурмы; $d_{\text{вых}}^{\text{доп}}$ – диаметр выходного сечения дополнительного сопла.

При комбинированной продувке конвертерной ванны кислородом сверху и нейтральным перемешивающим газом через днище условия

динамического подобия выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{i_{\text{O}_2}^{\text{B}} \cos \alpha n_{\text{B}}}{m_{\text{Mg}}} &= idem; \quad \frac{H_{\Phi}}{d_{\text{вых}}^{\text{B}}} = idem; \\ \frac{d_0^{\text{B}}}{D_{\text{ц}}} &= idem; \\ \frac{i_{\text{нт}}^{\text{Д}} n_{\text{Д}}}{i_{\text{O}_2}^{\text{B}} n_{\text{B}}} &= idem; \quad \frac{d_0^{\text{B}}}{d_0^{\text{Д}}} = idem, \end{aligned} \quad (12)$$

где $i_{\text{нт}}^{\text{Д}}$ – импульс отдельного донного потока нейтрального газа; $n_{\text{Д}}$ – число донных фурм; $d_0^{\text{Д}}$ – диаметр окружности расположения донных фурм.

Если суммарный импульс кислородных струй $\sum i$ отнести к массе жидкого металла m , то условия перехода к различным режимам продувки при использовании специальных фурм можно представить следующим выражением, учитывающим изменение масштаба процесса:

$$H_{\Phi} = f\left(\sqrt[3]{\frac{i}{P_{\text{м}} g}}\right). \quad (13)$$

С использованием таких моделей при описании процесса можно эффективно представлять полученные материалы видео- и фотосъемки поведения реакционной зоны и движения потоков отходящих газов при продувке в лабораторном конвертере.

Выполненный анализ показывает, что при высокотемпературном моделировании без особых затруднений удастся обеспечить динамическое подобие в дутьевом режиме операции при использовании различных технологических газов, где модель и прототип полностью соответствуют протеканию операции продувки, строению и характеру поведения реакционных зон, особенностям выхода отходящих газов, общему характеру развития макрофизических явлений в полости конвертера (уровень вспенивания металла и шлака, образование брызг, всплесков, выбросов, выносов).

Рассмотренные условия и основные безразмерные критерии подобия позволяют полностью обосновать выбранные направления исследований и переносить полученные результаты на промышленные образцы.

Выполнение условий подобия при проведении высокотемпературных исследований предусматривает разработку и использование специальных установок и методик для выполнения экспериментов и контроля протекающих процессов с целью получения информации о различных характеристиках процесса (рис. 1).

Накопленный ранее опыт исследований с использованием «горячего» моделирования [24 – 32] послужил основой для модернизации многоцелевой установки по изучению механизма явлений, сопровождающих комбинированную продувку конвертерной ванны двухъярусными газовыми струями сверху и нейтральными газовыми струями через днище. Основные параметры установки, детальное описание схем контроля и регулирования, организация проведения экспериментов отражены в работе [33]. Значительный объем экспериментальных исследований был выполнен на усовершенствованной и модернизированной установке конвертера емкостью 60 кг (рис. 2).

По аналогии с работами [2; 16; 24; 29] фото- и видеосъемка макрофизических явлений, сопровождающих комбинированную продувку, осуществляется через специальное смотровое окно в верхнем конусе горловины (рис. 1).

Футеровка такого конвертера обычно выполняется из обожженного магнезитового порошка путем набивки по шаблонам. В качестве связки применяли жидкое стекло, при этом для уменьшения теплотеря между корпусом и футеровкой укладываем плиты каолиновой ваты и слой листового асбеста.

Обжиг и разогрев футеровки конвертера перед плавкой осуществляются путем сжигания загруженного в конвертер кокса с подачей для сжигания последнего компрессорного воздуха. Отвод образующихся дымовых газов в ходе разогрева футеровки и продувки конвертерной ванны осуществляется через газоотводящий тракт, соединенный с дымососом. Для продувки расплава используются различные варианты конструкций двухпоточных кислородных фурм, спроектированных с учетом ранее полученных данных (рис. 3) [9].

Принципиальной особенностью таких фурм является возможность создания групповых сверхзвуковых кислородных струй, истекающих из сопел Лаваля нижней головки фурмы, обособленных или объединенных реакционных зон интенсивного выхода потока оксида СО на поверхность ванны группой других сопел, разнесенных по стволу фурмы возможность получения более низкоскоростных струй, обеспечивающих дожигание отходящих газов для улучшения теплового баланса (рис. 3).

При проведении таких экспериментов жидкий низкомарганцовистый чугун (4,00 – 4,50 % С; 0,60 – 0,80 % Si; 0,20 – 0,30 % Mn; 0,012 – 0,035 % S и 0,10 – 0,35 % P) предварительно расплавляли в тигле индукционной печи емкостью 160 кг для дальнейшей заливки чугуна в конвертер при температуре 1350 – 1400 °С.

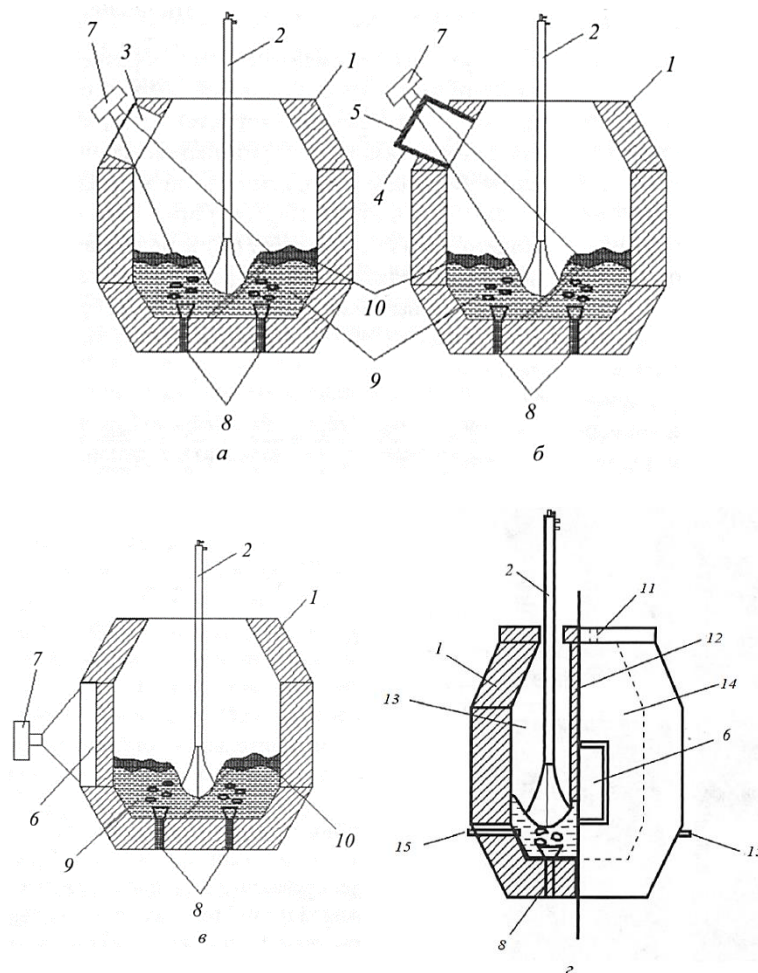


Рис. 1. Схема лабораторных конвертеров высокотемпературного моделирования по изучению комбинированных процессов с использованием смотрового окна (а), смотровой трубы (б), прозрачной стенки (в) и двухкамерного конвертера (г):

- 1 – конвертер; 2 – кислородная фурма; 3 – смотровое окно; 4 – смотровая труба; 5 – кварцевое стекло;
6 – прозрачная кварцевая стенка; 7 – фотокинокамера; 8 – донные фурмы; 9 – металл; 10 – шлак;
11 – калиброванные отверстия в крышке конвертера; 12 – огнеупорная перегородка между камерами;
13 и 14 – сравнительная и реакционная камеры; 15 – термопары

Fig. 1. Schematic diagram of laboratory converters for high-temperature modeling for studying combined processes using a viewing window (a), viewing pipe (b), transparent wall (c) and a two-chamber converter (d):

- 1 – converter; 2 – oxygen tuyere; 3 – viewing window; 4 – viewing pipe; 5 – quartz glass; 6 – transparent quartz wall;
7 – photo-movie camera; 8 – bottom tuyeres; 9 – metal; 10 – slag; 11 – calibrated holes in the converter cover;
12 – refractory partition between chambers; 13 and 14 – comparison and reaction chambers; 15 – thermocouples

Предварительно для каждого эксперимента разрабатывается технологическая карта, обеспечивающая заданные параметры дутьевого и шлакового режимов плавки с использованием присадок фракционных извести и плавикового шпата. По ходу продувки отбираются пробы металла и шлака, далее после падения факела горения отходящих газов над горловиной агрегата заканчивали продувку расплава. Температура металла по ходу продувки обычно изменялась в пределах от 1400 – 1450 в начале до 1600 – 1650 °С в конце операции.

Выводы

Выполнены анализ и обоснование основных положений методики высокотемпературного моделирования конвертерного процесса с комбинирован-

ной продувкой конвертерной ванны. Сформированы основные условия аэрогидродинамического и динамического подобия при использовании для продувки расплава разноимпульсных газовых потоков, которые в совокупности с условиями геометрического и физического подобия позволяют с большей достоверностью переносить полученные результаты с модели на образец. Разработан и усовершенствован комплекс лабораторных установок и методик, позволяющих с использованием фото- и видеосъемки визуализировать процесс взаимодействия газовых струй со шлако-металлической эмульсией в конвертере, получать информацию о параметрах образующихся реакционных зон и выходе газов на поверхность металлической ванны.

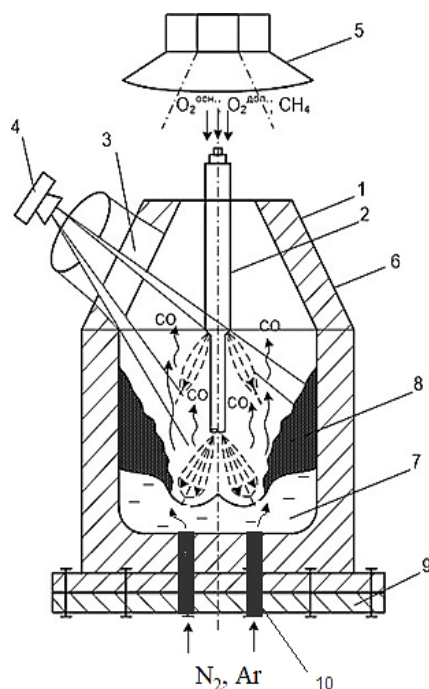


Рис. 2. Принципиальная схема устройства многоцелевой конвертерной установки:

1 – конвертер емкостью 60 кг; 2 – двухъярусная фурма; 3 – смотровое окно; 4 – фото- и видеоаппаратура; 5 – газоотводящий тракт; 6 – футеровка; 7 – металл; 8 – шлак; 9 – отъемное днище; 10 – донные фурмы

Fig. 2. Schematic diagram of the multi-purpose converter plant:

1 – converter 60 kg; 2 – two-tier tuyere; 3 – inspection window; 4 – photo and video equipment; 5 – gas exhaust duct; 6 – lining; 7 – metal; 8 – slag; 9 – removable bottom, 10 – bottom tuyeres

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коотц Т., Беренс К., Маас Г., Баумгартен П. Некоторые вопросы теории кислородно-конвертерного процесса. Дискуссия. *Черные металлы*. 1965;15:42–52.

2. 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.
3. Borowsld K., Maatsch I. Technische Mitteilungen Krupp: *Forschungsberichte*. 1964;22:63–64.
4. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я. К вопросу горячего моделирования кислородно-конвертерного процесса. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1978;4:40–46.
5. Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. *Сравнительная характеристика состояния кислородно-конвертерного производства стали в России и за рубежом*. Москва: Элиз; 2000:64.
6. Буданов И.А., Устинов В.С. Перспективы развития металлургического производства в России. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2014;(5(1373)):3–12.
7. Баптизманский В.И., Охотский В.Б. *Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса*. Киев-Донецк: Вища школа. 1981:83.
8. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. *Теория продувки сталеплавильной ванны*. Москва: Металлургия. 1974:495.
9. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Разработка наконечников двух контурных фурм для кислородных конвертеров. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1995;12:13–17.

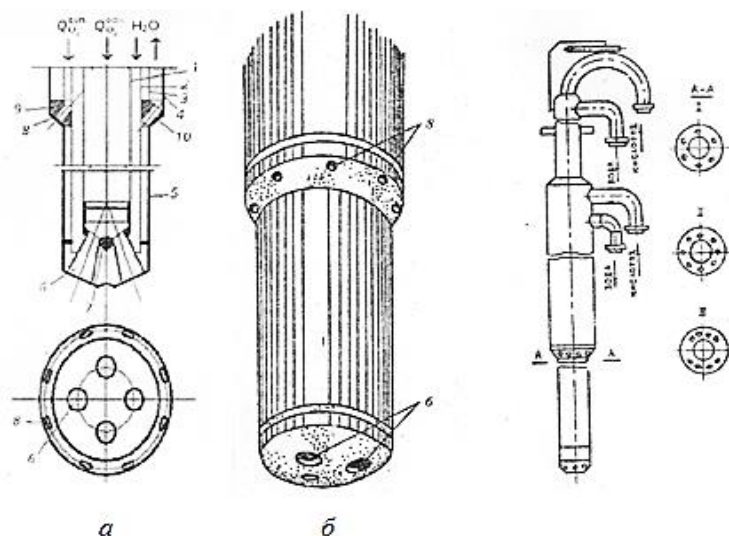


Рис. 3. Схема конструкции (а) и общий вид (б) двухъярусной фурмы:

- 1 – внутренняя труба; 2, 3 – промежуточные трубы; 4, 5 – наружные трубы; 6 – основные сопла Лавала; 7 – наконечник фурмы; 8 – сопла для дожигания оксида CO; 9 – верхний сопловый блок; 10 – проточки для прохода воды
- Fig. 3. Design diagram (a) and general view (b) of a two-tier tuyere:
- 1 – inner tube; 2, 3 – intermediate tubes; 4, 5 – outer tubes; 6 – main Laval nozzles; 7 – tuyere tip; 8 – nozzles for CO afterburning; 9 – upper nozzle block; 10 – grooves for water passage

10. 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.
11. Brun L.C. Overcapacity in Steel: China's Role in Global Problem. Center of Globalization, Governance & Competitiveness, Duke University; 2016:54
12. Yusupkhodjayev A.A. *Theory Waste Free Technology on the Ferrous Metallurgy*. Tashkent: TSTU; 2017:4
13. Chong Y.T., Teo K.M., Tang L.C. A lifecycle-based sustainability indicator framework for waste-to-energy systems and a proposed metric of sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56:797–809.
14. Su F., Lampinen H.-O., Robinson R. Recycling of sludge and dust to the BOF converter by cold bonded pelletizing. *ISIJ International*. 2004;44(4):770–776.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.770>
15. Matsubae-Yokoyama K., Kubo H., Nagasaka T. Recycling effects of residual slag after magnetic separation for phosphorus recovery from hot metal dephosphorization slag. *ISIJ International*. 2009;95(3):306–312.
16. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Исследование взаимодействия кислородных струй с отходящими конвертерными газами. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1996;10:5–9.
17. Марков Б.Л. *Физическое моделирование в металлургии*. Москва: Металлургия. 1984:120.
18. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Условия подобия при высокотемпературном моделировании конвертерных процессов. Аэрогидродинамическое подобие. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1997;8:26–31.
19. Ляхтер В.М., Прудовский А.М. *Гидравлическое моделирование*. Москва: Энергоатомиздат. 1984:292.
20. Чернятевич А.Г. Высокотемпературное моделирование кислородно-конвертерного процесса. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991;12:16–18.
21. Баптизманский В.И., Меджибожский М.Я., Охотский В.Б. *Конвертерные процессы производства стали*. Киев-Донецк: Вища школа. 1984:344.
22. Охотский В.Б., Чернятевич А.Г. Модель процесса рафинирования металла при продувке его кислородом сверху. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1972;10:61–64.
23. Сизов А.М. *Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах*. Москва: Металлургия. 1987:256.
24. Охотский В.Б., Баптизманский В.И., Просвиринов К.С., Щедрин Г.А. Строение реакционной зоны при продувке металла кислородом. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1973;8:50–53.
25. 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.
26. Зарвин Е. Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И. Наблюдение через прозрачную стенку за поведением конвертерной ванны при продувке. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1975;2:37–42.
27. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я., Борисов Ю.Н. Макрокартина физических явлений в реакционной зоне кислородного конвертера при продувке многосопловыми фурмами. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1977;12:61–65.
28. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я., Борисов Ю.Н., Волович М.И. О механизме образования выбросов из кислородного конвертера с верхней продувкой. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1976;10:54–59.
29. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Экспериментальное изучение параметров реакционной зоны конвертерной ванны в условиях комбинированной продувки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991;6:17–24.
30. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. О повышении эффективности продувки конвертерной ванны с дожиганием отходящих газов в полости конвертера. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1996;2:1–5.
31. 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;4:25–30.
32. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Экспериментальное изучение параметров реакционной зоны конвертерной ванны в условиях комбинированной продувки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991;6:17–24.
33. Разработка и создание испытательного полигона по изучению конвертерных процессов. Отчет по НИР. Сибирский металлургический институт (СМИ). Руководитель Протопопов Е.В. Инв. № 02920005710. Новокузнецк. 1991:64.

REFERENCES

1. Kootts T., Berens K., Maas G., Baumgarten P. Some questions of the theory of the oxygen-converter process. Discussion. *Chernye metal-ly*. 1965;15:42–52. (In Russ.).
2. Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I., Nikitin Yu.P., Doroshenko V.A. Study of the process of purging a converter bath using photo and film photography. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1974;12:33–37. (In Russ.).
3. Borowsld K., Maatsch I. *Technische Mitteilungen Krupp: Forschungsberichte*. 1964; 22:63, 64.
4. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya. On the issue of hot modeling of the oxygen-converter process. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 1978;4:40–46. (In Russ.).
5. Lyakishev N.P., Shalimov A.G. *Comparative characteristics of the state of oxygen converter steel production in Russia and abroad*. Moscow: Eliz; 2000:64. (In Russ.).
6. Budanov I.A., Ustinov V.S. Prospects for development of metallurgical production in Russia. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2014;(5(1373)):3–12. (In Russ.).
7. Baptizmskii V.I., Okhotskii V.B. *Physico-chemical principles of the oxygen converter process*. Kiev–Donetsk: Vishcha shkola. 1981:83. (In Russ.).
8. Yavoiskii V.I., Dorofeev G.A., Povkh I.L. *Theory of steel bath blowing*. Moscow: Metallurgiya. 1974:495. (In Russ.).
9. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Development of tips for two contour tuyeres for oxygen converters. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 1995;12:13–17. (In Russ.).
10. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. Investigation of chemical and temperature gradients in a converter bath using high-temperature modeling. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 1997;10:20–24. (In Russ.).
11. Brun L.C. Overcapacity in Steel: China's Role in Global Problem. Center of Globalization, Governance & Competitiveness, Duke University; 2016:54
12. Yusupkhodjayev A.A. *Theory Waste Free Technology on the Ferrous Metallurgy*. Tashkent: TSTU; 2017:4
13. Chong Y.T., Teo K.M., Tang L.C. A lifecycle-based sustainability indicator framework for waste-to-energy systems and a proposed metric of sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56:797–809.
14. Su F., Lampinen H.-O., Robinson R. Recycling of sludge and dust to the BOF converter by cold bonded pelletizing. *ISIJ International*. 2004;44(4):770–776.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.770>
15. Matsubae-Yokoyama K., Kubo H., Nagasaka T. Recycling effects of residual slag after magnetic separation for phosphorus recovery from hot metal dephosphorization slag. *ISIJ International*. 2009;95(3):306–312.
16. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Study of the interaction of oxygen jets with converter exhaust gases. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1996;10:5–9. (In Russ.).
17. Markov B.L. *Physical modeling in metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1984:120. (In Russ.).
18. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Similarity conditions in high-temperature modeling of converter processes. Aerohydrodynamic similarity. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1997;8:26–31. (In Russ.).
19. Lyakhter V.M., Prudovskii A.M. *Hydraulic modeling*. Moscow: Energoatomizdat. 1984:292. (In Russ.).
20. Chernyatevich A.G. High-temperature modeling of the oxygen-converter process. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1991;12:16–18. (In Russ.).
21. Baptizmskii V.I., Medzhibozhskii M.Ya., Okhotskii V.B. *Converter processes for steel production*. Kiev–Donetsk: Vishcha shkola. 1984:344. (In Russ.).
22. Okhotskii V.B., Chernyatevich A.G. Model of the process of metal refining by blowing oxygen from above. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1972;10:61–64. (In Russ.).
23. Sizov A.M. *Gas dynamics and heat transfer of gas jets in metallurgical processes*. Moscow: Metallurgiya. 1987:256. (In Russ.).
24. Okhotskii V.B., Baptizmskii V.I., Prosvirin K.S., Shchedrin G.A. The structure of the reaction zone when blowing metal with oxygen. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1973;8:50–53. (In Russ.).
25. Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I., Nikitin Yu.P., Doroshenko V.A. Study of the process of purging a converter bath using photo-film shooting. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1974;12:33–37. (In Russ.).
26. Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I. Observation through a transparent wall of the behavior of the converter bath during blowing. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1975;2:37–42. (In Russ.).
27. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya., Borisov Yu.N. Macro picture of physical phenomena in the reaction zone of an oxygen converter during blowing with multi-nozzle tuyeres. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1977;12:61–65. (In Russ.).

28. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya., Borisov Yu.N., Volovich M.I. On the mechanism of emission formation from a top-blown oxygen converter. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1976;10:54–59. (In Russ.).
29. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Experimental study of the parameters of the reaction zone of the converter bath under combined blowing conditions. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 1991;6:17–24. (In Russ.).
30. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. On increasing the efficiency of converter bath blow-down with afterburning of exhaust gases in the converter cavity. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 1996;2:1–5.
31. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V., Ganzer L.A. On some features of oxidation of impurities in the converter bath during combined blowing. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 1987;4:25–30.
32. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Experimental study of the parameters of the reaction zone of the converter bath under combined blowing conditions. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 1991; 6:17–24.
33. Development and creation of a test site for studying converter processes. Research report. Siberian Metallurgical Institute (SMI). Supervisor Protopopov E.V. Inv. No. 02920005710. Novokuznetsk. 1991:64.

Сведения об авторах:

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: protopopov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-7554-2168
SPIN-код: 9775-0226

Александр Александрович Уманский, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: umanskiy_aa@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-4403-9006
SPIN-код: 2374-4553

Евгений Анатольевич Беленецкий, магистрант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: info@vpk-oil.ru

Сергей Сергеевич Фатьянов, магистрант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Сергей Александрович Полежаев, магистрант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Екатерина Михайловна Запольская, к.т.н., с.н.с. лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8098-5895
SPIN-код: 7302-2751

Information about the authors:

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University
E-mail: protopopov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-7554-2168
SPIN-код: 9775-0226

Aleksandr A. Umanskii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University
E-mail: umanskii@bk.ru
ORCID: 0000-0003-4403-9006
SPIN-код: 2374-4553

Evgeny A. Belenetskii, Master's Student at the Department of Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University
E-mail: info@vpk-oil.ru

Sergey S. Fat'yanov, Master's Student at the Department of Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

Sergey A. Polezhaev, Master's Student at the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

Ekaterina M. Zapolskaya, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University
Email: beloglazova-ekat@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8098-5895
SPIN-код: 7302-2751

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 01.04.2025
 После доработки 23.04.2025
 Принята к публикации 28.04.2025

Received 01.04.2025
 Revised 23.04.2025
 Accepted 28.04.2025

Оригинальная статья

УДК 004.032.26:66.017

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-85-91

**РАСПОЗНАВАНИЕ ДЕФЕКТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

© 2025 г. В. А. Кузнецова¹, А. В. Маркидонов^{1, 2}

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

²Кузбасский гуманитарно-педагогический институт Кемеровского государственного университета (Россия, 654027, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Циолковского, 23)

Аннотация. В связи с увеличением требований к качеству продукции в металлургической и машиностроительной промышленности возникает необходимость внедрения современных технологий для автоматического контроля качества. Поверхностные дефекты металлических изделий (трещины, царапины и включения) напрямую влияют на надежность и долговечность продукции. Традиционные методы визуального и оптического контроля требуют значительных временных и трудовых затрат, подвержены влиянию человеческого фактора и не всегда обеспечивают достаточную точность. В рамках исследования был проведен обзор современных публикаций, в которых рассматриваются подходы к автоматической классификации дефектов, а также обсуждаются возможности и ограничения архитектур нейронных сетей. Анализ источников позволил выявить тенденции развития в рассматриваемой области и обосновать выбор архитектуры модели. Предлагается подход к распознаванию дефектов на изображениях металлических поверхностей с использованием сверточных нейронных сетей. Разработана архитектура модели, включающая три сверточных слоя и полносвязные нейроны, оптимизированные с использованием функции активации ReLU, слоя Dropout и выходного слоя Softmax. Для обучения модели использовали открытый набор данных, содержащий 1800 черно-белых изображений с шестью различными типами дефектов. Точность классификации составила 95,83 %, а значение функции потерь – 0,0862. При проверке на тестовой выборке модель верно распознала 70 из 72 изображений. Проведенное исследование подтверждает эффективность нейронных сетей в задаче обнаружения визуальных дефектов. Представленная модель может быть использована в системах автоматизированного контроля качества и дополнительно адаптирована под различные промышленные условия. В дальнейшем планируется оптимизация архитектуры модели для повышения устойчивости к шумам и вариативности данных.

Ключевые слова: машинное обучение, дефекты металлических поверхностей, сверточная нейронная сеть, классификация изображений

Для цитирования: Кузнецова В.А., Маркидонов А.В. Распознавание дефектов на поверхности металла с использованием метода машинного обучения. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):85–91. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-85-91](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-85-91)

Original article

RECOGNITION OF DEFECTS ON THE METAL SURFACE USING MACHINE LEARNING

© 2025 V. A. Kuznetsova¹, A. V. Markidonov^{1, 2}

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

²Kuzbass Humanitarian Pedagogical Institute of Kemerovo State University (23 Tsiolkovsky Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654027, Russian Federation)

Abstract. Due to the increase in product quality requirements in the metallurgical and machine building industries, it is necessary to introduce modern technologies for automatic quality control. Surface defects of metal products (cracks, scratches and inclusions) directly affect the reliability and durability of products. Traditional methods of

visual and optical control require significant time and labor costs, are subject to the influence of the human factor and do not always provide sufficient accuracy. Within the framework of the study, a review of modern publications was conducted, which consider approaches to automatic defect classification, as well as discuss the possibilities and limitations of neural network architectures. The analysis of the sources made it possible to identify development trends in the field under consideration and justify the choice of the model architecture. An approach to the detection of defects in images of metal surfaces using convolutional neural networks is proposed. The architecture of the model has been developed, which includes three convolutional layers and fully connected neurons optimized using the ReLU activation function, the Dropout layer and the Softmax output layer. To train the model, we used an open dataset containing 1800 black and white images with six different types of defects. The classification accuracy was 95.83 %, and the value of the loss function was 0.0862. When tested on a test sample, the model correctly recognized 70 out of 72 images. The conducted research confirms the effectiveness of neural networks in the task of detecting visual defects. The presented model can be used in automated quality control systems and additionally adapted to various industrial conditions. In the future, optimization of the model architecture is planned to increase noise tolerance and data variability.

Keywords: machine learning, defects of metal surfaces, convolutional neural network, image classification

For citation: Kuznetsova V.A., Markidonov A.V. Recognition of defects on the metal surface using machine learning. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):85–91. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-85-91](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-85-91)

Введение

Обеспечение высокого качества металлических изделий на этапе производства требует своевременного и точного выявления дефектов поверхности, так как их наличие может существенно повлиять не только на внешний вид продукции, но и на ее прочность и надежность [1]. Поверхностные повреждения снижают безопасность использования изделий, в связи с этим контроль качества поверхности становится неотъемлемым этапом технологического процесса [2].

Традиционный метод ручного контроля отнимает много времени, а человеческая ошибка неизбежна, когда требуется проверка большого количества изделий [3]. В целях повышения эффективности контроля все чаще применяются автоматизированные системы оптического анализа [4]. Однако классические алгоритмы обработки изображений не всегда позволяют достоверно выявлять сложные или слабовыраженные дефекты на металлических поверхностях [5], что обуславливает необходимость внедрения более прогрессивных подходов (машинного зрения). Методы машинного обучения демонстрируют более высокую точность по сравнению с ручным контролем [6], способствуют снижению затрат, связанных с устранением последствий дефектов, а также позволяют сократить участие человека в процессе контроля [7].

Необходимость совершенствования систем контроля актуальна не только для металлургии и машиностроения, но и для других отраслей, например, при диагностике состояния железнодорожных путей. В настоящее время широко применяются методы ультразвукового и магнитного контроля рельсов, однако такие технологии требуют значительных временных и финансовых

ресурсов [8]. В работе [8] представлен подход, позволяющий автоматически проводить классификацию текущего изображения на основе заранее обученных образцов. Система продемонстрировала высокую эффективность, достигнув точности 94,9 % при сравнении с результатами ручной классификации изображений.

В последние годы все более популярным становится аддитивное производство, однако долговечность и надежность изготавливаемых компонентов зависят от своевременного обнаружения дефектов [9]. В этих условиях методы машинного обучения (нейронные сети) приобретают все большее значение как инструмент для прогнозирования свойств материалов и автоматического обнаружения дефектов благодаря их способности обрабатывать большие объемы данных и выявлять сложные зависимости между параметрами [10].

Согласно аналитическим данным, уже к 2023 г. технологии, основанные на нейросетевых моделях, были внедрены на более чем 50 % российских промышленных предприятий [11], что свидетельствует о высокой степени востребованности рассматриваемых подходов. Особенно эффективными оказались нейронные сети, обученные на изображениях поверхностей и способные распознавать различные формы повреждений. Например, в работе [12] описано использование глубоких сверточных нейронных сетей для обнаружения и классификации дефектов поверхности стали. Этот метод продемонстрировал 98,2 % точности, а среднее время выполнения оказалось быстрее, чем у других моделей.

Ранее научные исследования были ориентированы преимущественно на двумерные изде-

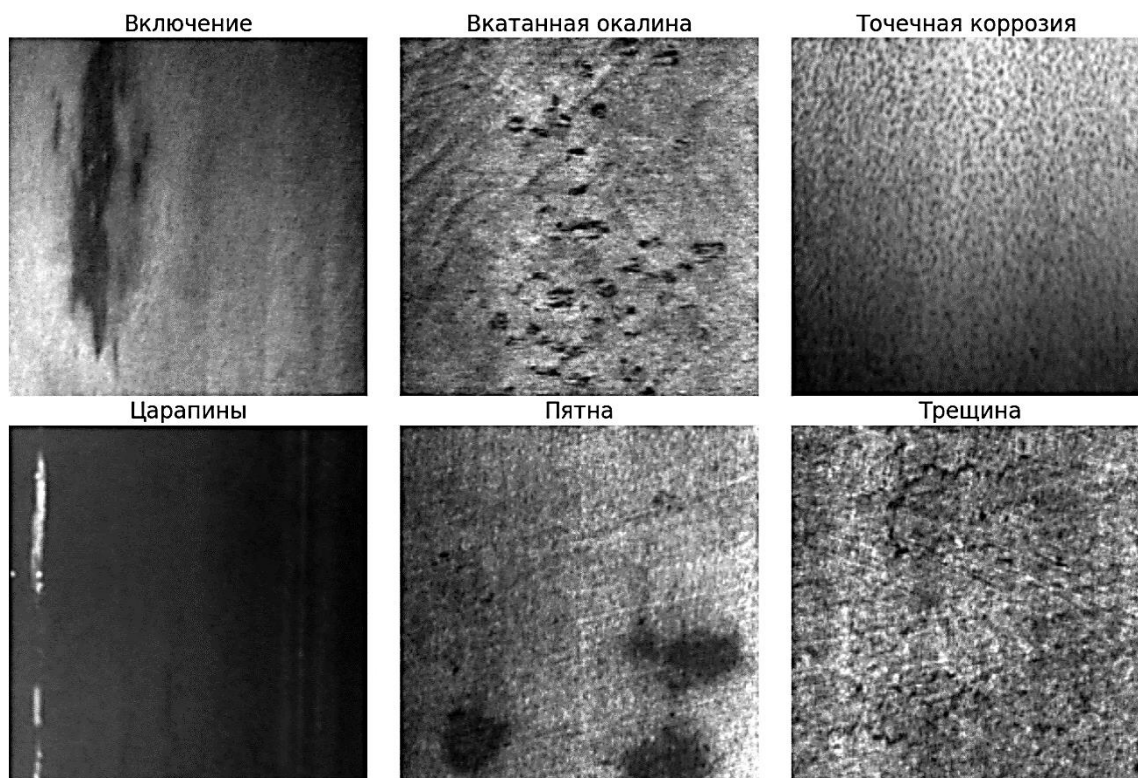


Рис. 1. Примеры изображений из исходного набора данных
Fig. 1. Example images from the original dataset

лия из листового металла, однако в последние годы наблюдается растущий интерес к анализу объектов с трехмерной формой. Например, в работе [13] был сформирован набор данных, полученный путем применения геометрических преобразований, отражающих параметры конструкции оборудования, используемого для визуального контроля дефектов на металлических поверхностях. Проведенные экспериментальные испытания показали, что разработанный алгоритм демонстрирует высокие показатели эффективности, приближенные к оптимальным.

Интеграция алгоритмов машинного обучения в процессы технической диагностики металлических изделий способна существенно повысить качество производимой продукции, снизить влияние человеческого фактора и повысить конкурентоспособность предприятий. Современные исследования подтверждают, что корректно построенные модели машинного обучения способны достигать производительности, сопоставимой с глубокими нейронными архитектурами [14]. Однако успешное применение подобных подходов требует внимательного подбора и тонкой настройки моделей с учетом специфики решаемой задачи и характеристик доступных данных [15].

Целью настоящей работы является разработка программной реализации модели на основе сверточных нейронных сетей, предназначенной для распознавания и классификации дефектов на поверхности металла.

Методы и принципы исследования

В ходе разработки программного обеспечения были использованы среда программирования Python и облачная платформа Google Colab, предоставляющая ресурсы для выполнения вычислений и взаимодействия с данными. Обучение и тестирование модели происходило с помощью библиотеки Keras. В качестве исходных данных применялся набор изображений, полученный с платформы Kaggle [16]. Этот датасет охватывает шесть категорий характерных дефектов поверхности металлических изделий, каждая из которых оказывает значительное влияние на прочность и качество металлической продукции.

База данных включает в себя 1800 черно-белых изображений по 300 изображений на каждый тип дефекта (включение, вкатанная окалина, точечная коррозия, царапины, пятна, трещины) (рис. 1).

Для корректной оценки качества обучения исходный набор данных был разделен на три части: обучающую, валидационную и тестовую выборки. Обучающая выборка содержит по 276 изображений каждого класса, что позволяет модели выявить ключевые закономерности и особенности, характерные для каждого типа дефекта. Валидационная выборка, включающая по 12 изображений на класс, применяется для настройки гиперпараметров модели и предотв-

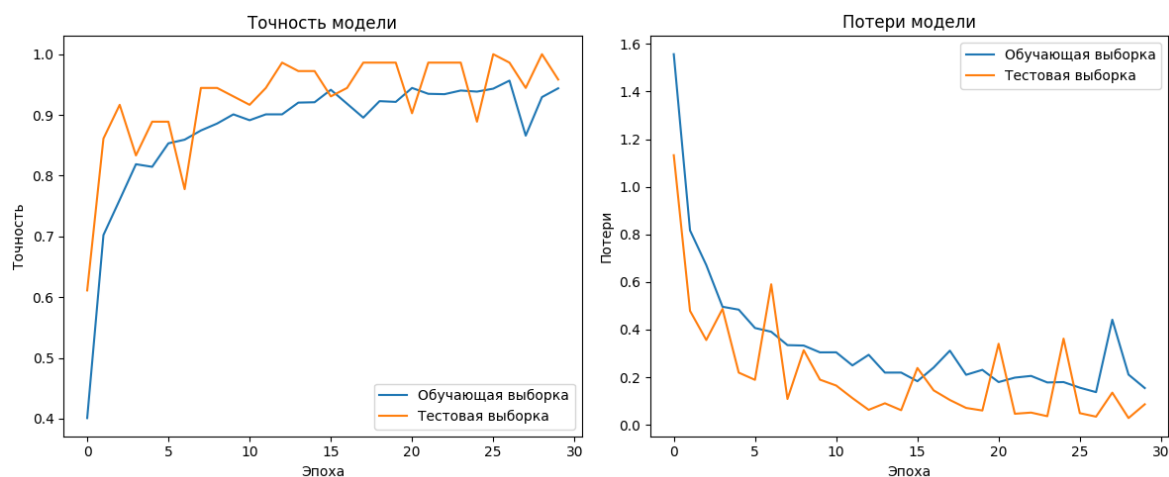


Рис. 2. Результаты обучения и тестирования модели
Fig. 2. Results of training and testing the model

ращения переобучения. Оценка итоговой эффективности классификатора проводится на тестовой выборке, также включающей по 12 изображений для каждой категории дефектов.

Разработанная архитектура нейронной сети для задачи классификации дефектов на металлических поверхностях основана на комбинации сверточных и полносвязных слоев, адаптированных для анализа изображений [17]. Модель состоит из трех сверточных слоев, содержащих 32, 64 и 128 фильтров размером 2×2 , в каждом из блоков используется функция активации ReLU [18]. Эти слои отвечают за извлечение и иерархическое представление признаков, содержащихся во входных изображениях.

Для снижения пространственного разрешения признаков карт и уменьшения вычислительной сложности, после каждого сверточного слоя применяется слой подвыборки (Max Pooling) с размером окна 2×2 , что также способствует снижению вероятности переобучения. Полученные двумерные карты признаков подвергаются операции выравнивания (Flatten), преобразующей их в одномерный вектор, пригодный для обработки полносвязными слоями [19].

В полносвязной части архитектуры используется Dense-слой с 256 нейронами и функцией активации ReLU, которые обеспечивают обучение сложных представлений признаков. Для уменьшения риска переобучения добавлен слой Dropout с коэффициентом 0,2, временно деактивирующий 20 % нейронов во время обучения [20]. Последний полносвязный слой содержит шесть нейронов с функцией активации Softmax, что позволяет модели формировать вероятностное распределение по шести классам выявляемых дефектов.

Обучение модели осуществляли с использованием оптимизатора Adam, который характеризу-

ется высокой эффективностью и способностью к адаптивной настройке параметров в процессе обучения. Полный цикл обучения охватывал 30 эпох, что обеспечило достаточную сходимость модели для решения задачи классификации.

Результаты и обсуждение

По результатам обучения разработанной модели были получены следующие ключевые показатели: значение функции потерь составило 0,0862, достигнутая точность классификации – 95,83 %. Эти значения свидетельствуют о высокой способности модели к обобщению. Высокая точность указывает на то, что модель успешно распознает и классифицирует большинство входных изображений, включая те, которые не использовали в процессе обучения.

Сопоставление показателей точности на обучающей и тестовой выборках позволяет утверждать, что модель не склонна к переобучению, она извлекает устойчивые паттерны, характерные для различных категорий дефектов. Это подтверждает ее способность к переносу знаний на новые примеры, что является важным требованием при решении задач промышленной диагностики.

На рис. 2 представлены графики изменения точности и значения функции потерь в зависимости от номера эпохи обучения. Анализ этих зависимостей позволяет визуально оценить динамику процесса обучения и зафиксировать момент сходимости модели.

Более детальный анализ результатов на тестовой выборке показал, что из 72 изображений модель правильно классифицировала 70, допустив лишь две ошибки. Это соответствует уровню точности 97 % для конкретной тестовой выборки и дополнительно подтверждает стабильность работы модели при распознавании различных типов дефектов.

Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность построенной архитектуры. В рамках дальнейших исследований планируется доработка архитектуры с целью снижения значения функции потерь и повышения общей точности модели.

Выводы

Разработана и реализована модель на основе сверточной нейронной сети для распознавания дефектов на поверхности металлических изделий. Проведенное обучение и последующее тестирование модели показали ее высокую эффективность: достигнута точность классификации 95,83 % при значении функции потерь 0,0862. При проверке на тестовой выборке из 72 изображений модель допустила лишь две ошибки, что соответствует точности 97 %. Эти показатели подчеркивают эффективность модели в рассматриваемой задаче, демонстрируя ее способность классифицировать изображения дефектов поверхности металла.

Результаты исследования свидетельствуют о целесообразности применения методов машинного обучения, в частности нейронных сетей, для решения задач визуального контроля качества в металлургической промышленности.

В дальнейшем планируется проведение оптимизации архитектуры модели, позволяющее эффективно адаптировать ее к условиям реального производственного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang Y., Yu T., Wan K., Yuan J. Detection and classification of metal workpiece surface defects based on machine vision. *2021 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*. 2021:983–987. <https://doi.org/10.1109/AEECA52519.2021.9574344>
2. Bai J., Wu D., Shelley T., Schubel P., Twine D., Russell J., Zeng X., Zhang J. A comprehensive survey on machine learning driven material defect detection: challenges, solutions, and future prospects. *ACM Computing Surveys*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.07880>
3. Zhou C., Lu Z., Lv Z. et al. Metal surface defect detection based on improved YOLOv5. *Scientific Reports*. 2023;13:20803. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47716-2>
4. Chen S., Zhou F., Gao G., Ge X., Wang R. Unleashing the power of AI in detecting metal surface defects: an optimized YOLOv7-tiny model approach. *PeerJ. Computer science*. 2024;10:e1727. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1727>
5. Huang Y.C., Hung K.C., Lin J.C. Automated machine learning system for defect detection on cylindrical metal surfaces. *Sensors*. 2022;22(24):9783. <https://doi.org/10.3390/s22249783>
6. Балеев И.А., Земцов А.Н., Зыбин М.И., Смирнов В.А. Распознавание дефектов на металлических сплавах с помощью алгоритмов компьютерного зрения OpenCV. *Инженерный вестник Дона*. 2021;3(75):78–87.
7. Погадаева Е.Ю. Распознавание дефектов сварных соединений по фотоизображению для проведения визуального контроля. *Молодой ученый*. 2020;43(333):5–9.
8. Румановский И.Г., Калинин Н. А., Никитин Н.А. Применение нейросетевых технологий для дефектоскопии железнодорожных путей. *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2023; 4(71):25–40.
9. Dean K. Argonne scientists use AI to detect hidden defects in stainless steel. *Nuclear News*, 2025. URL: <https://www.ans.org/news/article-6706/argonne-scientists-use-ai-to-detect-hidden-defects-in-stainless-steel>. (Дата обращения: 10.04.2025).
10. Панова В.С., Кузнецова В.А., Панченко И.А. Применение нейронных сетей для прогнозирования свойств высокоэнтропийных сплавов. В кн.: *Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы: Сборник трудов открытой школы-конференции стран СНГ*. Уфимский университет науки и технологий. 2024:154.
11. Искусственный интеллект в металлургии: как его используют для обнаружения дефектов. 2024. URL: <https://indpages.ru/prom/iskusstvennyj-intellekt-v-metallurgii-kak-ego-ispolzuyut-dlya-obnaruzheniya-defektov/> (Дата обращения: 10.04.2025).
12. Wang S., Xia X., Ye L., Yang B. Automatic detection and classification of steel surface defect using deep convolutional neural networks. *Metals*. 2021;11(3):388. <https://doi.org/10.3390/met11030388>
13. Suh S. Optimal surface defect detector design based on deep learning for 3D geometry. *Scientific Reports*. 2025;15:5527. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88112-2>
14. Keshinro B. Image detection and classification: a machine learning approach. 2022. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4281011>
15. Рыбаков К.М., Хамитов Р.М. Проблемы поверхностной дефектоскопии металлов с использованием машинного обучения и пути их решения. *International Journal of Advanced Studies*. 2024; 14(1):196–204.

- <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-1-289>
16. Metal Surface Defects Dataset. Kaggle. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/fantacher/neu-metal-surface-defects-data/data?select=NEU+Metal+Surface+Defects+Data> (Дата обращения: 25.03.2025).
 17. Lv Q., Zhang S., Wang Y. Deep Learning Model of Image Classification Using Machine Learning. *Advances in Multimedia*. 2022; 3351256. <https://doi.org/10.1155/2022/3351256>
 18. Pilyay A. I. Detection of defects in building materials using artificial intelligence systems. *Construction and Architecture*. 2023;11(1):20. <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2022-11-1-20-20>
 19. Cherkasov N., Ivanov S., Ivanov M., Ulanov A. Detection of defects in welded butt joints based on laser scanning: neural networks approach. In: *International Ural conference on electrical power engineering (UralCon)*. 2023: 775–779. <https://doi.org/10.1109/UralCon59258.2023.10291060>
 20. Al-Mamun A.M., Hossain M.R., Sharmin M.M. Detection and classification of metal surface defects using lite convolutional neural network (LCNN). *Material Science & Engineering International Journal*. 2024; 8(3): 72–76. <https://doi.org/10.15406/mseij.2024.08.00239>
- ### REFERENCES
1. Huang Y., Yu T., Wan K., Yuan J. Detection and classification of metal workpiece surface defects based on machine vision. 2021 *IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*. 2021: 983–987. <https://doi.org/10.1109/AEECA52519.2021.9574344>
 2. Bai J., Wu D., Shelley T., Schubel P., Twine D., Russell J., Zeng X., Zhang J. A comprehensive survey on machine learning driven material defect detection: challenges, solutions, and future prospects. *ACM Computing Surveys*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.07880>
 3. Zhou C., Lu Z., Lv Z. et al. Metal surface defect detection based on improved YOLOv5. *Scientific Reports*. 2023;13:20803. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47716-2>
 4. Chen S., Zhou F., Gao G., Ge X., Wang R. Unleashing the power of AI in detecting metal surface defects: an optimized YOLOv7-tiny model approach. *PeerJ. Computer science*. 2024;10:e1727. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1727>
 5. Huang Y.C., Hung K.C., Lin J.C. Automated machine learning system for defect detection on cylindrical metal surfaces. *Sensors*. 2022;22(24):9783. <https://doi.org/10.3390/s22249783>
 6. Baleev I.A., Zemtsov A.N., Zybin M.I., Smirnov V.A. Recognizing defects in metal alloys using OpenCV computer vision algorithms. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2021; 3 (75):78–87. (In Russ.).
 7. Pogadaeva E.Yu. Recognition of welded joint defects using a photographic image for visual inspection. *Molodoi ucheny*. 2020; 43(333):5–9. (In Russ.).
 8. Rumanovskii I.G., Kalinnikov N. A., Nikitin N.A. Application of neural network technologies for flaw detection of railway tracks. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2023; 4(71):25–40. (In Russ.).
 9. Dean K. Argonne scientists use AI to detect hidden defects in stainless steel. *Nuclear News*, 2025. URL: <https://www.ans.org/news/article-6706/argonne-scientists-use-ai-to-detect-hidden-defects-in-stainless-steel>. (Дата обращения: 10.04.2025).
 10. Panova V.S., Kuznetsova V.A., Panchenko I.A. Application of neural networks for predicting the properties of high-entropy alloys. In: *Design Ultrafine-grained and nanostructured materials: Collection of works of the open school-conference of the CIS countries*. Ufa University of Science and Technology. 2024:154. (In Russ.).
 11. *Artificial Intelligence in Metallurgy: How It Is Used to Detect Defects*. 2024. (In Russ.). URL: <https://indpages.ru/prom/iskusstvennyj-intellekt-v-metallurgii-kak-ego-ispolzuyut-dlya-obnaruzheniya-defektov>.
 12. Wang S., Xia X., Ye L., Yang B. Automatic detection and classification of steel surface defect using deep convolutional neural networks. *Metals*. 2021;11(3):388. <https://doi.org/10.3390/met11030388>
 13. Suh S. Optimal surface defect detector design based on deep learning for 3D geometry. *Scientific Reports*. 2025;15:5527. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88112-2>
 14. Keshinro B. Image detection and classification: a machine learning approach. 2022. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4281011>
 15. Rybakov K.M., Khamitov R.M. Problems of surface flaw detection of metals using machine learning and ways to solve them. *International Journal of Advanced Studies*. 2024; 14(1):196–204. (In Russ.). <https://doi.org/10.12731/2227-930X-2024-14-1-289>
 16. Metal Surface Defects Dataset. Kaggle. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/fantacher/neu>

-metal-surface-defects-data/data?select=NEU+Metal+Surface+Defects+Data (Дата обращения: 25.03.2025).

17. Lv Q., Zhang S., Wang Y. Deep Learning Model of Image Classification Using Machine Learning. *Advances in Multimedia*. 2022; 3351256.
<https://doi.org/10.1155/2022/3351256>
18. Pilyay A. I. Detection of defects in building materials using artificial intelligence systems. *Construction and Architecture*. 2023;11(1):20.
<https://doi.org/10.29039/2308-0191-2022-11-1-20-20>
19. Cherkasov N., Ivanov S., Ivanov M., Ulanov A. Detection of defects in welded butt joints based on laser scanning: neural networks approach. In: *International Ural conference on electrical power engineering (UralCon)*. 2023:775–779.
<https://doi.org/10.1109/UralCon59258.2023.10291060>
20. Al-Mamun A.M., Hossain M.R., Sharmin M.M. Detection and classification of metal surface defects using lite convolutional neural network (LCNN). *Material Science & Engineering International Journal*. 2024; 8(3): 72–76.
<https://doi.org/10.15406/mseij.2024.08.00239>

Сведения об авторах:

Валентина Анатольевна Кузнецова, обучающийся кафедры прикладной математики и информатики, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: valyakuz28@mail.ru

ORCID: 0009-0007-5845-4928

SPIN-код: 1866-2000

Артём Владимирович Маркидонов, д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники им. В.К. Буторина, Кузбасский гуманитарно-педагогический институт Кемеровского государственного университета; профессор кафедры прикладной математики и информатики, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: markidonov_artem@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4566-528X

SPIN-код: 3939-7328

Information about the authors:

Valentina A. Kuznetsova, student of the department of applied mathematics and computer science, Siberian State Industrial University

E-mail: valyakuz28@mail.ru

ORCID: 0009-0007-5845-4928

SPIN-код: 1866-2000

Artem V. Markidonov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Associate Professor, head of the department of ivt after. V.K. Butorin, Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of Kemerovo State University, professor of the department of applied mathematics and computer science, Siberian State Industrial University

E-mail: markidonov_artem@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4566-528X

SPIN-код: 3939-7328

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 18.04.2025

После доработки 28.05.2025

Принята к публикации 02.06.2025

Received 18.04.2025

Revised 28.05.2025

Accepted 02.06.2025

Оригинальная статья

УДК 669-1

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-92-101

ВЛИЯНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ПЕРЕПЛАВОМ ПЕРЕКРИСТАЛЛИЗОВАННЫХ СЛОЕВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ 15X25T

© 2025 г. А. П. Адылина, В. В. Овчинников, Т. М. Хунг, И. С. Кушнир

Московский политехнический университет (Россия, 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, 38)

Аннотация. Исследования технологического процесса селективного лазерного плавления (СЛП) показало значительное повышение качества синтезируемых объектов. При неправильном подборе технологических режимов при производстве изделий из жаропрочной стали могут возникнуть различные дефекты (поры, трещины, непроплавы), которые существенно снижают механические свойства материала. Устранение дефектов при селективном лазерном плавлении может быть достигнуто за счет оптимизации режима обработки лазерным лучом. В качестве такой стратегии обработки предложен повторный переплав сформированного валика или его термическая обработка лазерным излучением без расплавления металла при повторном проходе лазера без подачи порошка. Исследования влияния повторного лазерного переплава закристаллизовавшихся треков на микроструктуру и механические свойства деталей, изготовленных из порошков коррозионностойких и жаропрочных сталей, в настоящее время актуальны. Представлены исследования влияния режимов выращивания образцов жаропрочной стали марки 15X25T на структуру и механические свойства. Исследованы механические свойства, жаростойкость и коррозионная стойкость образцов стали марки 15X25T, полученных СЛП с дополнительным переплавом ранее перекристаллизованных треков. Показано, что полученный материал превосходит по комплексу механических свойств деформированный полуфабрикат из стали марки 15X25T. В образцах выявлены значительные остаточные напряжения (примерно 236 МПа). Использование дополнительного переплава позволяет понизить этот уровень до 108 МПа. Результаты микроструктурного анализа поверхностного слоя образцов стали марки 15X25T, полученных СЛП с дополнительным лазерным переплавом перекристаллизованных треков (мощность лазера 135 Вт и скорость сканирования 450 мм/с), выявили снижение шероховатости поверхности образца с 62 до 12 – 15 мкм.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, аддитивные технологии, жаропрочные стали, пористость, шероховатость, повторный переплав, механические свойства, остаточные напряжения

Для цитирования: Адылина А.П., Овчинников В.В., Хунг Т.М., Кушнир И.С. Влияние селективного лазерного плавления с дополнительным переплавом перекристаллизованных слоев на структуру и свойства жаропрочной стали 15X25T. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):92–101. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-92-101](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-92-101)

Original article

INFLUENCE OF SELECTIVE LASER MELTING WITH ADDITIONAL REMELTING OF RECRISTALLISED LAYERS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT STEEL 15X25T

© 2025 A. P. Adilina, V. V. Ovchinnikov, T. M. Hung, I. S. Kushnir

Moscow Polytechnic University (38 Big. Semenovskaya Str., Moscow, 107023, Russian Federation)

Abstract. Research into the selective laser melting (SLM) process has led to a significant improvement in the quality of synthesized objects. With incorrect selection of process modes during the production of heat-resistant steel products, various defects (pores, cracks, lack of fusion) may occur, which significantly reduce the mechanical properties of the material. Elimination of defects in selective laser melting can be achieved by optimizing the

laser beam processing mode. As such a processing strategy, it is proposed to re-melt the formed roller or heat-treat it with laser radiation without melting the metal during a second laser pass without powder feed. The study of the influence of repeated laser remelting of crystallized tracks on the microstructure and mechanical properties of parts made from powders of corrosion-resistant and heat-resistant steels is currently relevant. This article presents studies of the influence of growth modes of heat-resistant steel 15X25T samples on the structure and mechanical properties. The mechanical properties, heat resistance and corrosion resistance of 15Kh25T steel samples obtained by SLM with additional remelting of previously recrystallized tracks were investigated. It was shown that the obtained material surpasses the deformed semi-finished product made of 15Kh25T steel in a set of mechanical properties. Significant residual stresses at a level of 236 MPa were revealed in 15Kh25T steel samples. The use of additional remelting allows this level to be reduced to 108 MPa. The results of microstructural analysis of the surface layer of 15X25T steel samples obtained by SLM with additional laser remelting of recrystallized tracks (laser power 135 W and scanning speed 450 mm/s) revealed a decrease in the surface roughness of the sample R_z from 62 to 12 – 15 μm .

Keywords: selective laser melting, additive manufacturing, heat-resistant steels, porosity, roughness, remelting, mechanical properties, residual stresses

For citation: Adylina A.P., Ovchinnikov V.V., Hung T.M., Kushnir I.S. Influence of selective laser melting with additional remelting of recrystallized layers on the structure and properties of heat-resistant steel 15X25T. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):92–101. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-92-101](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-92-101)

Введение

Селективное лазерное плавление (СЛП) – это метод 3D-печати сложнопрофильных металлических изделий. Этот метод основан на выращивании микрослоев порошкового материала высокоэнергетическим лазерным излучением для послойного синтеза объекта по заданной программе.

Исследования технологического процесса селективного лазерного плавления (СЛП) привели к значительному повышению качества синтезируемых объектов, обусловленных снижением пористости до менее 1 %, уменьшению шероховатости поверхности изделий и утончению толщины стенок деталей до 300 мкм.

При неправильном подборе технологических режимов при производстве изделий из жаропрочной стали могут возникнуть различные дефекты (поры, трещины, непроплавы), которые существенно снижают механические свойства материала.

При быстром затвердевании расплава и попадании в него инертного газа внутри синтезированного изделия могут образовываться поры. Дефекты (непроплава) обычно возникают из-за недостаточной мощности лазера, что приводит к неполной глубине плавления и образованию пустот между слоями. Для устранения этого дефекта можно снизить толщину насыпного слоя порошка.

Термическое растрескивание (растрескивание при затвердевании) представляет собой процесс, который часто наблюдается на последних этапах быстрого охлаждения расплавленного металла. Такая структура обладает очень низкой прочностью.

Следует отметить, что детали, полученные методом селективного лазерного плавления, имеют высокую шероховатость поверхности, что снижает эксплуатационные свойства при работе в сборке.

Устранение пористости, трещин и снижение уровня остаточных напряжений при селективном лазерном плавлении может быть достигнуто за счет оптимизации режима обработки лазерным лучом. В качестве такой стратегии обработки предложен повторный переплав сформированного валика или его термическая обработка лазерным излучением без расплавления металла при повторном проходе лазера без подачи порошка.

Исследование влияния повторного лазерного переплава закристаллизовавшихся треков на микроструктуру и механические свойства деталей, изготовленных из порошков коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, в настоящее время актуальны.

Методы и принципы исследования

В исследовании были использованы порошки, полученные распылением аргоном расплава стали марки 15X25T. Для создания экспериментальных образцов была использована установка Concept Laser M2 от компании Concept Laser GmbH (Германия).

Для исследования использовали различные методики: растровая электронная микроскопия (РЭМ), компьютерная микротомография, дюротометрия, микродюротометрия, измерения механических свойств для более точного анализа материалов. Для изучения микроструктуры приме-

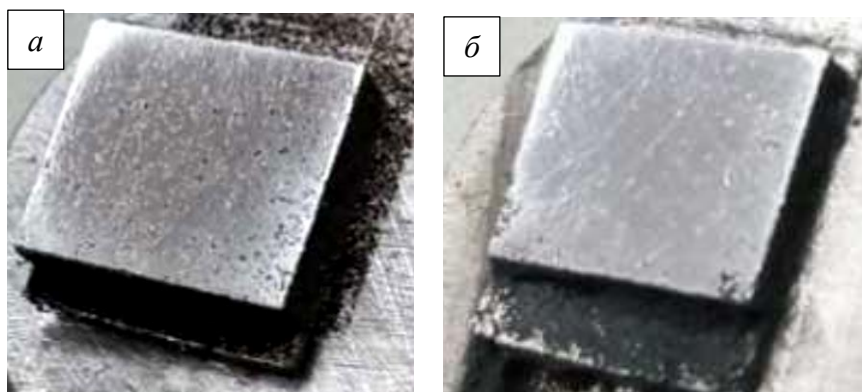


Рис. 1. Внешний вид образцов СЛП, синтезированных без (а) и с дополнительным переплавом (б) ранее перекристаллизованных треков стали марки 15Х25Т

Fig. 1. External appearance of SLM samples synthesized without (a) and with additional remelting (b) of previously recrystallized tracks of 15X25T steel

нялся оптический абберационный микроскоп Axio Observer Z1m.

Для проведения механических испытаний использовали универсальную сервогидравлическую систему Instron 8801 Dynacell (США).

Основные результаты

В процессе синтеза из частиц порошка стали марки 15Х25Т параметры сканирования лазера были настроены так, чтобы толщина слоя порошка составляла 30 мкм. В ходе исследований мощность лазера была установлена на уровне 180 Вт, параметры сканирования лазера варьировали в пределах от 500 до 800 мм/с. Эти интервалы были подобраны с целью предотвращения испарения или недостаточного плавления частиц порошка. Изготовлены образцы кубической формы со сторонами 10 мм, состоящие из 15 – 20 слоев.

В результате экспериментов было установлено, что сканирование порошковых образцов из стали марки 15Х25Т со скоростью в диапазоне от 350 до 450 мм/с приводит к короблению поверхности и появлению трещин из-за возникновения высоких термических напряжений. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, опубликованными в работах [1; 2].

Для оценки влияния дополнительного переплава на структуру и свойства образцов стали марки 15Х25Т были синтезированы образцы с дополнительным переплавом ранее сформированных валиков при мощности лазера 150 Вт и скорости сканирования 400 мм/с. На рис. 1 приведен внешний вид образцов, синтезированных без и с дополнительным переплавом ранее перекристаллизованных слоев.

Исследование оптических изображений, полученных со шлифованных поверхностей образцов, показали, что при увеличении скорости

сканирования достигается минимальная объемная пористость, которая уменьшается нелинейно при использовании указанных режимов. Минимальное значение этого параметра достигается при скорости сканирования 450 мм/с. Однако, следует отметить, что при увеличении скорости сканирования выше 750 мм/с на оптических изображениях шлифов поверхности полученных образцов появляются заметные артефакты в виде «непроплавов».

Использование дополнительного переплава ранее перекристаллизованных треков приводит к снижению объемной пористости во всем диапазоне скоростей сканирования. При увеличении скорости сканирования в диапазоне от 450 до 600 мм/с наблюдается уменьшение областей с дефектами в структуре (рис. 2). Это может быть обусловлено уменьшением удельной тепловой энергии при повышении скорости сканирования, что ведет к частичной переплавке порошка.

При изготовлении деталей по технологии СЛП возникают остаточные напряжения, которые могут ограничивать практическое применение этой технологии из-за деформации деталей или образования микротрещин. Большие остаточные напряжения могут негативно сказываться на механических свойствах изготовленных деталей. Дополнительный переплав ранее закристаллизовавшихся валиков способствует снижению уровня остаточных напряжений и деформаций.

В процессе нагрева остаточные напряжения могут быть уменьшены двумя способами [3]. Во-первых, путем пластической деформации, когда они превышают предел текучести материала. При превышении предела текучести материала происходит активация большого количества дислокаций, которые начинают перемещаться, вызывая быструю пластическую деформацию. Исследования показывают, что степень снижения остаточных напряжений через этот механизм

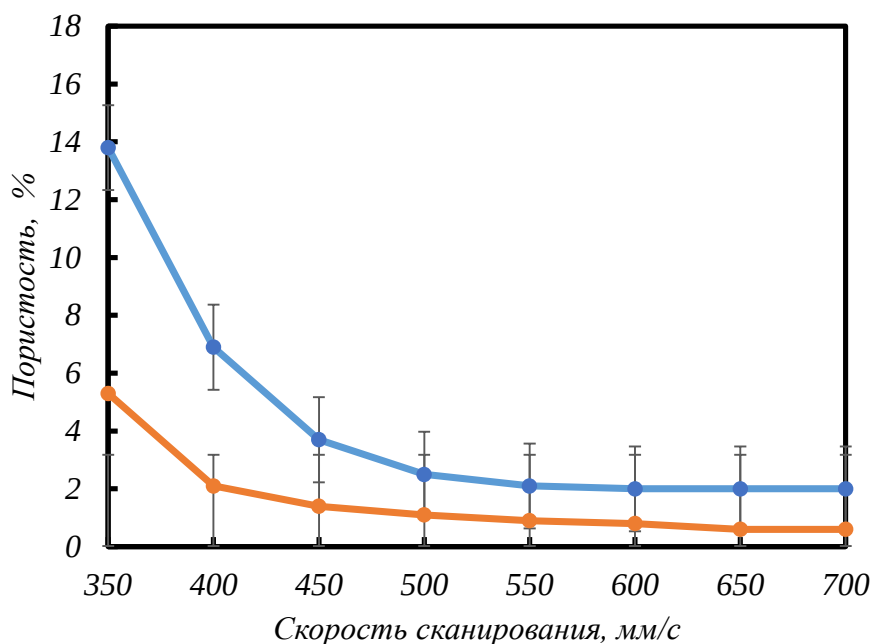


Рис. 2. Влияние скорости сканирования на пористость объемных образцов стали марки 15X25T при СЛП без (1) и с дополнительным переплавом перекристаллизованных треков (2)

Fig. 2. Effect of scanning speed on the porosity of bulk samples of 15X25T steel, during SLM without (1) and with additional remelting of recrystallized tracks (2)

зависит от температуры нагрева, а не от его продолжительности.

При напряжениях ниже предела текучести материала происходит явление ползучести. В этих условиях при определенных температурах ползучесть становится основным механизмом снижения напряжений.

В табл. 1 приведены значения остаточных напряжений, определенные в образцах стали марки 15X25T, выращенных с применением и без применения дополнительного переплава сформированных ранее валиков.

Применение дополнительного переплава ранее закристаллизовавшихся валиков при мощности

лазера 0,7 – 0,8 от мощности при синтезе образцов способствует снижению остаточных напряжений примерно в 2 раза (табл. 1).

Дополнительный переплав ранее перекристаллизованных треков способствует уменьшению шероховатости боковой поверхности образцов кубической формы из стали марки 15X25T. Так шероховатость R_z образцов, синтезированных при режиме сканирования 750 мм/с при мощности P излучения 180 Вт, составила 62 мкм. Повторный переплав ранее сформированных валиков при мощности излучения 135 Вт при скорости сканирования 450 мм/с позволил сократить величину R_z до 12 – 15 мкм.

Т а б л и ц а 1

Остаточные напряжения в синтезированных образцах стали марки 15X25T

Table 1. Residual stresses in synthesized samples of 15X25T steel

Вариант выращивания образцов	Изменение диаметра d_1 кольцевого образца после разреза, мм	Уровень остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, МПа
СЛП без дополнительного переплава	+0,25	236
СЛП с использованием дополнительного переплава перекристаллизованных треков	-0,20	108

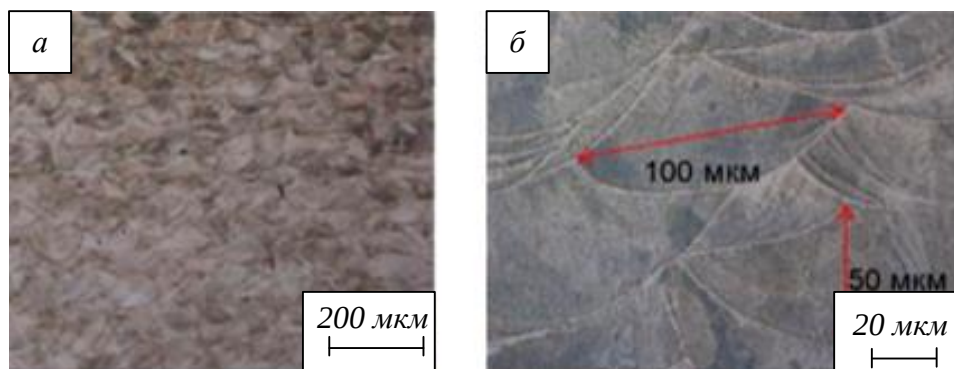


Рис. 3. Микроструктура стали марки 15X25T, полученной методом СЛП без дополнительного переплава
Fig. 3. Microstructure of 15X25T steel obtained by the SLM method without additional remelting

На микрофотографиях представлены продольные и поперечные сечения образца стали, на которых отчетливо видны отдельные зерна. Средний размер последних составляет около 95 мкм в плоскости XY и примерно 45 мкм в плоскости XZ (рис. 3). Ванны с расплавом различных размеров имеют поперечное сечение в виде дугообразных сегментов, которые формируют слоистую структуру образца.

В продольном сечении ванны с расплавленным материалом представлены эллиптическими треками, которые организованы в двух взаимно перпендикулярных направлениях, повторяющих путь лазера. Ванны с расплавом обладают неод-

нородной структурой, разделенной на мелкие ячейки кристаллизации.

Цилиндрический образец стали марки 15X25T в плоскостях XZ и XY , подвергнутый дополнительному переплаву ранее перекристаллизованных треков, имеет характерную микроструктуру, напоминающую чешуйки размером около 0,1 мм (рис. 4).

Структура СЛП образца стали марки 15X25T напоминает многопроходный сварной шов в поперечном сечении. Образование подобной структуры, имеющей дендритную форму, является результатом относительно медленного охлаждения расплавленного металла. В ходе

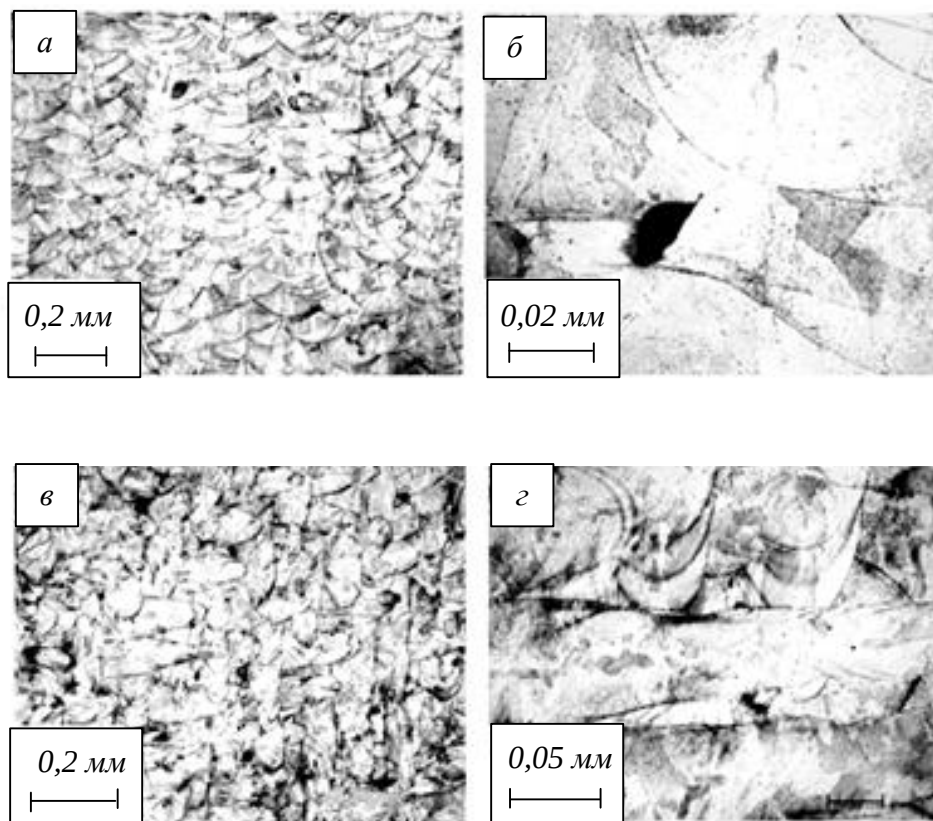


Рис. 4. Микроструктура кубического образца из стали марки 15X25T (ориентированы вдоль осей XZ (в, г) и XY (а, б))
Fig. 4. Microstructure of a cubic sample made of 15X25T steel (are oriented along the XZ (в, г) and XY (а, б) axes)

Механические свойства образцов стали марки 15X25T при нормальной температуре**Table 2. Mechanical properties of 15X25T steel samples at normal temperature**

Образец	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение ψ , %
СЛП без дополнительного переплава треков	440	18	40
СЛП с дополнительным переплавом треков	455	22	45
Компактный материал после отжига 730 – 770 °С	445	20	45

исследования стали марки 15X25T с использованием крупных увеличений было обнаружено (рис. 4, б), что структура чешуек является неоднородной и состоит из фрагментов, имеющих различную кристаллическую ориентацию.

В рамках проводимых исследований были получены результаты сравнительных механических испытаний образцов стали марки 15X25T, полученных по традиционной технологии прокатки и методом СЛП из порошка без и с дополнительным переплавом треков. Для сравнительных испытаний использовали образцы из прутков стали марки 15X25T после отжига 730 – 770°С с охлаждением на воздухе. В табл. 2 приведены сравнительные данные по механическим свойствам образцов при нормальной температуре.

В табл. 3 представлена сравнительная информация о механических свойствах образцов при нормальной и повышенной температуре. Механические характеристики образцов СЛП и прутков стали марки 15X25T, полученных по традиционной технологии, схожи. При этом для СЛП образцов, синтезированных с дополнительным переплавом перекристаллизованных треков, отмечается рост прочностных и пластических свойств.

Результаты испытаний на жаростойкость представлены в табл. 4. Показатель жаропроч-

ности у образцов, выращенные СЛП, превосходит по сравнению с прутками стали марки 15X25T.

Выводы

При селективном лазерном плавлении порошков стали марки 15X25T в синтезированном металле происходит формирование ячеистой структуры кристаллизации единичных треков, которая сходна со структурой компактной стали аналогичного состава, подвергнутой пластической деформации. Использование дополнительного переплава ранее перекристаллизованных треков в СЛП стали марки 15X25T приводит к снижению объемной пористости во всем диапазоне скоростей сканирования. Результаты механических испытаний образцов стали марки 15X25T, полученных методом СЛП, показывают, что предел прочности и ударная вязкость образцов примерно в 1,3 – 1,4 раза выше значений механических свойств образцов компактной закаленной стали. Выявлены значительные по величине остаточные напряжения на уровне 236 МПа. Использование дополнительного переплава позволяет понизить этот уровень до 108 МПа.

Результаты микроструктурного анализа поверхностного слоя образцов стали марки 15X25T, полученных СЛП с дополнительным лазерным

Механические свойства образцов стали марки 15X25T при высокой температуре**Table 3. Mechanical properties of steel samples grade 15X25T at high temperature**

Температура испытаний, °С	Значение параметров для прутка / СЛП образца с дополнительным переплавом валиков		
	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %
20	445/455	20/22	45/45
700	76/72	46/43	92/82
800	24/20	102/95	98/90
900	18/18	150/133	98/92
1000	11/10	148/135	100/95
1100	8/9	138/130	99/90

Жаростойкость образцов стали марки 15X25T**Table 4. Heat resistance of steel samples 15X25T**

Среда	Температура, °C	Длительность испытаний, ч	Глубина проникновения окислов (окалины), мм/год		Группа стойкости, балл
			Пруток	Образцы СЛП	
Воздух	850	200	0,174	0,162	6
Воздух	950	200	0,294	0,266	6
Воздух	1050	200	0,490	0,420	6
Чистый воздух	900	500	0,390	0,310	6
Чистый воздух + 1,5 % SO ₂	900	500	0,540	0,430	6

переплавом перекристаллизованных треков (мощность лазера 135 Вт и скорость сканирования 450 мм/с), выявили снижение шероховатости поверхности образца с 62 до 12 – 15 мкм.

Исследованы механические свойства, жаростойкость и коррозионная стойкость образцов стали марки 15X25T, полученных СЛП с дополнительным переплавом ранее перекристаллизованных треков. Показано, что полученный материал превосходит по комплексу механических свойств деформированный полуфабрикат из стали марки 15X25T.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапрыкина Н.А., Сапрыкин А.А. Влияние условий послойного лазерного спекания на качество спеченного поверхностного слоя из кобальтхроммолибденового порошка. В кн.: *Актуальные проблемы в машиностроении. Материалы первой Международной научно-практической конференции*. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2014:119–123.
2. Zhou X., Li K., Zhang D., Liu X., Ma J., Liu W., Shen Z., Textures formed in a CoCrMo alloy by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds* 2015;631:153–164. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.096>
3. Граф Б., Гоок С.Э., Гуменюк А.В., Ретмайер М. Комбинированные лазерные аддитивные технологии производства лопаток турбин сложной геометрической формы. *Глобальная ядерная безопасность*. 2016;3(20):34–42.
4. Sghaier T.A.M., Sahlaoui, Mabrouki T., Salem H., Rech J. Selective laser melting of stainless-steel a review of process, microstructure, mechanical properties and post-processing treatments. *International Journal of Material Forming*. 2023;16(4):1–12. <https://doi.org/10.1007/s12289-023-01769-w>
5. Nandhakumar R., Venkatesan K. A process parameters review on selective laser melting-based additive manufacturing of single and multi-material: microstructure, properties, and machinability aspects. *Materials Today Communications*. 2023;35(9-10). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105538>
6. Lu J., Zhuo L. Additive manufacturing of titanium alloys via selective laser melting: Fabrication, microstructure, post-processing, performance and prospect. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023;111(8). <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106110>
7. Song X., Zhang Y. Progress of high-entropy alloys prepared using selective laser melting. *Science China Materials*. 2023;66:4165–4181.
8. Chen X., Wen K., Mu W., Zhang Y., Shan Huang, Liu W. Effect of layer-by-layer laser remelting process on the microstructure and performance of selective laser melting 316L stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;128:2221–2236.
9. Bouabbou A., Vaudreuil S. Understanding laser-metal interaction in selective laser melting additive manufacturing through numerical modelling and simulation: a review. *Virtual and Physical Prototyping*. 2022;17:543–562. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2052488>
10. Khan, H.M., Waqar, S., Koç, E. Evolution of temperature and residual stress behavior in selective laser melting of 316L stainless steel across a cooling channel. *Rapid Prototyping Journal*. 2022;28(7):1272–1283. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2021-0237>
11. Zhang C., Zheng H., Yang L., Li Y., Jin J., Cao W., Yan Ch., and Sh Y. Mechanical responses of sheet-based gyroid-type triply periodic minimal surface lattice structures fabricated using selective laser melting. *Materials & Design*. 2022;214. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110407>
12. Zhai W., Zhou W., Zhu Z. Selective laser melting of 304L and 316L stainless steels: a comparative study of microstructures and mechanical properties. *Steel Research international*.

- 2022;93(7).
<https://doi.org/10.1002/srin.202100664>
13. Waqar S., Guo K., Sun J. Evolution of residual stress behavior in selective laser melting (SLM) of 316L stainless steel through preheating and in-situ re-scanning techniques. *Optics & Laser Technology*. 2022;149:107806. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107806>
 14. Uçak N., Çiçek A., Aslantaş K. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;80(9):414–457. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.023>
 15. Yao D., Wang J., Li M-P., Zhao T., Cai Y., An X., Zou, R., Zhang H., Fu H., Yang X., Zou Q. Segregation of 316L stainless steel powder during spreading in selective laser melting based additive manufacturing. *Powder Technology*. 2022;397:117096–117096. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117096>
 16. Gatões D., Alves R., Alves B., Vieira M.T. Selective Laser Melting and Mechanical Properties of Stainless Steels. *Materials*. 2022;15(21). <https://doi.org/10.3390/ma15217575>
 17. Галиновский А. Л., Филимонов А. С., Погалева Р.С., Свешников А.С., Кравченко И.Н., Орлов М.А. Исследование баз данных материалов для технологии селективного лазерного плавления. *Электromеталлургия*. 2022;3:18–27. EDN: TABTZE. <https://doi.org/10.31044/1684-5781-2022-0-3-18-27>
 18. Афанасьева Л. Е., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Шероховатость поверхности образцов нержавеющей стали, полученных по технологии селективного лазерного плавления. В кн.: *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2021;14:62–66. EDN: PTMGXO.
 19. То М.Х., Сафонов Е.В., Адылина А.П., Овчинников В.В. Механические свойства и микроструктура стали 12X18H10T, полученной методом селективного лазерного плавления. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2022;20(6):282–287. EDN: OAYGSJ. <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2022-20-6-282-287>
 20. Зельдович В.И., Хомская И.В., Хейфец А.Э., Абдуллина Д.Н. Структурные изменения при нагреве в аустенитной нержавеющей стали, полученной методом селективного лазерного плавления. *Физика металлов и металловедение*. 2022;123(9):971–977. EDN: KRARUS. <https://doi.org/10.31857/S0015323022090133>
 21. Кривилев М.Д., Харанжевский Е.В., Камаева Л.В., Закирова Р.М. Анализ уровня остаточных напряжений в компактных образцах из стали 316L, полученных методом селективного лазерного плавления. В кн.: *Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов: Сборник тезисов. Научно-технический семинар*. Москва, 25–27 октября 2022 г. Москва: Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», 2022:82. EDN: IZCBUI.

REFERENCES

1. Saprykina N.A., Saprykin A.A. The influence of layer-by-layer laser sintering conditions on the quality of the sintered surface layer of cobalt-chromium-molybdenum powder. In: *Current issues in mechanical engineering: Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU. 2014:119–123. (In Russ.).
2. Zhou X., Li K., Zhang D., Liu X., Ma J., Liu W., Shen Z., Textures formed in a CoCrMo alloy by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds* 2015; 631:153–164. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.01.096>
3. Graf B., Gook S.E., Gumenyuk A.V., Retmaier M. Combined laser additive technologies for the production of turbine blades of complex geometric shapes. *Global'naya yadernaya bezopasnost'*. 2016; 3(20):34–42. (In Russ.).
4. Sghaier T.A.M., Sahlaoui, Mabrouki T., Salem H., Rech J. Selective Laser Melting of Stainless-Steel A Review of Process, Microstructure, Mechanical Properties and Post-Processing treatments. *International Journal of Material Forming*. 2023;16(4):1–12. <https://doi.org/10.1007/s12289-023-01769-w>
5. Nandhakumar R., Venkatesan K. A process parameters review on Selective laser melting-based additive manufacturing of Single and Multi-Material: Microstructure, Properties, and machinability aspects. *Materials Today Communications*. 2023;35(9-10). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105538>
6. Lu J., Zhuo L. Additive manufacturing of titanium alloys via selective laser melting: Fabrication, microstructure, post-processing, performance and prospect. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023;111(8). <https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2023.106110>

7. Song X., Zhang Y. Progress of high-entropy alloys prepared using selective laser melting. *Science China Materials*. 2023;66:4165–4181.
8. Chen X., Wen K., Mu W., Zhang Y., Shan Huang, Liu W. Effect of layer-by-layer laser remelting process on the microstructure and performance of selective laser melting 316L stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;128:2221–2236.
9. Bouabbou A., Vaudreuil S. Understanding laser-metal interaction in selective laser melting additive manufacturing through numerical modelling and simulation: a review. *Virtual and Physical Prototyping*. 2022;17:543–562. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2052488>
10. Khan, H.M., Waqar, S., Koç, E. Evolution of temperature and residual stress behavior in selective laser melting of 316L stainless steel across a cooling channel. *Rapid Prototyping Journal*. 2022;28(7):1272–1283. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2021-0237>
11. Zhang C., Zheng H., Yang L., Li Y., Jin J., Cao W., Yan Ch., and Sh Y. Mechanical responses of sheet-based gyroid-type triply periodic minimal surface lattice structures fabricated using selective laser melting. *Materials & Design*. 2022;214. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110407>
12. Zhai W., Zhou W., Zhu Z. Selective Laser Melting of 304L and 316L Stainless Steels: A Comparative Study of Microstructures and Mechanical Properties. *Steel Research international*. 2022;93(7). <https://doi.org/10.1002/srin.202100664>
13. Waqar S., Guo K., Sun J. Evolution of residual stress behavior in selective laser melting (SLM) of 316L stainless steel through preheating and in-situ re-scanning techniques. *Optics & Laser Technology*. 2022;149:107806. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107806>
14. Uçak N., Çiçek A., Aslantaş K. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;80(9):414–457. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.023>
15. Yao D., Wang J., Li M-P., Zhao T., Cai Y., An X., Zou, R., Zhang H., Fu H., Yang X., Zou Q. Segregation of 316L stainless steel powder during spreading in selective laser melting based additive manufacturing. *Powder Technology*. 2022;397:117096–117096. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117096>
16. Gatões D., Alves R., Alves B., Vieira M.T. Selective Laser Melting and Mechanical Properties of Stainless Steels. *Materials*. 2022;15(21). <https://doi.org/10.3390/ma15217575>
17. Galinovskii A.L., Filimonov A.S., Rogalev R.S., Sveshnikov A.S., Kra-vchenko I.N., Orlov M.A. Research of materials databases for selective laser melting technology. *Elektrometallurgiya*. 2022;3:18–27. EDN: TABTZE. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-5781-2022-0-3-18-27>
18. Afanas'eva L. E., Izmailov V.V., Novoselova M.V. Surface roughness of stainless steel samples obtained by selective laser melting technology. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detalei tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2021;14:62–66. EDN: PTMGXO. (In Russ.).
19. To M.Kh., Safonov E.V., Adylina A.P., Ovchinnikov V.V. Mechanical properties and microstructure of 12X18N10T steel obtained by selective laser melting. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2022;20(6):282–287. EDN: OAYGSJ. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2022-20-6-282-287>
20. Zel'dovich V.I., Khomskaya I.V., Kheifets A.E., Abdullina D.N. Structural changes during heating in austenitic stainless steel produced by selective laser melting. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2022;123(9):971–977. EDN: KRARUS. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0015323022090133>
21. Krivilev M.D., Kharanzhevskii E.V., Kamaeva L.V., Zakirova R.M. Analysis of residual stress levels in compact 316L steel specimens produced by selective laser melting. In: *Bernstein Readings on Thermomechanical Processing of Metallic Materials: Collection of Abstracts. Scientific and Technical Seminar*. October 25–27, 2022. Moscow: Natsional'nyi issledovatel'skii tekhnologicheskii universitet «MISIS», 2022:82. EDN: IZCBUI. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Анна Петровна Адылина, к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация, метрология и сертификация», Московский политехнический университет

E-mail: dmitr1eva@mail.ru

ORCID: 0009-0008-6763-9278

SPIN-код: 4076-9283

Виктор Васильевич Овчинников, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение», Московский политехнический университет

E-mail: vikov1956@mail.ru

ORCID: 0000-0003-2948-2202

SPIN-код: 3367-9330

Иван Сергеевич Кушнир, студент, Московский политехнический университет

E-mail: kushn1r_ivan@mail.ru
ORCID: 0009-0002-5032-468X
SPIN-код: 3925-7441

То Мань Хунг, стажер, Московский политехнический университет
E-mail: manhhungxm@gmail.com
ORCID: 0009-0004-3987-313X

Information about the authors:

Anna P. Adylina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Standardization, Metrology and Certification, Moscow Polytechnic University
E-mail: dmitr1eva@mail.ru
ORCID: 0009-0008-6763-9278
SPIN-код: 4076-9283

Viktor V. Ovchinnikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Materials Science, Moscow Polytechnic University
E-mail: vikov1956@mail.ru
ORCID: 0000-0003-2948-2202
SPIN-код: 3367-9330

Ivan S. Kushnir, student, Moscow Polytechnic University
E-mail: kushn1r_ivan@mail.ru
ORCID: 0009-0002-5032-468X
SPIN-код: 3925-7441

To Man Hung, Intern, Moscow Polytechnic University
E-mail: manhhungxm@gmail.com
ORCID: 0009-0004-3987-313X

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

Поступила в редакцию 05.05.2025
После доработки 19.05.2025
Принята к публикации 26.05.2025

Received 05.05.2025
Revised 19.05.2025
Accepted 26.05.2025

Оригинальная статья

УДК 621.7.043

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-102-109

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ТИПА «СТУПИЦА» И «ФЛАНЕЦ»**

© 2025 г. М. В. Филиппова¹, А. Б. Юрьев², М. В. Темлянцев²

¹Кузбасский институт ФСИН России (Россия, 654066, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Октябрьский пр., 49)

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

Аннотация. Основную часть себестоимости машиностроительной продукции составляет стоимость металла, расходуемого на изготовление детали. С целью уменьшения количества отходов металла и повышения качества штампованных поковок разработаны новые технологии производства типовых машиностроительных деталей типа «ступица» и «фланец» на основе комплексной технологии полугорячей штамповки из шаровой заготовки. Согласно заводской технологии рассматриваемые детали производят методом горячей облойной штамповки: разделение металла на цилиндрические заготовки для последующей штамповки осуществляется резкой на пресс-ножницах. Разброс по массе таких заготовок составляет 10 – 12 %; нагрева металла под штамповку до температуры 1150 – 1200 °С, при нагреве до таких температур на поверхности заготовки образуется окалина; штамповка в открытых штампах с предварительной осадкой цилиндрической заготовки и обрезкой облоя. Согласно разработанным технологиям исходной заготовкой является точная шаровая заготовка, полученная разделением на станах поперечно-винтовой прокатки, разброс по массе которой не превышает 8 %. Температура нагрева под штамповку снижена и находится в диапазоне 850 – 900 °С, при нагреве до температур полугорячей штамповки на поверхности заготовки окалина не образуется; штамповка осуществляется за один переход в закрытом штампе. Представлены сравнительные схемы производства деталей по заводским и разработанным технологиям. Проведенные исследования показали, что применение комплексной технологии позволяет получить точные по массе поковки с минимальными припусками на последующую механическую обработку за меньшее количество операций и сэкономить до 25 % металла от исходной массы заготовки.

Ключевые слова: полугорячая штамповка, шаровая заготовка, ресурсосберегающая технология, безоблойная штамповка, комплексная технология, цилиндрическая заготовка, закрытый штамп, исходная заготовка

Для цитирования: Филиппова М.В., Юрьев А.Б., Темлянцев М.В. Применение комплексной технологии полугорячей штамповки для производства деталей типа «ступица» и «фланец». *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):102–109. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-102-109](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-102-109)

Original article

**APPLICATION OF INTEGRATED SEMI-HOT STAMPING TECHNOLOGY FOR THE
PRODUCTION OF HUB AND FLANGE TYPE PARTS**

© 2025 M. V. Filippova¹, A. B. Y'uryev², M. V. Temlyantsev²

¹Kuzbass Institute of the Federal Penal Service of Russia (49 Oktyabrsky pr., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

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

Abstract. The main part of the cost of machine-building products is the cost of the metal used to manufacture the part. In order to reduce the amount of metal waste and improve the quality of stamped forgings, new technologies have been developed for the production of standard machine-building parts such as "hub" and "flange" based on

the integrated technology of semi-hot stamping from a ball blank. According to the factory technology, the parts in question are produced by hot-dip stamping: metal is divided into cylindrical blanks for subsequent stamping by cutting on press shears, the weight spread of such blanks is 10 – 12 %; metal is heated for stamping to a temperature of 1150 – 1200 °C, when heated to such temperatures, scale forms on the surface of the workpiece; stamping in open dies with pre-laying of a cylindrical billet and clipping of a chip. According to the developed technologies, the initial blank is an accurate ball blank obtained by separation in cross-screw rolling mills, the mass spread of which does not exceed 8 %. The heating temperature for stamping is reduced and is in the range of 850 – 900 °C, when heated to temperatures of semi-hot stamping, scale does not form on the surface of the blank; stamping is carried out in one the transition is in a closed stamp. Comparative schemes of manufacturing parts according to factory and developed technologies are presented. The conducted studies have shown that the use of integrated technology allows to obtain accurate forgings by weight with minimal allowances for subsequent machining in fewer operations and save up to 25 % of the metal from the initial mass of the workpiece.

Keywords. semi-hot stamping, ball blank, resource-saving technology, flash-free stamping, integrated technology, cylindrical blank, closed die, initial blank

For citation: Filippova M.V., Temlyantsev M.V., Y'uryev A.B. Application of integrated semi-hot stamping technology for the production of hub and flange type parts. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):102–109. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-102-109](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-102-109)

Введение

Большую часть (в среднем 60 %) себестоимости машиностроительной продукции составляет стоимость металла, расходуемого на изготовление детали [1]. При производстве деталей машиностроения в кузнечно-прессовых цехах применяется технология горячей облойной штамповки из цилиндрических заготовок, при использовании которой до 25 % металла идет в отход. Для повышения ресурсосбережения разработана новая комплексная технология полугорячей штамповки из шаровой заготовки в закрытых штампах [2]. Исходным материалом являются шаровые заготовки, полученные разделением на станах поперечно-винтовой прокатки. Использование помольных шаров в качестве исходной заготовки для безоблойной штамповки не рекомендуется из-за больших допусков по размеру [3]. Активно ведутся работы по повышению качества прокатываемых шаров [4]: с применением программ компьютерного модели-

рования [5] и последующих экспериментальных исследований [6] анализируют влияние калибровок [7], технологических факторов при прокатке шаров [8] из различных марок стали [9], возможность получения шаров различных диаметров [10], а также помольных шаров повышенной точности [11]. Нагрев осуществляется до температур полугорячей штамповки, что позволяет получить лучшее качество поверхности заготовки [12]. Штамповка производится в закрытом штампе [13], которая является прогрессивной и активно развивающейся [14].

Детали «ступица» и «фланец» относятся к категории серийной продукции кузнечно-прессовых цехов (рис. 1) [15].

Заводская технология получения детали «ступица» включает в себя следующие операции [16]:

- резка горячекатаного прутка на мерные цилиндрические заготовки;
- нагрев цилиндрических заготовок до температуры 1150 – 1200 °C;

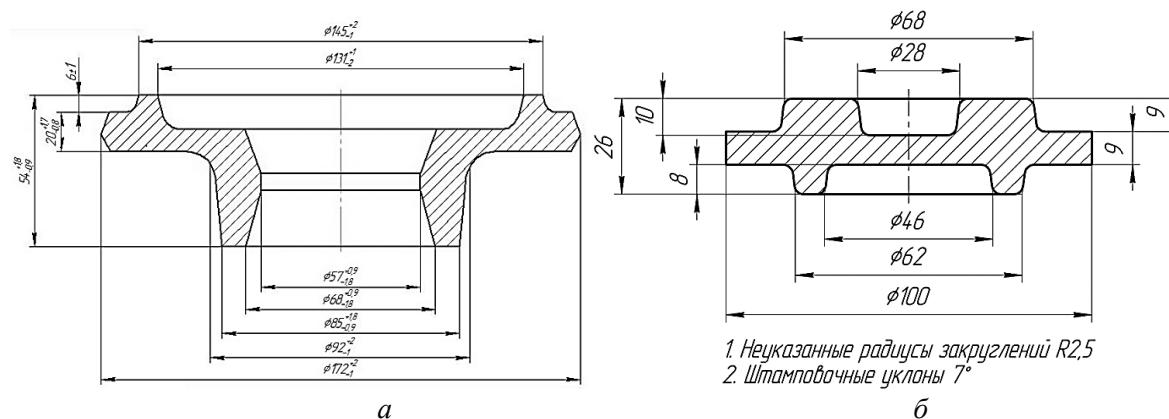


Рис. 1. Эскизы поковок ступица (а) и фланец (б)
Fig. 1. Sketches of forgings hub (a) and flange (b)

– штамповка за три перехода в открытых штампах, обрезка облоя и прошивка отверстия.

Прокатанные штанги диаметром 75 мм после предварительного нагрева в печи до температуры 400 – 600 °С на кривошипном прессе Эрфурт разрезают на заготовки длиной 106 ± 2 мм. При этом цилиндрическая часть заготовки составляет 24 мм, косой рез достигает 8 мм и смятие цилиндрической части до 6,5 мм. Согласно технологической карте масса цилиндрической заготовки должна быть не менее 3675 г. Далее цилиндрическую заготовку нагревают в индукционном нагревателе до температуры 1150 – 1200 °С с темпом выдачи 16 – 18 с. Нагретую заготовку штампуют за три перехода в открытых штампах: предварительная осадка для удаления окалины и выравнивания торцов заготовки; штамповка в черновом и затем в окончательном ручье. После этого поковка по транспортеру передается к обрезающему кривошипному прессу, где проводится обрезка облоя и прошивка отверстия. Масса поковки при этом составляет 2800 г, масса облоя 675 г, масса выдры 145 г и масса угара 55 г. Таким образом, отходы металла при штамповке одной поковки составляют 875 г, масса облоя составляет 675 г [17].

Заводская технология получения детали «фланец» включает в себя следующие операции:

- резка горячекатаного прутка на мерные цилиндрические заготовки;
- нагрев цилиндрических заготовок до температуры 1150 – 1200 °С;
- штамповка за два перехода в открытых штампах, обрезка облоя.

Резка горячекатаного прутка диаметром 50 мм из стали марки 40 на мерные заготовки осуществляли на пресс-ножницах в холодном состоянии. Цилиндрические заготовки высотой 70 мм из бункера штамповочной линии подаются по одной в индукционный нагреватель КИН 750/2,4. Температура нагрева заготовки составляет 1150 – 1200 °С, темп выдачи нагретых заготовок из индуктора 12 – 14 с. Штамповку фланца осуществляли на кривошипном горячештамповочном прессе усилием 6,3 МН за два перехода: в предварительном ручье штампа проводится осадка заготовки в торец до высоты 35 мм, в чистовом ручье штампа происходит окончательное формирование поковки, при этом излишек металла вытесняется в облойную канавку. Удаление облоя проводят на обрезающем прессе, после чего готовая поковка поступает в тару для охлаждения на воздухе. Масса готовой поковки фланца 890 г, масса облоя 233 г, масса угара 13 г.

Масса цилиндрической заготовки из стали марки 40 диаметром 48 мм и высотой 80 мм составляет 1136 г. Таким образом, потери ме-

талла при штамповке только одной поковки составляют до 246 г (21,7 % от массы поковки).

Методы исследований

Для совершенствования существующей технологии производства деталей «ступица» и «фланец» было проведено комплексное исследование возможности применения новой технологии полугорячей безоблойной штамповки из шаровой заготовки с применением метода компьютерного моделирования с последующим подтверждением результата экспериментальными исследованиями в условиях реального производства.

На первом этапе было проведено компьютерное моделирование с применением программы QForm (лицензия № R0-U1791-091214Y100). Для проведения исследований был спроектирован виртуальный технологический процесс штамповки на кривошипном горячештамповочном прессе, исходные данные для моделирования (оборудование, марки стали, геометрические размеры поковок и штампов) соответствовали данным реального процесса.

На втором этапе поковки ступица и фланец штамповали на оборудовании кузнечно-прессового цеха из шаровых заготовок, полученных на станах поперечно-винтовой прокаткой.

Результаты исследований

Результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований показали, что при производстве обеих поволок исходная заготовка хорошо центрируется в штампе, в процессе штамповки металл полностью заполняет объем штампа, сила штамповки не превышает максимальное значение, согласно паспорту на оборудование. Результаты моделирования полностью подтверждаются экспериментом.

Применение комплексной технологии полугорячей штамповки из шаровой заготовки для производства фланца позволило сократить операцию штамповки на два перехода.

Новая комплексная технология для производства поковки фланца состоит из следующих операций [18]:

1. Разделение металла на шаровые заготовки диаметром 90 мм проводится на стане поперечно-винтовой прокатки. Полученная заготовка имеет форму шара, колебание массы не превышает 6 % [19]. Шаровая заготовка имеет хорошее качество поверхности, равномерно нагревается в индукторе, не требует дополнительной операции предварительной осадки [20].

2. Индукционный нагрев заготовки до температуры полугорячей штамповки. Предварительный расчет оптимальной температуры нагрева

шаровой заготовки из стали марки 40Х показал, что оптимальная температура нагрева заготовки составляет 860 ± 5 °С. В условиях реального производства температура нагрева шаровой заготовки была повышена до 900 °С. При снижении температуры нагрева с 1200 до 900 °С сопротивление металла деформации стали марки 40Х возросло на 52 %, пластические свойства уменьшились на 34 %, угар металла сократился на 92 %, обезуглероживание поверхности отсутствует.

3. Штамповка за один переход в закрытом штампе, прошивка отверстия.

Применение комплексной технологии полугорячей штамповки из шаровой заготовки для штамповки детали «ступица» снизило расход металла на одной поковке на 730 г по сравнению с получением такой же поковки горячей объемной штамповкой из цилиндрической заготовки в открытом штампе.

На рис. 2 приведена схема технологического процесса штамповки поковки «ступица» по заводской технологии из цилиндрической заготовки (рис. 2, а) и по разработанной технологии из шаровой заготовки (рис. 2, б).

Применение технологии полугорячей безоблойной штамповки фланца из шаровой заготовки взамен существующей позволило сократить операцию штамповки на один переход и повысить коэффициент использования металла.

Новая комплексная технология для производства детали «фланец» состоит из следующих операций [21]:

- разделение металла на шаровые заготовки диаметром 60 мм проводили на стане поперечно-винтовой прокатки;

- нагрев шаровых заготовок в индукционном нагревателе осуществляли до температуры 850 °С;

- нагретые шаровые заготовки штамповали в чистовом ручье без предварительной осадки.

На рис. 3 показана последовательность операций изготовления поковки «фланец» по заводской технологии (горячая штамповка в открытом штампе из цилиндрической заготовки) и по разработанной технологии, основанной на комплексе технологии полугорячей безоблойной штамповки из шаровой заготовки. При использовании новой технологии производства фланца количество штамповочных операций сокращается на два перехода. Расчеты показали, что при производстве фланца безоблойной штамповкой из шаровой заготовки экономия металла на одной поковке составляет до 22 % по сравнению с получением этой же поковки облойной штамповкой.

Выводы

Результаты проведенных исследований показали, что применение комплексной технологии полугорячей штамповки из шаровой заготовки при производстве деталей «фланец» и «ступица» по сравнению с заводской технологией имеет следующие преимущества:

- уменьшение количества технологических операций;

- сокращение штамповочных переходов за счет исключения операции осадки;

- повышение качества поверхности заготовки за счет понижения температуры нагрева заготовки;

- снижение количества отходов металла за счет отсутствия облоя.

Таким образом, комплексную технологию полугорячей штамповки из шаровой заготовки можно рекомендовать для производства деталей «фланец» и «ступица» взамен с заводской технологии горячей облойной штамповки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Favi C., Campi F., Mandolini M., Germani M., Martinelli I. Key features and novel trends for developing cost engineering methods for forged components: a systematic literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;117:2601–2625. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07611-4>
2. Peretyatko V.N., Bakhaev A.V., Filippova M.V., Vakhman S.A. Stamping axisymmetric forgings. *Steel in Translation*. 2009;39(4):300–301. <https://doi.org/10.3103/S0967091209040032>
3. ГОСТ 7524 – 2015. Шары мелющие стальные для шаровых мельниц. (Технические условия). Москва: Изд-во стандартов, 2016:20.
4. Chila P., Pater Z., Tomczak J., Chila P. Numerical analysis of rolling process for producing steel balls using helical rolls. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016;61(2):485–492. <https://doi.org/10.1515/amm-2016-0085>
5. Ren, X., Liu Y. Study on the influence of deforming velocity on steel ball quality based on DEFORM. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;117-119:1806–1809. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.117-119.1806>
6. Pater Z. etc. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013;67:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.12.006>

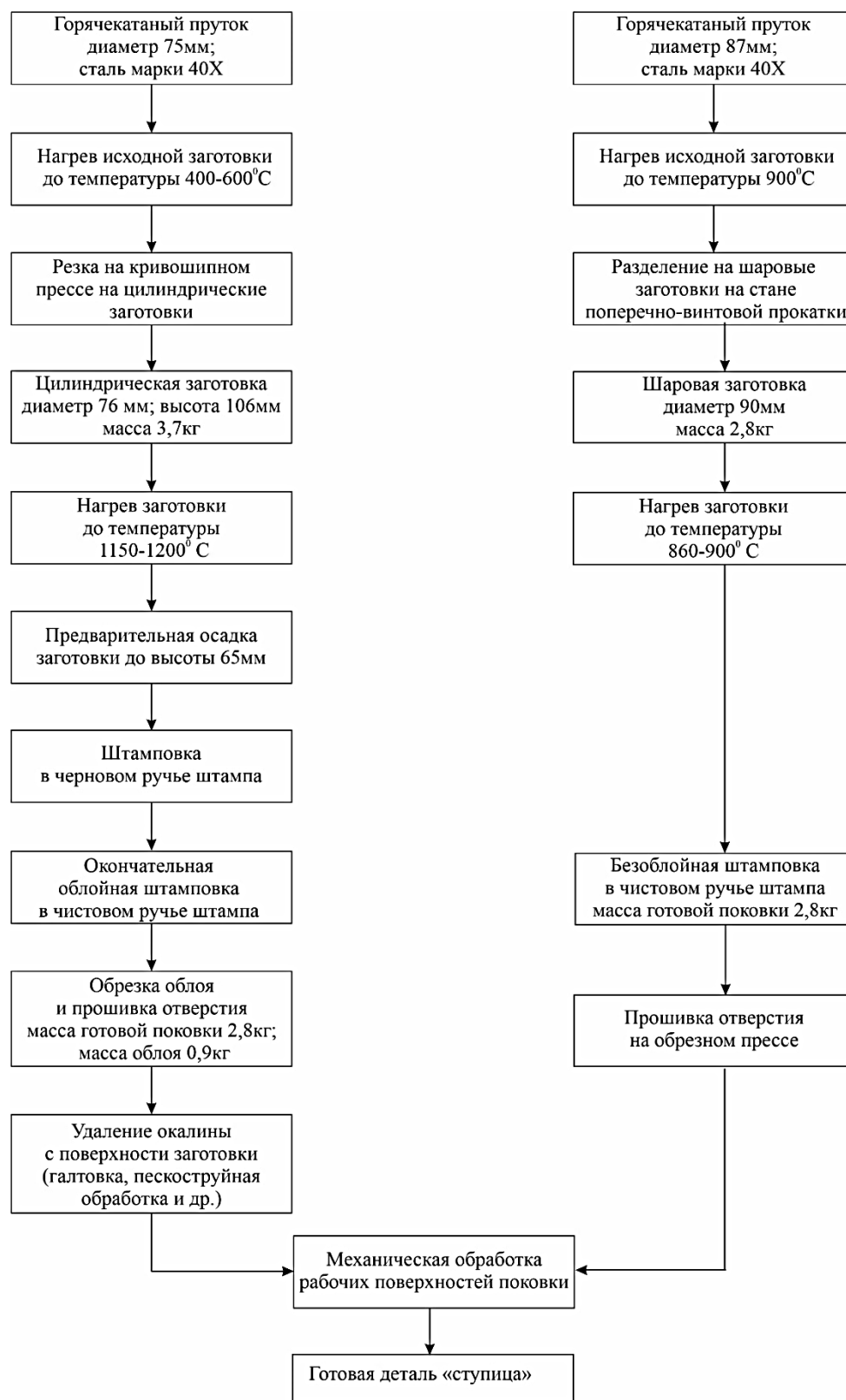


Рис. 2. Последовательность технологических операций производства поковки «ступица»

Fig. 2. Sequence of technological operations for the production of the forging “hub”

7. Шварц Д.Л., Семенов А.А., Галимьянов И.К. Компьютерное моделирование двухзаходной прокатки при производстве мелющих шаров диаметром 100 мм из легированных сталей. *Металлург.* 2022;1:79–84. https://doi.org/10.52351/00260827_2022_01_79
8. Du S., Ren X. Analysis of factors influencing the skew rolling ball quality. *Materials.* 2013;12(9):248–250. https://doi.org/10.52351/00260827_2013_01_32
9. Pater Z. Analysis of helical rolling process of balls formed from a head of a scraper rail. *Ad-*

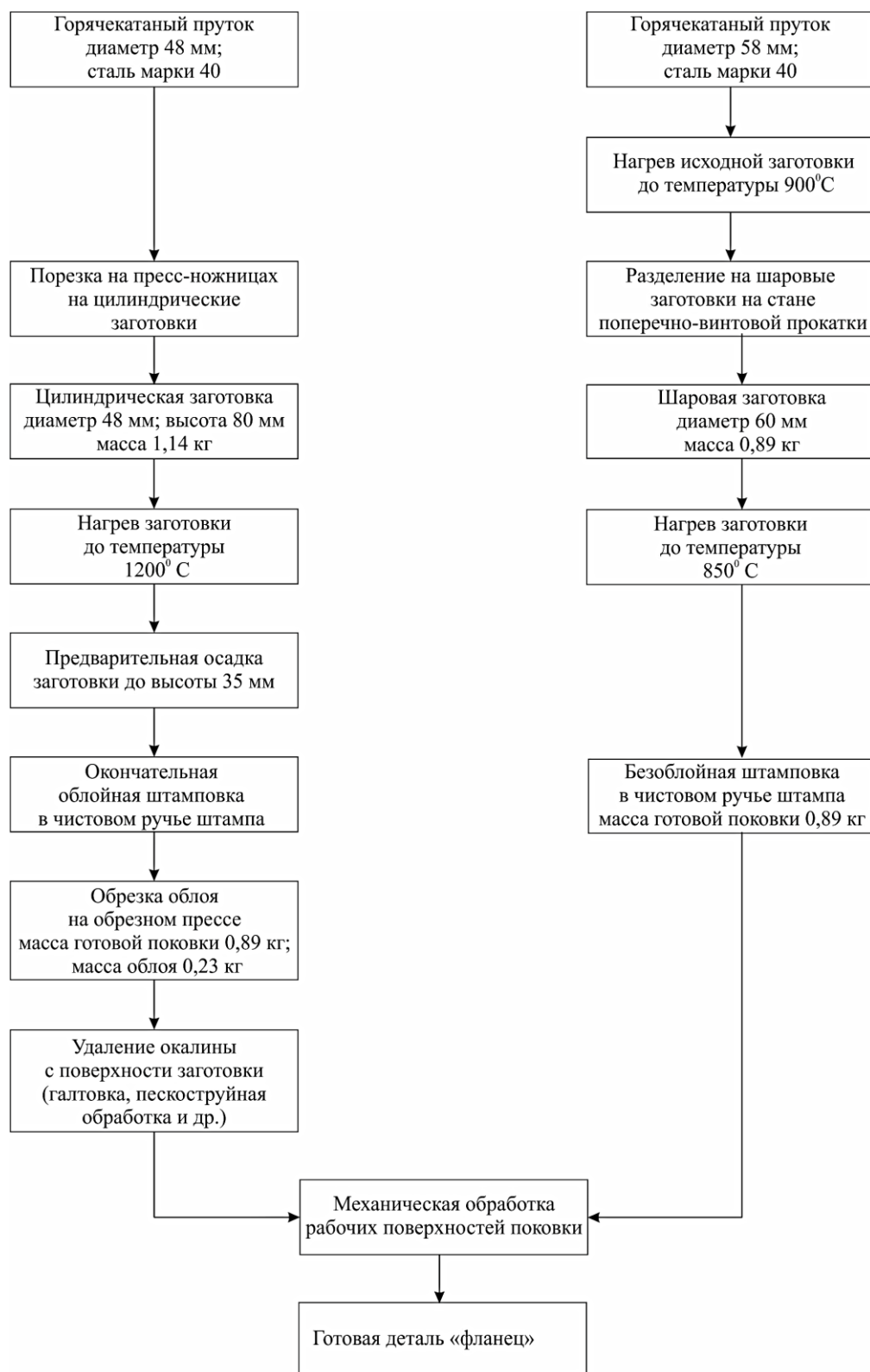


Рис. 3. Последовательность технологических операций производства поковки «фланец»
Fig. 3. Sequence of technological operations for the production of a “flange” forging

vances in Science and Technology Research Journal. 2016;10(30):110–114. <https://doi.org/10.12913/22998624/62702>

10. Shvarts D.L., Galim’yanov I.K. Improvment of a double-helical roll pass design for rolling 100-mm grinding balls. *Metallurgist*.

2022;66(3-4):422–432.

<https://doi.org/10.1007/s11015-022-01343-w>

11. Рубцов В.Ю., Щевченко О.И., Алыпов П.А., Лебедев В.А. Мелющие шары повышенной точности. *Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки*. 2020;2(54):86–96. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2020-2-9>

12. Темлянец М.В., Коротков С.Г., Темлянцев Е.Н. Развитие теории и практики малоокислительных и малообезуглероживающих технологий нагрева стали. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2019;3(29):20–24.
13. Лялин В.М. Полугорячая штамповка детали «клапан» в разъемных матрицах. *Известия тульского государственного университета. Технические науки*. 2013;6-2:263–269.
14. Железков О.С., Галиахметов Т.Ш., Лизов С.Б. Поиск рациональных технологий изготовления болтов с шестигранными головками из нержавеющей стали на основе комплексного критериального подхода. *Механическое оборудование металлургических заводов*. 2022;1(18):55–60.
15. Филиппова М.В., Перетятко В.Н., Темлянец М.В. *Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением*. Новосибирск: СО РАН, 2016:266.
16. Filippova M.V., Peretyatko V.N., Prudkiy E.E., Temlyantsev M.V., Nikitin A.G. Complex technology of stamping details «hub» from ball blank. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012083>
17. Филиппова М.В., Прудкий Е.Е., Перетятко В.Н. Безоблойная штамповка детали «ступица» из шаровой заготовки. В кн.: *Российская наука в современном мире. Сборник статей XI международной научно-практической конференции*. Москва: ООО «Актуальность. РФ», 2017:58–61.
18. Филиппова М.В., Сметанин С.В., Прудкий Е.Е. Комплекс полугорячей объемной штамповки. В кн.: *Металлургия: новые технологии, управление, инновации и качество. Труды Всероссийской научно-практической конференции*. Новокузнецк: СибГИУ, 2016:227–229.
19. Филиппова М.В., Сметанин С.В. Производство точных по массе шаровых заготовок на станах поперечно-винтовой прокатки. *Прокатное производство (приложение к журналу «Технология металлов»)*, 2025;22:32–40.
20. Filippova M.V., Temlyantsev M.V., Peretyatko V.N., Prudkiy E.E. Rolling of metal ball. *Steel in Translation*. 2017;47:435–439. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070038>
21. Филиппова М.В., Прудкий Е.Е., Бахаев А.В. Моделирование штамповки детали «фланец» из шаровой заготовки. В кн.: *Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации»*. Материалы инновационного конвента. Новокузнецк: СибГИУ, 2019:543–546.

REFERENCES

1. Favi C., Campi F., Mandolini M., Germani M., Martinelli I. Key features and novel trends for developing cost engineering methods for forged components: a systematic literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;117:2601–2625. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07611-4>.
2. Peretyatko, V.N., Bakhaev A.V., Filippova M.V., Vakhman S.A. Stamping axisymmetric forgings. *Steel in Translation*. 2009;39(4):300–301. <https://doi.org/10.3103/S0967091209040032>.
3. GOST 7524 – 2015. *Steel grinding balls for ball mills. (Technical conditions)*. Moscow: Publishing house of standards, 2016:20. (In Russ.).
4. Chila P., Pater Z., Tomczak J., Chila P. Numerical analysis of rolling process for producing steel balls using helical rolls. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016;61(2):485–492. <https://doi.org/10.1515/amm-2016-0085>
5. Ren X., Liu Y. Study on the influence of deforming velocity on steel ball quality based on DEFORM. *Applied Mechanics and Materials*. 2012;117-119:1806–1809. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.117-119.1806>
6. Pater Z. etc. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013;67:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.12.006>
7. Schwartz D.L., Semenov A.A., Galim'yanov I.K. Computer modeling of two-pass rolling in the production of grinding balls with a diameter of 100 mm from alloy steels. *Metallurgist*. 2022;1:79–84. https://doi.org/10.52351/00260827_2022_01_79
8. Du S., Ren X. Analysis of factors influencing the skew rolling ball quality. *Materials*. 2013;12;9:248–250. https://doi.org/10.52351/00260827_2013_01_32
9. Pater Z. Analysis of helical rolling process of balls formed from a head of a scrapper rai. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2016;10(30):110–114. <https://doi.org/10.12913/22998624/62702>.
10. Shvarts D.L., Galim'yanov I.K. Improvment of a double-helical roll pass design for rolling 100-mm grinding balls. *Metallurgist*. 2022;66(3-4):422–432. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01343-w>
11. Rubtsov V.Yu., Shchevchenko O.I., Alypov P.A., Lebedev V.A. Grinding balls of high accuracy. *News of higher educational institutions. Volga region. Engineering sciences*. 2020;2(54):86–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2020-2-9>

12. Temlyantsev M.V., Korotkov S.G., Temlyantseva E.N. Development of the theory and practice of low-oxidizing and low-decarburizing steel heating technologies. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2019;3(29):20–24. (In Russ.).
13. Lyalin V.M. Semi-hot stamping of the "valve" part in split dies. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2013;6-2:263–269. (In Russ.).
14. Zhelezkov O.S., Galiakhmetov T.Sh., Lizov S.B. Search for rational technologies for the production of hexagon-head bolts from stainless steel based on an integrated criteria approach. *Mechanical equipment of metallurgical plants*. 2022;1(18):55–60. (In Russ.).
15. Filippova M. V., Peretyatko V. N., Temlyantsev M. V. *Development and implementation of energy- and resource-saving technologies for metal forming*. Novosibirsk: SB RAS, 2016:266. (In Russ.).
16. Filippova M.V., Peretyatko V.N., Prudkiy E.E., Temlyantsev M.V., Nikitin A.G. Complex technology of stamping details "hub" from ball blank. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012083>.
17. Filippova M.V., Prudkiy E.E., Peretyatko V.N. Flash-free stamping of the "hub" part from a spherical blank. In: *Russian Science in the Modern World. Collection of articles from the XI International Scientific and Practical Conference*. 2017:58–61. (In Russ.).
18. Filippova M.V., Smetanin S.V., Prudkiy E.E. Semi-hot volume stamping complex. In: *Metalurgy: new technologies, management, innovations and quality. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference*. Siberian State Industrial University. 2016:227–229. (In Russ.).
19. Filippova M.V., Smetanin S.V. Production of precise-weight ball blanks on cross-helical rolling mills. *Rolling production (supplement to the journal "Technology of Metals")*. 2025;22:32–40. (In Russ.).
20. Filippova M.V., Temlyantsev M.V., Peretyatko V.N., Prudkiy E.E. Rolling of metal ball. *Steel in Translation*. 2017;47:435–439. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070038>
21. Filippova M.V., Prudkiy E.E., Bakhaev A.V. Modeling of stamping of the "flange" part from a spherical blank. In: *Innovative Convention "Kuzbass: Education, Science, Innova-*

tion". Proceedings of the Innovation Convention. 2019:543–546. (In Russ.).

Сведения об авторах

Марина Владимировна Филиппова, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник организационно-научного и редакционно-издательского отделения, Кузбасский институт ФЦИН России

E-mail: filippova_mv@mail.ru

SPIN-код: 1854-5071

Алексей Борисович Юрьев, д.т.н., профессор, профессор кафедры обработки металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: rector@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-9932-4755

SPIN-код: 1104-0168

Михаил Викторович Темлянец, д.т.н., профессор, профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0001-7985-5666

SPIN-код: 6169-5458

Information about the authors:

Marina V. Filippova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher of the Organizational-Scientific and Editorial-Publishing Department, Kuzbass Institute of the Federal Penal Service of Russia

E-mail: filippova_mv@mail.ru

SPIN-код: 1854-5071

Aleksey B. Yuryev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Metal Forming and Materials Science at EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University

E-mail: rector@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-9932-4755

SPIN-код: 1104-0168

Mikhail V. Temlyancev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, 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 20.05.2025

После доработки 04.06.2025

Принята к публикации 10.06.2025

Received 20.05.2025

Revised 04.06.2025

Accepted 10.06.2025

Оригинальная статья

УДК 621.763

DOI:10.57070/2304-4497-2025-2(52)-110-117

АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2025 г. М. Х. Нориега Флорес, И. В. Строкина, А. Д. Трофимова, В. С. Маринич,
С. В. Коновалов

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

Аннотация. Несмотря на высокую стоимость алюминиевых сплавов в сравнении с чугунами и сталями, они находят широкое применение в различных отраслях машиностроения из-за значительно меньшей массы отливок и сокращения трудоемкости их механической обработки. Многочисленные исследования процессов кристаллизации расплава связаны с тем, что существуют методы воздействия на ключевые характеристики сплава (прочность, пластичность, коррозионная стойкость и теплопроводность). Повышение качества изделий из алюминиевых сплавов является важной научно-технической задачей, которая объединяет теорию и технологию литейного производства с металловедением. Проведен обзор существующих методик и способов модифицирования алюминия и его сплавов. Описаны основные теории, виды модифицирования и процессы, происходящие при действии модифицирующих добавок на расплав. Рассмотрены способы введения модифицирующих элементов в расплав. Изложены технологии получения порошкообразных смесей и лигатур, имеющие наибольший эффект модифицирования. Приведены методы кавитационного и лазерного воздействий на расплав, усиливающие действие модификатора. Рассмотрены информационный и генетический подходы к процессу модифицирования. Обобщены и перечислены основные эффективные модифицирующие добавки (редкоземельные металлы, алмазный порошок, углеродные нанотрубки, керамические тугоплавкие соединения AlN , Si_3N_4 , SiC , TiC , B_4C , TiB_2). Описанные методы являются перспективными решениями, позволяющими сделать этот легкий и прочный металл еще более универсальным и высокопроизводительным материалом для различных отраслей промышленности.

Ключевые слова: модификаторы, микроструктура, алюминиевые сплавы, методы модифицирования, кристаллическая структура

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00064, <https://rscf.ru/project/24-19-00064/>

Для цитирования: Нориега Флорес М.Х., Строкина И.В., Маринич В.С., Трофимова А.Д., Коновалов С.В. Анализ методов модифицирования алюминиевых сплавов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):110–117. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-110-117](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-110-117)

Original article

ANALYSIS OF METHODS FOR MODIFYING ALUMINUM ALLOYS

© 2025 M. J. Noriega Flores, I. V. Strokina, A. D. Trofimova, V. S. Marinich,
S. V. Kononov

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

Abstract. Despite the high cost of aluminum alloys compared to cast irons and steels, they find wide application in various branches of mechanical engineering due to the significantly lower weight of castings and the reduction in the labor intensity of their mechanical processing. To date, a large number of works have been published on the study of the microstructural parameters of aluminum alloys. Numerous studies of melt crystallization processes

are associated with the fact that there are methods of influencing such key characteristics of the alloy as strength, ductility, corrosion resistance, and thermal conductivity. Forecasting the quality of products obtained from aluminum alloys is one of the most important scientific and technical tasks at the intersection of the theory and technology of foundry production and the adjacent field of materials science. This article provides an overview of existing methods and methods for modifying aluminum and its alloys. The main theories, types of modification, and processes occurring under the action of modifying additives on the melt are described. The methods of introducing modifying elements into the melt are considered. The technologies for obtaining powder mixtures and master alloys with the greatest modifying effect are presented. Methods of cavitation and laser exposure to the melt, enhancing the effect of the modifier, are given. The informational and genetic approaches to the modification process are considered. The main effective modifying additives are summarized and listed: rare earth metals, diamond powder, carbon nanotubes, as well as refractory ceramic compounds: AlN, Si₃N₄, SiC, TiC, B₄C, TiB₂. The described methods are promising solutions that can make this light and strong metal even more versatile and high-performance material for various industries.

Keywords: modifiers, microstructure, aluminum alloys, modification methods, crystal structure

Financing. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-19-00064, <https://rscf.ru/project/24-19-00064/>

For citation: Noriega Flores M.J., Strokina I.V., Trofimova A.D., Marinich V.S., Konovalov, S.V. Analysis of methods to improve the properties of aluminum alloys. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):110–117. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-110-117](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-110-117)

Введение

В настоящий момент существуют различные технологии и методы воздействия на структуру алюминиевого сплава, такие как ультразвуковое воздействие, магнитное, физическое (кристаллизация под избыточным давлением) и термомеханическое (нагрев, охлаждение, механическая деформация) [1]. Модифицирование является относительно недорогим и эффективным способом измельчения зерен алюминиевого сплава [2]. Доказано, что использование модификаторов непосредственно влияет на кристаллическую структуру и фазовое распределение материала, а также на его механические и эксплуатационные свойства, улучшая их и делая пригодными для использования в самых разных отраслях промышленности (от авиастроения и автомобилестроения до электротехники и строительной индустрии) благодаря небольшой массе, высокой коррозионной стойкости и простоте изготовления [3]. Несмотря на известность модифицирующих добавок, единого объяснения их влияния на кристаллизацию алюминия до сих пор не существует из-за разнообразной природы их воздействия и условий плавки, литья и термической обработки [4]. В настоящей работе проведен обзор существующих в настоящее время исследований процесса модифицирования алюминия и его сплавов.

Обсуждение

При модифицировании расплава происходят процессы, влияющие на процесс кристаллизации алюминия или его сплавов:

1. Инокуляция происходит с использованием тугоплавких частиц (Ti, Zr, V, TiC, SiC, SiO₂, Al₂O₃, TiB₂), которые в расплаве образуют высокодисперсную фазу. Частицы этой взвеси не взаимодействуют химически с расплавом, а играют роль зародышей, от которых происходит рост кристаллов [5]. Некоторые модификаторы рассматриваемого вида получают непосредственно в расплаве в качестве интерметаллидного соединения Al₃Ti[6].

2. Лимитация осуществляется с применением поверхностно-активных элементов (Na, Sr, Sb, Ba), частицы которых адсорбируются на границах зародившегося кристалла и снижают его скорость роста, тем самым увеличивая количество центров кристаллизации, делая структуру сплава мелкозернистой [7].

Процесс модифицирования делится на следующие виды:

I – включает изменение размеров первичных зерен-дендритов и других продуктов первичной кристаллизации;

II – предполагает изменение внутреннего строения зерен-дендритов; в результате ветви дендритов измельчаются и утончаются, а вторичные фазы распределяются более равномерно;

III – направлено на изменение структуры эвтектик, содержащих легкоплавкие компоненты, например, силумины [8]; влияние на эвтектические структуры позволяет улучшить такие характеристики материала (как прочность и пластичность) [9].

Ввод модификаторов в расплав может осуществляться по-разному. Самый простой и незатратный способ – введение модификатора в виде

порошка непосредственно в печь при выплавке сплава или добавлением смеси в разливочный ковш перед заливкой металла в формы. Недостатки этого способа очевидны: усвоение модификатора расплавом может быть незначительным, вследствие плохой перемешиваемости и смачиваемости смеси, а также сгоранием большей части модификатора до смачивания расплавом. Поэтому вместо чистого модификатора вводят порошковые смеси с добавками солей и рафинирующих реагентов. Будет происходить взаимодействие солей и оксидов с расплавом алюминия с образованием интерметаллидов, которые будут являться центрами кристаллизации [10]. Совместное использование смеси порошка легирующих добавок и рафинирующих веществ положительно зарекомендовало себя в условиях производственного литья алюминиевых сплавов [11]. Перспективным является инжекционный метод введения модифицирующего порошка в расплавы алюминия или его сплавов. Суть метода в том, что ввод модифицирующего элемента осуществляется высокотемпературной обменной реакцией солевого расплава и алюминия [12].

Наибольшее распространение в промышленности получил способ модифицирования лигатурами, содержащими в своем составе тугоплавкие дисперсные частицы, ввод которых меняет процесс кристаллизации и позволяет снизить газовую пористость и получить более мелкую однородную структуру [2]. Лигатуры в металлургии представляют собой металлические сплавы, содержащие один или несколько легирующих элементов в заданных концентрациях, которые вводятся в расплав основного металла для придания ему требуемых физических, химических и механических свойств. Применение лигатур позволяет уменьшить потери модифицирующих добавок вследствие большей усвояемости в расплаве, улучшить условия выплавки, а также повысить производственные показатели. Лигатуры могут быть представлены различной формы: в виде гранул, порошков, таблеток, слитков, прутков, брикетов, таблетированных смесей и других форм. Эффективное модифицирование алюминиевых сплавов требует не только подбора состава лигатур, но и разработки технологий их получения и применения, обеспечивающих стабильность и повторяемость структуры конечного материала. В работе [13] доказано, что с уменьшением толщины лигатуры, то есть с увеличением скорости охлаждения в процессе ее приготовления существенно измельчаются интерметаллиды и увеличивается их количество. Модифицирующий эффект лигатуры в виде пластины 0,5 мм, полученной закалкой из жидкого состояния, более чем в два раза

превышает эффект применения прутковой лигатуры. В работе [14] в качестве модифицирующей добавки применяли гранулы из того же сплава, что и выплавляли. Грануляцию проводили с высокими скоростями охлаждения, затем гранулы подвергали прессованию в прутки. Увеличение прочностных характеристик выплавляемого сплава в рассматриваемом случае объясняется не только модифицирующим эффектом, но и упрочняющим, связанным с раздроблением при прессовании на мелкодисперсные частицы оксидной пленки Al_2O_3 на гранулах. В работе [15] предложена концепция кавитационного воздействия на агломераты частиц зародышевого типа, вводимые в расплав лигатурным прутком. Доказано, что за счет ультразвукового воздействия происходит интенсивное дробление агломератов модификатора и как следствие, увеличение активных зародышевых частиц.

В работе [16] удалось использовать процесс лазерного модифицирования поверхности образца алюминиевого сплава для повышения коррозионной стойкости, механических свойств и износостойкости в условиях адгезионного и абразивного изнашивания.

В качестве дисперсной упрочняющей фазы при модифицировании алюминиевых сплавов наиболее часто используют керамические частицы тугоплавких соединений: нитриды (AlN , Si_3N_4) [17]; карбиды (SiC , TiC , B_4C) [18 – 20]; оксиды (Al_2O_3 , SiO_2) [21]; бориды (TiB_2) [22; 23] и композиции на их основе [24]. Введение и равномерное распределение в объеме расплава алюминия этих химических соединений представляет собой большую проблему, так как частицы модификатора легко слипаются в агломераты и плохо смачиваются жидким алюминием [25]. Решением этой проблемы может быть применение технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) керамических частиц в расплавах [26]. СВС представляет собой последовательную химическую реакцию в расплаве реагентов с образованием конечных продуктов [27]. Частицы керамических соединений не вводятся извне с окисленными поверхностями и адсорбированными газами и влагой, а образуются непосредственно в объеме алюминиевого расплава, что существенно повышает межфазную прочность [26].

Положительный эффект модифицирования алюминиевых сплавов отмечен при введении в расплав редкоземельных элементов (РЗЭ) [28]. В работе [29] доказано положительное влияние добавки скандия (примерно 0,02 % от массы расплава) на прочностные характеристики сплава вследствие измельчения макроструктуры более чем в

два раза. Добавление гадолиния совместно с цирконием и скандием позволило в работе [30] добиться гораздо более выраженного измельчения зерна при одновременном улучшении текучести алюминиевого сплава. В работе [5] рассматривается положительное влияние европия и гафния на сплавы. Однако показано, что введение в алюминиевые сплавы таких редкоземельных металлов как иттербий и эрбий практически не дало эффекта модифицирования в объеме расплава.

Существуют данные по эффективному модифицированию алюминиевых сплавов частицами наноструктурированного тугоплавкого алмазного порошка, являющимся сопутствующим продуктом при получении искусственных алмазов. Добавление тугоплавких частиц алмазного порошка в расплав способствует измельчению структуры сплава и создает условия для равномерного распределения упрочняющих интерметаллидов при термической обработке отливок из модифицированного сплава [31].

Добавление углеродных нанотрубок в алюминиевые сплавы улучшает зернистую структуру сплава, делает ее однородной, что способствует повышению механических свойств (твердости и прочности при растяжении отливок) [32].

Необходимо отметить, что существует три современных теории: синтез сплавов, электронное и генное модифицирование. В первых двух теориях рассматриваются непосредственно химические реакции, а свойства расплава и особенности структуры модификаторов не учитываются [33]. Теория генного модифицирования основывается на наличии в расплаве унаследованных элементов структуры шихтовых металлов размером от 5 до 200 нм, которые оказывают генетическое влияние на структуру закристаллизовавшихся сплавов. [7]. Модифицирование рассматривается как система, включающая геномы: модифицирующего (исходного) жидкого алюминиевого сплава и микрокристаллического модификатора (МКМ). Рассматриваемая теория учитывает наследственное влияние шихтообразующих составляющих, расплава и модификатора в системе шихта → расплав → модификатор → модифицированный сплав. Предусматривая наследственное влияние используемых материалов при модифицировании можно уменьшить расходы дефицитных модификаторов, обеспечить высокий эффект модифицирования и получить улучшенные характеристики литых и деформированных изделий из алюминиевых сплавов.

В работе [34] представлен информационный подход к процессу модифицирования. От зародышевой частицы модификатора идет поток информации, заставляющий атомы алюминия в кластере располагаться в пространстве опреде-

ленным образом: атомы алюминия «пристраиваются» к существующей кристаллической решетке сначала материала зародышевой частицы, а потом и к кристаллической решетке расплава. Исходя из этого, необходим центр кристаллизации такого размера, чтоб поток информации от него значительно превышал поток информации от кластера критического размера. Если ввести в расплав порядка 10 тыс. штук на 1 см³ зародышевых частиц размером примерно 5 мкм и распределить их равномерно в объеме расплава, то в затвердевшем расплаве должны образоваться зерна диаметром около 0,5 мм, что согласуется с данными работ [34; 35].

Выводы

Существующие теории модифицирования алюминия и его сплавов недостаточно разработаны, многие их положения являются спорными. Отсутствует единая классификация модификаторов. Для удовлетворения растущих потребностей промышленности, постоянные исследования и экспериментальные разработки в области модифицирования постоянно расширяют спектр применения алюминиевых сплавов.

Для оптимизации свойств алюминиевых сплавов применяются различные методы модифицирования расплава: добавление порошкообразных рафинирующих смесей, лигатур различной формы и разных способов производства; ультразвуковое, лазерное воздействие, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, термомеханическая обработка, разработка новых технологий литья и другие.

Перспективными модифицирующими добавками в настоящее время являются редкоземельные металлы, а также тугоплавкие наночастицы нитридов алюминия, кремния, карбиды и бориды кремния и титана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sun W., Zhu Y., Marceau R., Wang L., Zhang Q., Gao X., Hutchinson C. Precipitation strengthening of aluminum alloys by room-temperature cyclic plasticity. *Science*. 2019; 363(6430):972–975.
<https://colab.ws/articles/10.1126/science.aav7086>
2. Костин И.В., Безруких А.И., Беляев С.В., Фролов В.Ф., Губанов И.Ю., Лесив Е.М., Степаненко Н.А. Исследование технологии модифицирования при литье плоских слитков 5XXX серии. *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. 2017; 10(1):90–98.
3. Калинина Н.Е., Джур Е.А., Калинин В.Т., Носова Т.В., Кашенкова А.В. Влияние модифицирования на структуру и механиче-

- ские свойства сложнолегированных алюминиевых сплавов. *Вестник двигателестроения. Конструкционные материалы*. 2016;1:118–120.
4. Тошев М.Т. Применение нитридов в качестве модификаторов сплавов алюминия. *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. 2019;1(45):93–96. EDN: PWGTRK.
 5. Дуюнова В.А., Трапезников А.В., Леонов А.А., Коренева Е.А. Модифицирование литейных алюминиевых сплавов (обзор). *Труды ВИАМ*. 2023; 4(122):14–26. EDN: PODXET. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-4-14-26>
 6. Альтман М.Б., Стромская Н.П. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1984:128.
 7. Никитин В.И., Никитин К.В. Генное модифицирование алюминиевых литейных и деформируемых сплавов. *Металлургия машиностроения*. 2016;5:10–14. EDN: WMNMXR.
 8. Гуреева М.А. Модифицирование слитков алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Si кальцием. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2015;9:3–7. EDN: UHLAVF.
 9. Shabel B.S. Friction and Wear of Aluminum-Silicon Alloys. *National Institute of Standards and Technology*. 2013;18:10.
 10. Антонов М.М., Шамсутдинова М. Г., Орелкина Т.А. Модифицирование алюминиевых сплавов универсальными порошковыми веществами. *XVII международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов – молодых ученых. Екатеринбург, 5–9 декабря 2016: сборник научных трудов. Ч. 2*. Екатеринбург: Издательство Уральского университета. 2016:292–295.
 11. Гребнев Ю.В., Жаркова В.Ф., Окопный О.С. Комплексный процесс модифицирования и фильтрационного рафинирования литейных сплавов алюминия. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2012; 9(96):161–164. EDN: PAXPH.
 12. Скачков В.М., Яценко С.П. Модифицирование алюминиевых сплавов редкими металлами – основа перспективных материалов в строительстве и транспорте. *Нанотехнологии в строительстве. Научный интернет-журнал*. 2016;8(3):60–69. EDN: VZZFDP. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-3-60-69>
 13. Филиппова И.А., Белов В.Д., Дибров И.А. Модифицирование алюминиевых сплавов лигатурами Al5TiB, закаленными из жидкого состояния. *Литейщик России*. 2011;3:38–40. EDN: NTVNWV.
 14. Крушенко Г.Г. Модифицирование алюминиевыми гранулами алюминиевых деформируемых сплавов при литье слитков. *Решетневские чтения*. 2009; 1:331–332. EDN: VBEGGV.
 15. Эскин Г.И., Бочвар С.Г. Модифицирование алюминиевых сплавов акустическим воздействием. *Технология легких сплавов*. 2018;3:14–19. EDN: YLFMHR.
 16. Саврай Р.А., Малыгина И.Ю., Макаров А.В., Осинцева А.Л., Роговая С.А., Колобылин Ю.М. Влияние лазерного легирования порошковыми смесями Cu – Zn – Ti и Si – Cu на структуру и свойства литейного алюминиевого сплава. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2019;21(4):70–84. EDN: LWRSCQ. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.4-70-84>
 17. Premkumar M., Chu M.G. Al-TiC particulate composite produced by a liquid state in situ process. *Materials Science and Engineering A*. 1995; 202(1–2):172–178. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)09787-2](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09787-2)
 18. Liu X., Zhenqing W., Zuogui Z., Xiufang B. The relationship between microstructures and refining performances of Al-Ti-C master alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2002; 332(1–2):70–74. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01751-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01751-8)
 19. Birol Y. Grain Refining Efficiently of Al-Ti-C Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006; 422(1-2):128–131. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.11.059>
 20. Cai X., Dong B., Lin S., Liu D. Improvements of microstructure and mechanical properties of wire-arc directed energy deposition 2024 aluminum alloy after adding TiC nanoparticles. *Virtual and Physical Prototyping*. 2025;20(1):22. <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2024.2442489>
 21. Апакашев Р. А., Валиев Н.Г., Красиков С.А., Хазин М.Л. Исследование высокотемпературного взаимодействия оксида кремния (IV) с алюминием и его сплавами. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2021; 1:271–283. EDN: ONJYUM.
 22. Bustos Ó., Leiva R., Allende R., Sanchez Ch. Effect of magnetic stirring, grain modification and refinement on the solidification structure of an A356 aluminum alloy. *Revista Materia*. 2021;26(1):1–16. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210001.1227>
 23. Moustafa E., Mosleh A. Effect of (Ti – B) modifier elements and FSP on 5052 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;823:153–745. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153745>

24. Ding H., Liu X., Yu L., Zhao G. The influence of forming processes on the distribution and morphologies of TiC in Al–Ti–C master alloys. *Scripta Materialia*. 2007; 57(7):575–578.
25. Титова Ю.В., Майдан Д.А., Тимошкин И.Ю. Исследование ввода нанопорошка нитрида алюминия марки СВС-Аз в расплав алюминия для приготовления ex-situ композитов Al – (1–10 %) AlN. *Современные материалы, техника и технологии*. 2017; 6(14):138–144. EDN: ZXYAYX.
26. Пантелеева А.В., Никонова Р.М. Модифицирование алюминия упрочняющими фазами TiB₂ и TiC методом СВС в расплаве. *Химическая физика и мезоскопия*. 2019; 21(1):65–69. EDN: WYLFWL.
<http://dx.doi.org/10.15350/17270529.2019.1.9>
27. Сычев А.Е., Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез наноматериалов. *Успехи химии*. 2004;73(2):157–170.
28. Никитин К.В., Никитин В.И., Черников Д.Г. Наследственное влияние структуры магналиев на их деформируемость при холодной прокатке. *Металлургия машиностроения*. 2014;6:13–15. EDN: TTKCTT.
29. Bayoumy D., Wu X., Zhu Yu., Kan W., Huang A. The latest development of Sc-strengthened aluminum alloys by laser powder bed fusion. *Elsevier Ltd*. 2023; 149:1–17.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2022.11.028>
30. Xiao W., Xu C. Synergistic effects of Gd and Zr on grain refinement and eutectic Si modification of Al-Si cast alloy. *Materials Science & Engineering A*. 2017. 693:93–100.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.097>
31. Знаменский Л.Г., Ивочкина О.В., Речкалов И.В. Рафинирование и модифицирование сплавов рециклинговыми наноструктурированными материалами. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия»*. 2015;15(4):68–72. EDN: VAVXUT.
<http://dx.doi.org/10.14529/met150409>
32. Elshalakany A.B., Osman T., Khatatb A., Azzam B.S., Zaki M. Microstructure and Mechanical Properties of MWCNTs Reinforced A356 Aluminum Alloys Cast Nanocomposites Fabricated by Using a Combination of Rheocasting and Squeeze Casting Techniques. *Journal of Nanomaterials*. 2014;5:1–14.
<http://dx.doi.org/10.1155/2014/386370>
33. Никитин В.И., Никитин К.В. Развитие и применение явления структурной наследственности в алюминиевых сплавах. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2014;7(14):424–429.
34. Амосов Е.А. О модифицировании сплавов алюминия. *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты*. 2013;4:123–128. EDN: REBIOZ.
35. Никитин В.И., Никитин К.В. Проблема наследственности шихтовых материалов в технологиях легких сплавов: история, состояние, перспективы. *Технология легких сплавов*. 2020;2:21–35. EDN: TUSYKT.

REFERENCES

1. Sun W., Zhu Y., Marceau R., Wang L., Zhang Q., Gao X., Hutchinson C. Precipitation strengthening of aluminum alloys by room-temperature cyclic plasticity. *Science*. 2019;363(6430):972–975.
<https://colab.ws/articles/10.1126/science.aav7086>
2. Kostin I.V., Bezrukh A.I., Belyaev S.V., Frolov V.F., Gubanov I.Yu., Lesiv E.M., Stepanenko N.A. Research of modification technology during casting of flat ingots of 5XXX series. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya*. 2017;10(1):90–98. (In Russ.).
3. Kalinina N.E., Dzhur E.A., Kalinin V.T., Nosova T.V., Kashenkova A.V. The influence of modification on the structure and mechanical properties of complex aluminum alloys. *Vestnik dvigatelestroeniya. Konstruktsionnye materialy*. 2016;1:118–120. (In Russ.).
4. Toshev M.T. Application of nitrides as modifiers of aluminum alloys. *Politekhnikeskii vestnik. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*. 2019;1(45):93–96. EDN: PWGTKR. (In Russ.).
5. Duyunova V.A., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Koreneva E.A. Modification of cast aluminum alloys (review). *Труды ВИАМ*. 2023; 4(122):14–26. EDN: PODXET. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-4-14-26>
6. Al'tman M.B., Stromskaya N.P. Improving the properties of standard cast aluminum alloys. Moscow: Metallurgiya. 1984:128. (In Russ.).
7. Nikitin V.I., Nikitin K.V. Genetic modification of aluminum casting and wrought alloys. *Metalurgiya mashinostroeniya*. 2016;5:10–14. EDN: WMNMXR. (In Russ.).
8. Gureeva M.A. Modification of aluminum alloy ingots of the Al-Mg-Si system with calcium. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2015; 9:3–7. EDN: UHLAVF. (In Russ.).
9. Shabel B. S. Friction and Wear of Aluminum-Silicon Alloys. *National Institute of Standards and Technology*. 2013;18:10.
10. Antonov M.M., Shamsutdinova M. G., Orelkina T.A. Modification of aluminum alloys with universal powder substances. *XVII International Scientific and Technical Ural School-Seminar of Metallurgists – Young Scientists. Ekaterinburg, December 5–9, 2016: collection of scientific papers. Part 2*. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta. 2016:292–295. (In Russ.).
11. Grebnev Yu.V., Zharkova V.F., Okopnyi O.S. Integrated process for modification and filtration refining of aluminum casting alloys. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2016;1(1):1–10.

- eskogo universiteta*. 2012;9(96):161–164. EDN: PAXPJH. (In Russ.).
12. Skachkov V.M., Yatsenko S.P. Modification of aluminum alloys with rare metals is the basis for promising materials in construction and transport. *Nanotekhnologii v stroitel'stve. Nauchnyi internet-zhurnal*. 2016;8(3):60–69. EDN: VZZFDP. (In Russ.). <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2016-8-3-60-69>
 13. Filippova I.A., Belov V.D., Dibrov I.A. Modification of aluminum alloys with Al₅TiB ligatures quenched from liquid state. *Liteishchik Rossii*. 2011;3:38–40. EDN: NTVNWV. (In Russ.).
 14. Krushenko G.G. Modification of aluminum deformable alloys with aluminum granules during casting of ingots. *Reshetnevskie chteniya*. 2009;1:331–332. EDN: VBEGGV. (In Russ.).
 15. Eskin G.I., Bochvar S.G. Modification of aluminum alloys by acoustic action. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2018;3:14–19. EDN: YLFMHR. (In Russ.).
 16. Savrai R.A., Malygina I.Yu., Makarov A.V., Osintseva A.L., Rogovaya S.A., Kolobylin Yu.M. The influence of laser alloying with Cu – Zn – Ti and Si – Cu powder mixtures on the structure and properties of cast aluminum alloy. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*. 2019; 21(4):70–84. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.4-70-84>. EDN: LWRSCQ. (In Russ.).
 17. Premkumar M., Chu M.G. Al-TiC particulate composite produced by a liquid state in situ process. *Materials Science and Engineering A*. 1995; 202(1–2):172–178. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)09787-2](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)09787-2)
 18. Liu X., Zhenqing W., Zuogui Z., Xiufang B. The relationship between microstructures and refining performances of Al-Ti-C master alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2002; 332(1–2):70–74. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01751-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01751-8)
 19. Birol Y. Grain Refining Efficiently of Al-Ti-C Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006; 422(1–2):128–131. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.11.059>
 20. Cai X., Dong B., Lin S., Liu D. Improvements of microstructure and mechanical properties of wire-arc directed energy deposition 2024 aluminum alloy after adding TiC nanoparticles. *Virtual and Physical Prototyping*. 2025;20(1):22. <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2024.2442489>
 21. Apakashev R. A., Valiev N.G., Krasikov S.A., Khazin M.L. Study of high-temperature interaction of silicon (IV) oxide with aluminum and its alloys. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;1:271–283. EDN: ONJYUM. (In Russ.).
 22. Bustos Ó., Leiva R., Allende R., Sanchez Ch. Effect of magnetic stirring, grain modification and refinement on the solidification structure of an A356 aluminum alloy. *Revista Materia*. 2021;26(1):1–16. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210001.1227>
 23. Moustafa E., Mosleh A. Effect of (Ti – B) modifier elements and FSP on 5052 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;823:153–745. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153745>
 24. Ding H., Liu X., Yu L., Zhao G. The influence of forming processes on the distribution and morphologies of TiC in Al – Ti – C master alloys. *Scripta Materialia*. 2007;57(7):575–578.
 25. Titova Yu.V., Maidan D.A., Timoshkin I.Yu. Study of the introduction of aluminum nitride nanopowder grade SVS-Az into the aluminum melt for the ex-situ preparation of Al – (1 – 10 %) AlN composites. *Современные материалы, техника и технологии*. 2017;6(14):138–144. EDN: ZXYAYX. (In Russ.).
 26. Panteleeva A.V., Nikonova R.M. Modification of aluminum with strengthening phases TiB₂ and TiC by the SHS method in the melt. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. 2019; 21(1):65–69. EDN: WYLFWL. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.15350/17270529.2019.1.9>
 27. Sychev A.E., Merzhanov A.G. Self-propagating high-temperature synthesis of nanomaterials. *Uspekhi khimii*. 2004; 73(2):157–170. (In Russ.).
 28. Nikitin K.V., Nikitin V.I., Chernikov D.G. Hereditary influence of magnalia structure on their deformability during cold rolling. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2014;6:13–15. EDN: TKKCTT. (In Russ.).
 29. Bayoumy D., Wu X., Zhu Yu., Kan W., Huang A. The latest development of Sc-strengthened aluminum alloys by laser powder bed fusion. *Elsevier Ltd*. 2023;149:1–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2022.11.028>
 30. Xiao W., Xu C. Synergistic effects of Gd and Zr on grain refinement and eutectic Si modification of Al – Si cast alloy. *Materials Science & Engineering A*. 2017. 693:93–100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.097>
 31. Znamenskii L.G., Ivochkina O.V., Rechkalov I.V. Refining and modification of alloys with recycled nanostructured materials. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Metallurgiya»*. 2015;15(4):68–72. EDN: VAVXUT. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.14529/met150409>
 32. Elshalakany A.B., Osman T., Khattab A., Azzam B.S., Zaki M. Microstructure and Mechanical Properties of MWCNTs Reinforced A356 Aluminum Alloys Cast Nanocomposites Fabricated by Using a Combination of Rheocasting and Squeeze Casting Techniques. *Journal of Nanomaterials*. 2014;5:1–14. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/386370>
 33. Nikitin V.I., Nikitin K.V. Development and application of the phenomenon of structural heredi-

ty in aluminum alloys. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*. 2014;7(14):424–429. (In Russ.).

34. Amosov E.A. On the modification of aluminum alloys. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty*. 2013; 4:123–128. EDN: REBIOZ. (In Russ.).
35. Nikitin V.I., Nikitin K.V. The problem of heredity of charge materials in light alloy technologies: history, status, prospects. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2020;2:21–35. EDN: TUSYKT. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Мария Хосе Нориега Флорес, аспирант кафедры Обработка металлов давлением и материаловедения. *ЕВРАЗ ЗСМК*, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: cereso13@hotmail.es
ORCID: 0009-0001-2475-1349

Ирина Владимировна Строкина, к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением *ЕВРАЗ ЗСМК*, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: strokina_iv@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-3719-8949
SPIN-код: 3928-1409

Арина Денисовна Трофимова, лаборант УНИ, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: arinaatrva/053@mail.ru
ORCID: 0009-0008-5441-2381

Виталий Сергеевич Маринич, лаборант УНИ, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: marinich_vs@mail.ru
ORCID: 0009-0000-5083-6226

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660
SPIN-код: 4391-7210

Information about the authors:

Mariya Khose Noriega Flores, Postgraduate student of the D Department of Metal Forming, *EVRAZ ZSMK*, Siberian State Industrial University
E-mail: cereso13@hotmail.es
ORCID: 0009-0001-2475-1349

Irina V. Strokina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor Department of Metal Forming, *EVRAZ ZSMK*, Siberian State Industrial University
E-mail: strokina_iv@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0003-3719-8949
SPIN-код: 3928-1409

Arina D. Trofimova, UNI Laboratory Assistant, Siberian State Industrial University
E-mail: arinaatrva/053@mail.ru
ORCID: 0009-0008-5441-2381

Vitaly S. Marinich, UNI Laboratory Assistant, Siberian State Industrial University
E-mail: marinich_vs@mail.ru
ORCID: 0009-0000-5083-6226

Sergei V. Konovalov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial 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 22.05.2025
После доработки 04.06.2025
Принята к публикации 08.06.2025

Received 22.05.2025
Revised 04.06.2025
Accepted 08.06.2025

Оригинальная статья

УДК 336.67

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-118-127

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АНАЛИЗА РАЗВИТИЯ МАЛОГО И СРЕДНЕГО
ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА В РФ В РЕГИОНАЛЬНОМ РАЗРЕЗЕ**

© 2025 г. Д. Ю. Бобошко, М. С. Коняхин

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Традиционно анализ развития сектора малого и среднего предпринимательства (МСП) в РФ опирается на данные Росстата, которые имеют временной лаг (как правило два года), что не позволяет отслеживать динамичные изменения рассматриваемого сектора экономики. Субъекты МСП в силу масштаба бизнеса наиболее подвержены изменениям внешней сред, и это необходимо отслеживать в динамике. Обоснована необходимость мониторинга изменений сектора МСП, которая обуславливается его значительной ролью в экономическом развитии регионов. Для исследования изначально использовали данные Федеральной службы государственной статистики, но их двухлетнее отставание в отображении текущего состояния малого и среднего бизнеса в РФ потребовало формирования актуальной базы данных, что было сделано на основе Единого реестра субъектов МСП. Актуальные данные для анализа сектора МСП в разрезе регионов и видов деятельности были сформированы благодаря реализации проекта научного волонтерства «Экономика регионов: шаг к развитию» на платформе Добро.рф. В рамках проекта были собраны статистические данные динамики количества субъектов МСП по 85 регионам и 19 группам видов деятельности за четыре года. Для автоматизированного сбора данных был разработан специальный парсер на языке PHP. Основными результатами проведенного исследования стало выявление неоднородности развития МСП, обнаружение случаев фиктивной миграции бизнеса в регионы с льготными налоговыми условиями, а также создание базы данных для дальнейшего исследования развития малого и среднего бизнеса в региональном разрезе. Мониторинг изменений сектора МСП в режиме реального времени позволит корректировать меры государственной поддержки и адаптироваться к локальным условиям, предотвращая негативные экономические последствия.

Ключевые слова: малое и среднее предпринимательство, региональное развитие, реестр субъектов, меры поддержки малого бизнеса

Благодарность. Авторы выражают благодарность Долгополову Сергею Юрьевичу, научному волонтеру, который внес наиболее значимый вклад в сбор информации о количестве субъектов МСП, автоматизировав этот процесс написанием парсера, что дало возможность в краткие сроки сформировать достоверную статистическую базу.

Для цитирования: Бобошко Д.Ю., Коняхин М.С. Совершенствование анализа развития малого и среднего предпринимательства в РФ в региональном разрезе. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):118–127. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-118-127](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-118-127)

Original article

**IMPROVING THE ANALYSIS OF SMALL AND MEDIUM
ENTREPRENEURSHIP DEVELOPMENT IN THE RUSSIAN FEDERATION
IN THE REGIONAL CONTEXT**

© 2025 D. Y. Boboshko¹, M. S. Konyahin²

National University of Science and Technology "MISIS" (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

Abstract. Traditionally, the analysis of the development of the small and medium-sized enterprises (SMEs) sector in the Russian Federation is based on Rosstat data, which has a time lag (at least two years), which does not allow tracking dynamic changes in the considered sector of the economy. Due to the scale of the business, SMEs are most susceptible to changes in the external environment, and this needs to be monitored over time. The need to monitor changes in the SME sector, which is conditioned by its significant role in the economic development of the regions, is justified. The data from the Federal State Statistics Service was initially used for the study, but their two-year lag in displaying the current state of small and medium-sized businesses in the Russian Federation required the formation of an up-to-date database, which was done on the basis of the Unified Register of SMEs. Current data for the analysis of the SME sector by region and type of activity were generated through the implementation of the scientific volunteering project "Regional Economy: a Step towards Development" on the Dobro.rf platform. The project collected statistical data on the dynamics of the number of SME entities in 85 regions and 19 groups of activities over four years. A special parser in PHP has been developed for automated data collection. The main results of the study were the identification of heterogeneity in the development of SMEs, the detection of cases of fictitious migration of businesses to regions with preferential tax conditions, as well as the creation of a database for further research on the development of small and medium-sized businesses in the regional context. Monitoring changes in the SME sector in real time will allow adjusting government support measures and adapting to local conditions, preventing negative economic consequences.

Keywords: small and medium-sized enterprises, regional development, register of subjects, measures to support small businesses

Acknowledgements. The authors express their gratitude to Sergey Dolgoplov, a research volunteer who made the most significant contribution to the collection of information on the number of SMEs by automating this process by writing a parser, which made it possible to form a reliable statistical database in a short time.

For citation: Boboshko D.Y., Konyahin M.S. Improving the analysis of small and medium entrepreneurship development in the Russian Federation in the regional context. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):118–127. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-118-127](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-118-127)

Введение

Анализ развития малого и среднего предпринимательства (МСП) в региональном разрезе представляет собой одну из наиболее актуальных задач современной экономической науки [1 – 4]. Это обусловлено тем, что МСП играет фундаментальную роль в обеспечении занятости населения, формировании налоговой базы, развитии инноваций и поддержании устойчивого экономического роста [5 – 7]. При этом характеристики развития сектора существенно различаются между регионами РФ: от приоритетного развития малого бизнеса до полной концентрации экономического потенциала в крупных предприятиях и бюджетном секторе [8].

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики, доля МСП в валовом региональном продукте (ВРП) в среднем варьи-

руется от 10 до 40 %, при этом в отдельных регионах (НАО, ЯНАО, ХМАО, Республике Коми и Чукотском автономном округе) в 2022 г. этот показатель был ниже 10 %, что подчеркивает значительную неоднородность региональных экономических систем [9]. В условиях глобальных экономических вызовов (пандемия COVID-19 и геополитическая нестабильность) малый бизнес стал особенно чувствительным к внешним шокам [10]. Эти факторы делают актуальным изучение механизмов поддержки МСП на региональном уровне с учетом специфики локальных условий. Анализ развития малого бизнеса в региональном разрезе становится не только научной задачей, но и практической необходимостью для формирования эффективной государственной политики.

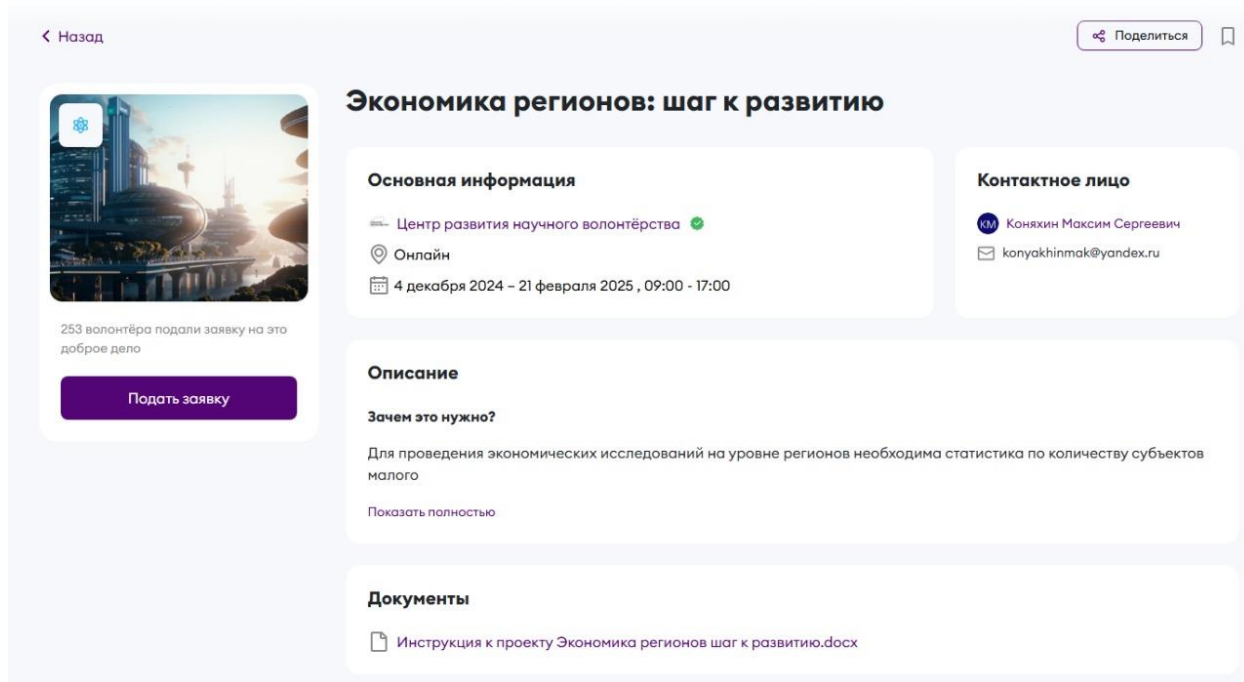


Рис. 1. Страница проекта научного волонтерства «Экономика регионов: шаг к развитию»
Fig. 1. The page of the scientific volunteering project "Regional Economy: a step towards development"

В настоящей работе проанализированы показатели, которые используются для оценки развития сектора МСП, что позволило разделить их на несколько групп. Ниже представлен перечень показателей:

1. Экономические показатели (доля МСП в ВРП региона и занятых в малом и среднем бизнесе; среднемесячная заработная плата работников малых предприятий; объем кредитования МСП и уровень долговой нагрузки; занятость в неформальном секторе).

2. Инновационные показатели (численность работников, выполнявших научные исследования и разработки малых предприятий; количество малых инновационных компаний; объем внутренних затрат на ИР, выполненных собственными силами малых предприятий; удельный вес малых предприятий, осуществляющих инновационную деятельность).

3. Институциональные показатели (количество программ государственной поддержки; наличие инфраструктурных объектов (технопарков, индустриальных парков); уровень доступности финансовых ресурсов для малого бизнеса; региональные особенности применения специальных налоговых режимов для малого бизнеса и налоговые льготы).

4. Социально-демографические показатели (уровень предпринимательской активности (отношение числа МСП к численности экономически активного населения); доля городского населения в общем населении региона; половозрастной состав населения).

Эти показатели позволяют провести комплексный анализ состояния МСП с учетом региональной специфики и выявить силу их влияния на его развитие. Основными источниками данных для анализа являются официальные данные Федеральной службы государственной статистики, данные Банка России, Единый реестр субъектов МСП и материалы региональных органов власти [9; 11]. Однако такие данные имеют определенные ограничения, связанные с временным лагом и неполнотой информации.

Например, данные Федеральной службы государственной статистики по МСП публикуются с задержкой в 1 – 2 года, что снижает их оперативность и актуальность [12 – 14]. В настоящей работе был расширен набор используемых для анализа сектора малого и среднего предпринимательства показателем (динамика количества субъектов МСП в региональном разрезе по видам деятельности).

Для того, чтобы собрать статистику в динамике по 85 регионам и 19 группам видов деятельности был запущен проект научного волонтерства, что позволило получить оперативные данные из Реестра субъектов малого и среднего предпринимательства.

Материалы и методы исследования

Проект «Экономика регионов: шаг к развитию» (рис. 1) был создан на платформе Добро.рф в рамках направления Научного волонтерства [15]. Период реализации проекта 04.12.2024 – 21.02.2025 гг. Целью проекта был сбор статис-

тики по количеству субъектов МСП в региональном разрезе по видам деятельности на 10 января каждого года, начиная с 2021 г. Вследствие отсутствия подобной информации в открытых источниках сбор информации проводился посредством индивидуальных запросов на сайте Единого реестра субъектов МСП.

Волонтеры получали шаблон таблицы с разделением по годам и категориям субъектов МСП и набор настроек в виде определенного региона и раздела видов экономической деятельности (согласно ОКВЭД), по которым следует проводить поиск. Волонтеры проводили 12 индивидуальных поисков в рамках одного задания (четыре года и три категории). Необходимо было на сайте настроить параметры для каждого поиска: регион, дата, категория предприятия и набор видов деятельности.

Полученная в итоге таблица представляла собой набор данных о количестве субъектов МСП в определенном регионе, относящихся к определенному разделу видов деятельности. В проекте приняло участие 36 волонтеров, заполнивших более 2000 таблиц. В рамках проекта был создан парсер для оперативного получения всех необходимых данных, с помощью которого был завершен сбор данных за четыре года и полностью собраны данные за пятый год.

Парсер – программное обеспечение (скрипт или целый набор скриптов на одном или нескольких языках программирования), предназначенное для автоматизированного сбора и обработки общедоступной информации из различных источников. Парсеры можно сравнить с ручной работой человека, который обращается к источнику информации, собирает ее, обрабатывает и, возможно, хранит.

Однако парсеры предназначены не только для более быстрого сбора и обработки информации, но и для совершения меньшего числа ошибок. Ввиду отсутствия в открытом доступе парсеров, позволяющих осуществить индивидуальную настройку для получения данных с сайта rmsp.nalog.ru, в рамках проекта был разработан свой парсер и веб-интерфейс для взаимодействия с ним.

Веб-интерфейс включает в себя три элемента:

1 – поле для загрузки файла: необходимо загружать подготовленный шаблон *xlsx*-файла региона, в который в дальнейшем будут сохранены результаты работы парсера;

2 – выпадающий список регионов, имеющий возможность поиска по названию;

3 – кнопка «Отправить»: передает данные парсеру на обработку.

Для рассматриваемого проекта парсер был написан на языке программирования PHP, кото-

рый является узкоспециализированным языком и применяется специально для разработки веб-сайтов.

Для работы парсера необходимо следующее:

1. PHP версии 8.3 или выше.

2. Менеджер зависимостей Composer, который отвечает за установку и обновление библиотек в проекте.

3. Библиотека с открытым исходным кодом Guzzle, которая отвечает за отправку запросов к rmsp.nalog.ru.

4. Библиотека с открытым исходным кодом PhpSpreadsheet, которая выполняет открытие загруженного в веб-интерфейсе *xlsx*-файла и сохраняет в него данные, полученные во время работы парсера.

После отправки данных через веб-интерфейс, они передаются парсеру. Он объединяет статические данные, например, даты, за которые необходимо получить информацию, и коды ОКВЭД с кодом региона, полученного из выпадающего списка в веб-интерфейсе, а затем отправляет их по адресу <https://rmsp.nalog.ru/search-proc.json>. Эти данные являются фильтром, который применяется на самом сайте rmsp.nalog.ru при работе вручную. Ответ приходит в формате JSON (формат представления данных), парсер извлекает из полученного ответа значение поля, в котором указано количество строк, и устанавливает это значение в соответствующие ячейки в *xlsx*-файле. После заполнения файла в веб-интерфейсе появляется сообщение о завершении работы парсера с переданным файлом.

Перед основным использованием парсер проходил несколько полных ручных проверок для разных регионов, кодов ОКВЭД и разных дат, чтобы убедиться в правильности заполнения данных и отсутствия пропусков.

В результате проделанной работы были получены данные за пять лет в формате, представленном на рис. 2.

По каждому региону такие данные собраны на 10 января 2021 – 2025 гг. (дата ежемесячной публикации данных Реестром МСП).

Основные результаты

Сформированная в результате реализации проекта научного волонтерства база данных дает широкие возможности для оперативного анализа сектора малого и среднего предпринимательства. Идея создания таких хранилищ информации в региональном разрезе возникла в тот момент, когда, работая с данными Росстата в 2025 г., имели доступ к данным только за 2022 г. В сегодняшней динамике изменений делать анализ на представленных данных крайне пробле-

Тип субъекта МСП	Группы видов деятельности по ОКВЭД																			
	A	B	C1	C2	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
Микро-предприятие	1416	246	3276	1279	132	276	6245	25208	7123	2400	2127	436	4621	5407	2827	20	893	906	965	3525
Малое предприятие	69	34	256	64	31	31	219	606	178	127	54	18	235	132	217	4	2	93	13	16
Среднее предприятие	11	4	42	5	13	12	14	47	15	1	0	4	7	5	12	1	0	4	0	0

A. Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство	K. Деятельность финансовая и страховая
B. Добыча полезных ископаемых	L. Деятельность по операциям с недвижимым имуществом
C. Обрабатывающие производства	M. Деятельность профессиональная, научная и техническая
D. Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха	N. Деятельность административная и сопутствующие дополнительные услуги
E. Водоснабжение; водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений	O. Государственное управление и обеспечение военной безопасности; социальное обеспечение
F. Строительство	P. Образование
G. Торговля оптовая и розничная; ремонт автотранспортных средств и мотоциклов	Q. Деятельность в области здравоохранения и социальных услуг
H. Транспортировка и хранение	R. Деятельность в области культуры, спорта, организации досуга и развлечений
I. Деятельность гостиниц и предприятий общественного питания	S. Предоставление прочих видов услуг
J. Деятельность в области информации и связи	

Рис. 2. Количество субъектов МСП на 10.01.2025 г. в Кемеровской обл.

Fig. 2. Number of SMEs as of 10.01.2025 in the Kemerovo Region

матично. Например, динамика регионального ВРП от торговли (сектор, где занято наибольшее количество субъектов МСП [5; 16; 17]) в 2022 г. по отношению к 2021 г. в регионах была крайне неоднородной (рис. 3), чем вызывала исследовательский интерес.

При средней отрицательной динамике в –6,55 % по стране и падении показателя на 12,02 % в Москве наблюдается значительный рост в неожиданных регионах. Исследовать этот феномен позволила сформированная база по темпам прироста субъектов МСП в регионах. На рис. 4 представле-

на динамика роста количества зарегистрированных в Реестре МСП организаций и индивидуальных предпринимателей, занятых в торговле.

Если регионы со стабильным экономическим положением (Кемеровская обл.) показывают равномерную динамику рассматриваемых показателей, то результаты регионов-лидеров требуют отдельного внимания, прежде всего с точки зрения тиражирования лучших практик. Однако более глубокий анализ показал, что общей мерой в стимулировании малого бизнеса в анализируемых регионах являются низкие ставки по

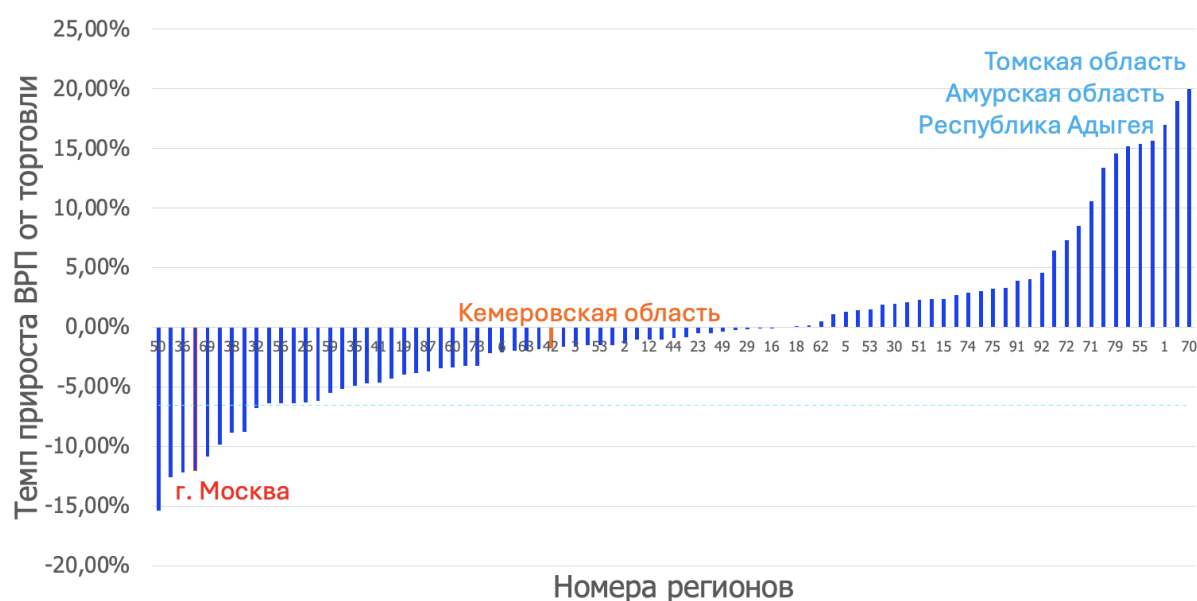


Рис. 3. Темп прироста ВРП от торговли в 2022 г. по отношению к 2021 г.

Fig. 3. Growth rate of GRP from trade in 2022 compared to 2021

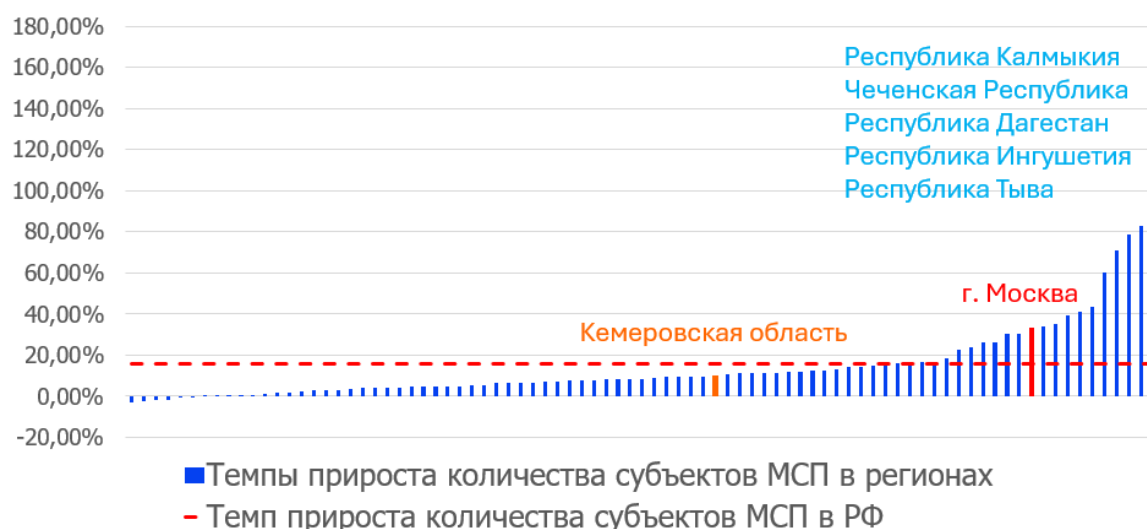


Рис. 4. Изменение количества зарегистрированных субъектов МСП в регионах РФ, занятых в торговле на 10.01.2025 г. к данным на 10.01.2021 г.

Fig. 4. Change in the number of registered SMEs in the regions of the Russian Federation engaged in trade as of 10.01.2025 compared to the data as of 10.01.2021

упрощенной системе налогообложения (УСН) [18], наиболее часто используемому режиму налогообложения малым бизнесом в торговле [19]. Фактически были созданы внутренние офшоры, чему способствовало развитие интернет-торговли через маркетплейсы [20 – 22]. Не имея физических активов бизнес перерегистрировался в низконалоговых регионах формально оставаясь в правовом поле.

В конце 2024 г. изменения в налоговом законодательстве коснулись фиктивной миграции бизнеса [23], чем, собственно, и является перерегистрация в низконалоговых регионах без смены фактического нахождения индивидуального предпринимателя или организации [24 – 26]. С 2025 г. при перерегистрации в другой регион плательщики налога при УСН будут уплачивать его по ставкам того региона, откуда было перемещение, если ставки там были выше.

Такие явления как возникновение внутренних офшоров важно отслеживать в режиме реального времени. Отметим, что в октябре 2024 г. были внесены поправки в Налоговый кодекс РФ, которые исключили возможность снижения налоговой нагрузки субъектами МСП, применяющих УСН, путем перерегистрации в других регионах. Так в статье 346.21 НК РФ появилось условие применения в течение 3-х лет ставок того региона, в котором бизнес был зарегистрирован до смены регистрации организации или места жительства индивидуального предпринимателя, если в новом регионе ставки УСН ниже ранее применявшихся [27]. Сформированная база данных о динамике количества субъектов МСП в региональном разрезе по группам ОКВЭД, ко-

торая будет обновляться в дальнейшем, позволит оперативно отслеживать региональные диспропорции в развитии малого бизнеса и выявлять как лучшие практики, так и слабые места в действующем законодательстве.

Выводы

Оперативное отслеживание изменений в сфере МСП является критически важным для своевременной корректировки мер государственной поддержки, минимизации негативных последствий экономических шоков и недобросовестной конкуренции в региональной политике. Это обусловлено следующими факторами:

1. Высокая чувствительность малого бизнеса к экономическим шокам. Изменения в секторе МСП отражают общие тенденции в экономике с лагом около года. Например, во время пандемии COVID-19 многие малые предприятия столкнулись с серьезными трудностями, что потребовало экстренного вмешательства государства.

2. Необходимость адаптации мер поддержки. Эффективность государственных программ зависит от их соответствия текущей ситуации в регионе. Например, регионы с высокой долей производственных предприятий требуют иных мер поддержки, чем регионы с преобладанием торгового сектора.

3. Значимость локальных условий. Особенности развития МСП в каждом регионе требуют постоянного мониторинга и анализа. Перенос успешных практик из «лидирующих» регионов в отстающие может стать эффективным инструментом повышения конкурентоспособности малого бизнеса.

4. Предотвращение возникновения внутренних офшоров. Резкий рост количества субъектов МСП в отдельных регионах должен быть предметом оперативного анализа действующего законодательства, которое дает возможность на уровне региона предоставлять снижение налоговой нагрузки на малый бизнес при отсутствии надлежащего налогового администрирования, что в итоге приводит к фиктивной миграции бизнеса.

Анализ развития малого бизнеса в региональном разрезе является необходимым инструментом для разработки эффективной политики поддержки сектора и обеспечения устойчивого экономического развития страны в целом. Для повышения качества анализа требуется использовать комплексный подход, включающий широкий спектр показателей, а также совершенствовать методы сбора и обработки данных. Оперативное отслеживание изменений в сфере МСП позволит своевременно реагировать на вызовы и создавать условия для роста малого бизнеса в каждом регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баринова В.А., Земцов С.П., Царева Ю.В. Малое и среднее предпринимательство в России и регионах в 2019–2020 гг. В кн.: *Российская экономика в 2019 году. Тенденции и перспективы*. Москва: Изд-во Института Гайдара. 2023:116.
2. Игнатова И.В., Игнатов Е.С. Развитие предпринимательства в регионе: факторы и проблемы. *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. 2017;10(5):143–157.
<https://doi.org/10.15838/esc.2017.5.53.10>
3. Земцов С.П., Бабулин В.Л. Предпринимательские экосистемы в регионах России. *Региональные исследования*. 2019;2(46):4–14.
4. Жура С.Е., Фоменко Н.М., Маркин В.В., Вакурова О.А. *Государственное регулирование развития малого бизнеса: инновационный аспект*. Ростов-на-Дону: ИП Беспмятников С.В., 2023:149.
5. Verma S., Shome S., Hassan M.K. FinTech in Small and Medium Enterprises (SMEs): A review and future research agenda. *European Management Journal*. 2023;41(6):950–971.
<https://doi.org/10.1016/j.emj.2023.07.003>
6. Архипова М.Ю., Червякова А.А. Роль малых предприятий обрабатывающей промышленности в инновационном развитии реального сектора экономики: экономико-статистическое исследование. *Вопросы статистики*. 2022;29(3):26–45.
<https://doi.org/10.34023/2313-6383-2022-29-3-26-45>
7. Бобошко Д.Ю., Бондаренко В.С. Анализ мер государственной поддержки инновационной деятельности субъектов малого и среднего предпринимательства в РФ. *Государственная власть и местное самоуправление*. 2023;7:28–32.
<https://doi.org/10.18572/1813-1247-2023-7-28-32>
8. Бекарева С.В., Черненко А.О. Факторы, определяющие вклад малого и среднего бизнеса в экономику регионов России. *Вестник Омского университета. Серия «Экономика»*. 2024;22(2):94–104.
[https://doi.org/10.24147/1812-3988.2024.22\(2\).94-104](https://doi.org/10.24147/1812-3988.2024.22(2).94-104)
9. *Росстат. Малое и среднее предпринимательство в России*. 2022: Стат. сб. Москва, 2022:101.
10. Земцов С.П., Михайлов А.А. Тенденции и факторы развития малого и среднего бизнеса в регионах России в период коронакризиса. *Экономическое развитие России*. 2021;28(4):34–45.
11. Единый реестр субъектов малого и среднего предпринимательства. – URL: <https://ofd.nalog.ru/index.html> (дата обращения 05.03.2025).
12. Астахов А.М. «Границы» малого бизнеса. Динамика развития предпринимательства в России в 2010 – 2020 годах. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Социология. Педагогика. Психология*. 2022;8(74)((4)):3–16.
13. Мазилев Е.А., Кремин А.Е. Роль малого бизнеса в социально-экономическом развитии российских регионов: проблемы и тенденции. *Проблемы развития территории*. 2018;2(94):7–18.
14. Васильев А.В., Васильева А.В. Сравнительный анализ доли малого и среднего бизнеса в ВРП регионов России за 2019–2021 гг. *Стратегия устойчивого развития в антикризисном управлении экономическими системами: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции*. Донецк: Донецкий национальный технический университет. 2024:226–232.
15. Добро.рф. Добрые дела. Экономика регионов: шаг к развитию. URL: <https://dobro.ru/event/10979448> (дата обращения 05.03.2025).
16. Коняхин М.С., Варзина И.А., Бобошко Д.Ю. Анализ потенциального влияния создания транспортной речной инфраструктуры на развитие малых городов в РФ. *Вестник МИРБИС*. 2024;4(40):96–104.
<https://doi.org/10.25634/MIRBIS.2024.4>

17. Абзалилов С.Н., Бабина Е.Н., Безпалова А.Г. и др. *Теоретические и методологические основы анализа и моделирования пространственного развития экономики России: ускорение темпов экономического роста и технологического развития*. Самара: НИЦ ПНК. 2025;270.
18. Упрощенная система налогообложения. Ставки налога, установленные в субъектах РФ на налоговый период 2024 года. Кон-турНорматив. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=41&documentId=250067#h487> (дата обращения 05.03.2025).
19. Бобошко Д.Ю., Кулапова А.А. Сравнение доступности льготных режимов налогообложения субъектам малого и среднего предпринимательства в разных странах. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2024;8(5(146)):214–221. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.05.08.026>
20. Boboshko D., Treistar D., Kulapova A. Theoretical Aspects of Formation of the Concept of «Banking Ecosystem». Opportunities and Challenges. In: Proceedings of the Third International Conference, Kaliningrad. 2024;1092:47–56. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67354-2_6
21. Hussain A., Shahzad A., Hassan R. Organizational and environmental factors with the moderate role of e-commerce and the performance indicators of small and medium enterprises. *Journal of Open Innovation: Technology, Market and Complexity*. 2020;6(4). <https://doi.org/10.3390/joitmc6040196>
22. Бобошко Д.Ю. Цифровые экосистемы и их роль в развитии малого и среднего предпринимательства в РФ. *Экономика и управление инновациями*. 2023;2(25):22–30. <https://doi.org/10.26730/2587-5574-2023-2-22-30>
23. Федеральный закон от 12 июля 2024 г. № 176-ФЗ «О внесении изменений в части первую и вторую налогового кодекса Российской Федерации, отдельные законодательные акты Российской Федерации и признании утратившими силу отдельных положений законодательных актов Российской Федерации». КонсультантПлюс: справочно-правовая систем. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_480697/ (дата обращения 10.03.2025).
24. Синенко О.А. Миграция налогоплательщиков в территории с особым экономическим статусом Дальнего Востока. *Известия Дальневосточного федерального университета. Экономика и управление*. 2021;4(100):39–50. <https://doi.org/10.24866/2311-2271/2021-4/39-50>
25. Миронова С.М., Сулейманов Ч.К. Миграция бизнеса внутри России: налогово-правовые последствия (на примере УЧН). *Финансовое право*. 2025;1:16–18. <https://doi.org/10.18572/1813-1220-2025-1-16-18>
26. Kazenin, K. Small Business in the Republics of North Caucasus: Risks Amid the Pandemic and Ways to Reduce Them. *Monitoring of Russia's Economic Outlook. Trends and Challenges of Socio-Economic Development*. Moscow. IEP. 2020;18:12–14.
27. Бобошко Д.Ю., Кузьмич А.И. Анализ региональных аспектов налоговой политики как фактора поддержки малого бизнеса. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2025;3(5):148–155. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.03.05.016>

REFERENCES

1. Barinova V.A., Zemtsov S.P., Tsareva Yu.V. Small and medium-sized businesses in Russia and regions in 2019–2020. *Russian Economy in 2019. Trends and Prospects*. Moscow: Izdatel'stvo Instituta Gaidara. 2023;116. (In Russ.).
2. Ignatova I.V., Ignatov E.S. Development of entrepreneurship in the region: factors and problems. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz*. 2017;10(5):143–157. (In Russ.). <https://doi.org/10.15838/esc.2017.5.53.10>
3. Zemtsov S.P., Baburin V.L. Entrepreneurial ecosystems in the regions of Russia. *Regional'nye issledovaniya*. 2019;2(46):4–14. (In Russ.).
4. Zhura S.E., Fomenko N.M., Markin V.V., Vakurova O.A. *State regulation of children's business development: innovative aspect*. Rostov-on-Don: IP Bespamyatnov S.V., 2023:149. (In Russ.).
5. Verma S., Shome S., Hassan M.K. FinTech in Small and Medium Enterprises (SMEs): A review and future research agenda. *European Management Journal*. 2023;41(6):950–971. <https://doi.org/10.1016/j.emj.2023.07.003>
6. Arkhipova M.Yu., Chervyakova A.A. The role of small enterprises in the manufacturing industry in the innovative development of the real sector of the economy: an economic and statistical study. *Voprosy statistiki*. 2022;29(3):26–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.34023/2313-6383-2022-29-3-26-45>
7. Boboshko, D.Yu., Bondarenko V.S. Analysis of measures of state support for innovative activities of small and medium-sized businesses in the Russian Federation. *Gosudarstvennaya vlast' i mestnoe samoupravlenie*. 2023;7:28–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.18572/1813-1247-2023-7-28-32>

8. Bekareva S.V., Chernenko A.O. Factors determining the contribution of small and medium-sized businesses to the economy of Russian regions. *Vestnik Omskogo universiteta. Seriya «Ekonomika»*. 2024;22(2):94–104. (In Russ.). [https://doi.org/10.24147/1812-3988.2024.22\(2\).94-104](https://doi.org/10.24147/1812-3988.2024.22(2).94-104)
9. Rosstat. Small and medium-sized businesses in Russia. 2022: *Stat. sb.* Moscow, 2022:101. (In Russ.).
10. Zemtsov S.P., Mikhailov A.A. Trends and factors of development of small and medium-sized businesses in the regions of Russia during the coronavirus crisis. *Ekonomicheskoe razvitie Rossii*. 2021;28(4):34–45. (In Russ.).
11. Unified register of small and medium-sized businesses URL: <https://ofd.nalog.ru/index.html> (accesses: 05.03.2025) (In Russ.).
12. Astakhov A.M. «Boundaries» of small business. Dynamics of development of entrepreneurship in Russia in 2010–2020. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Sotsiologiya. Pedagogika. Psikhologiya*. 2022;8(74)((4)):3–16. (In Russ.).
13. Mazilov E.A., Kremin A.E. The role of small business in the socio-economic development of Russian regions: problems and trends. *Problemy razvitiya territorii*. 2018;2(94):7–18. (In Russ.).
14. Vasil'ev A.V., Vasil'eva A.V. Comparative analysis of the share of small and medium-sized businesses in the GRP of Russian regions for 2019 – 2021. *Strategiya ustoichivogo razvitiya v antikrizisnom upravlenii ekonomicheskimi sistemami: Materialy VIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Donetsk: Donetskii natsional'nyi tekhnicheskii universitet. 2024:226–232. (In Russ.).
15. Dobro.rf. Good deeds. Regional economy: a step towards development. URL: <https://dobro.ru/event/10979448> (In Russ.).
16. Konyakhin M.S., Varzina I.A., Boboshko D.Yu. Analysis of the potential impact of the creation of river transport infrastructure on the development of small towns in the Russian Federation. *Vestnik MIRBIS*. 2024;4(40):96–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.25634/MIRBIS.2024.4>
17. Abzalilov S.N., Babina E.N., Bezpalova A.G. etc. Theoretical and methodological foundations of analysis and modeling of spatial development of the Russian economy: acceleration of economic growth and technological development: Monograph. Samara: NITs PNK. 2025:270. (In Russ.).
18. Simplified taxation system. Tax rates established in the constituent entities of the Russian Federation for the tax period of 2024. (In Russ.). KonturNormativ. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=41&documentId=250067#h487> (accesses: 05.03.2025)
19. Boboshko D.Yu., Kulapova A.A. Comparison of the availability of preferential tax regimes for small and medium-sized businesses in different countries. *Economy and management: problems, solutions*. 2024; 8, 5(146):214–221. (In Russ.). <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.05.08.026>
20. Boboshko D., Treistar D., Kulapova A. Theoretical Aspects of Formation of the Concept of «Banking Ecosystem». *Ecosystems Without Borders 2024: Opportunities and Challenges* (The series "Lecture Notes in Networks and Systems"): Proceedings of the Third International Conference, Kaliningrad, 2024:1092:47–56. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67354-2_6
21. Hussain A., Shahzad A., Hassan R. Organizational and environmental factors with the moderate role of e-commerce and the performance indicators of small and medium enterprises. *Journal of Open Innovation: Technology, Market and Complexity*. 2020; 6(4). <https://doi.org/10.3390/joitmc6040196>
22. Boboshko D.Yu. Digital ecosystems and their role in the development of small and medium-sized businesses in the Russian Federation. *Economy and innovation management*. 2023; 2(25):22–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/2587-5574-2023-2-22-30>
23. Federal Law of July 12, 2024 No. 176-FZ «On Amendments to Parts One and Two of the Tax Code of the Russian Federation, Certain Legislative Acts of the Russian Federation and Recognizing Certain Provisions of Legislative Acts of the Russian Federation as Invalid». Consultant-Plus: reference and legal system. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_480697/ (accesses: 10.03.2025) (In Russ.).
24. Sinenko O.A. Migration of taxpayers to territories with special economic status of the Far East. *Izvestiya Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. Ekonomika i upravlenie*. 2021;4(100):39–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.24866/2311-2271/2021-4/39-50>
25. Mirinova S.M., Suleimanov Ch.K. Migration of business within Russia: tax and legal consequences (using the simplified tax system as an example). *Finansovoe pravo*. 2025;1:16–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.18572/1813-1220-2025-1-16-18>
26. Kazenin, K. Small Business in the Republics of North Caucasus: Risks Amid the Pandemic and Ways to Reduce Them. *Monitoring of Russia's Economic Outlook. Trends and Challenges of Socio-Economic Development*. Moscow. IEP. 2020;18:12–14. (In Russ.). <https://ssrn.com/abstract=3729229>
27. Boboshko D.Yu., Kuzmich A.I. Analysis of regional aspects of tax policy as a factor in supporting

small businesses. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*. 2025;3(5):148–155. (In Russ.). <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.03.05.016>

Сведения об авторах:

Диана Юрьевна Бобошко, к.э.н., доцент кафедры экономики, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

E-mail: boboshko.dy@misis.ru

ORCID 0000-0003-3418-2976

SPIN-код: 6810-3215

Максим Сергеевич Коняхин, студент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

E-mail: m2204726@edu.misis.ru

ORCID 0009-0004-9497-6684

SPIN-код: 3331-4438

Information about the authors:

Diana Y. Boboshko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Economics, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: boboshko.dy@misis.ru

ORCID 0000-0003-3418-2976

SPIN-код: 6810-3215

Maxim S. Konyakhin, Student, University of Science and Technology MISIS

E-mail: m2204726@edu.misis.ru

ORCID 0009-0004-9497-6684

SPIN-код: 3331-4438

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 20.05.2025

После доработки 02.06.2025

Принята к публикации 11.06.2025

Received 20.05.2025

Revised 02.06.2025

Accepted 11.06.2025

Оригинальная статья

УДК 65.012.123:338.27:336.64

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-128-139

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БАНКРОТСТВА
ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО АНТИКРИЗИСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ**

© 2025 г. Т. А. Буйвис, Е. В. Иванова, А. А. Касацкая

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

Аннотация. В настоящее время вопрос выбора методики прогнозирования банкротства для предприятий по-прежнему остается актуальным. Это обусловлено тем, что для своевременного реагирования на появившиеся признаки ухудшения финансового состояния организации антикризисным управляющим необходимы эффективные методы прогнозирования, позволяющие не только выявить риск угрозы банкротства, но и определить комплекс мер по предотвращению реализации рассматриваемого риска или по минимизации его последствий. Несмотря на наличие большого количества методик, позволяющих прогнозировать наступление банкротства, в этой области остается много проблем. Существующие методики анализа финансовой отчетности на предмет выявления признаков банкротства отличаются друг от друга целями и задачами анализа, информационной базой, объемом работы, сложностью расчетов, оперативностью решения аналитических и управленческих задач и другими условиями. Кроме того, как показывает опыт практических расчетов, далеко не все существующие в настоящее время методики прогнозирования возможного банкротства предприятия заслуживают доверия. Практический опыт свидетельствует, что не каждая методика позволяет получить адекватные результаты: одно и то же предприятие по результатам различных методик одновременно может быть признано и безнадежным банкротом, и устойчиво развивающимся, и находящимся в предкризисном состоянии предприятием. Представлены преимущества и недостатки различных методик прогнозирования банкротства (как правительственных, так и авторских). Проведен сравнительный анализ К-прогнозных моделей оценки вероятности банкротства, выделены наиболее значимые показатели финансового состояния, используемые при прогнозировании банкротства.

Ключевые слова: банкротство, методики прогнозирования банкротства, К-прогнозные модели, преимущества, недостатки, показатели, финансовый анализ.

Для цитирования: Буйвис Т.А., Иванова Е.В., Касацкая А.А. Сравнительный анализ методик прогнозирования банкротства для эффективного антикризисного управления предприятием. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):128–139. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-128-139](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-128-139)

Original article

**COMPARATIVE ANALYSIS OF BANKRUPTCY FORECASTING TECHNIQUES FOR
EFFECTIVE CRISIS MANAGEMENT OF AN ENTERPRISE**

© 2025 T. A. Buivis, E. V. Ivanova, A. A. Kasatskaya

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

Annotation. Currently, the issue of choosing a bankruptcy forecasting methodology for enterprises remains relevant. The relevance of the topic under study is due to the fact that in order to respond in a timely manner to signs of deterioration in the financial condition of an organization, crisis managers need effective forecasting methods that not only identify the risk of bankruptcy, but also determine a set of measures to prevent the realization of

this risk or minimize its consequences. Despite the availability of a large number of techniques that make it possible to predict the onset of bankruptcy, many problems remain in this area. The existing methods of analyzing financial statements to identify signs of bankruptcy differ from each other in the goals and objectives of the analysis, the information base, the amount of work, the complexity of calculations, the speed of solving analytical and managerial tasks, and other conditions. In addition, as the experience of practical calculations shows, not all currently existing methods for predicting possible bankruptcy of an enterprise are trustworthy. Practical experience shows that not every technique allows you to get adequate results: the same enterprise can simultaneously be recognized as a hopeless bankrupt, as a steadily developing enterprise, and as an enterprise in a pre-crisis state. This article presents the advantages and disadvantages of various bankruptcy forecasting methods, both governmental and proprietary. In addition, within the framework of this study, a comparative analysis of K-forecast models for assessing the probability of bankruptcy was carried out, and the most significant indicators of the financial condition used in predicting bankruptcy were identified.

Keywords: Bankruptcy, methods of bankruptcy forecasting, K-forecast models, advantages, disadvantages, indicators, financial analysis

For citation: Buivis T.A., Ivanova E.V., Kasatskaya A.A. Comparative analysis of bankruptcy forecasting techniques for effective crisis management of an enterprise. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):128–139. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-128-139](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-128-139)

Введение

Деятельность любой организации связана с рисками разного рода и наиболее опасным из них является неплатежеспособность, вследствие чего может быть запущена процедура банкротства. Для предотвращения такой проблемы проводится финансовый анализ, одной из задач которого является диагностика текущего финансового состояния, предотвращение угрозы банкротства. В настоящее время существует достаточно много методик прогнозирования банкротства (как авторских, так и закрепленных нормативными документами). Целью настоящей работы является сравнительный анализ различных методик для принятия более рациональных решений при антикризисном управлении предприятием.

Правительственные методики

В настоящее время нормативными документами закреплены и действуют три методики:

1. Методические положения по оценке финансового состояния предприятий и установлению неудовлетворительной структуры баланса (утверждены Распоряжением Федерального управления по делам о несостоятельности (банкротстве) от 12.08.94 г. № 31-р).

2. Правила проведения арбитражными управляющими финансового анализа (утверждены Постановлением Правительства Российской Федерации от 25 июня 2003 г. № 367);

3. Временные правила проверки арбитражным управляющим наличия признаков фиктивного и преднамеренного банкротства (утверждены Постановлением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2004 г. № 855).

Методические положения по оценке финансового состояния предприятий и установлению

неудовлетворительной структуры баланса (утверждены Распоряжением Федерального управления по делам о несостоятельности (банкротстве) от 12.08.94 г. № 31-р) являлись одной из самых первых методик оценки вероятности банкротства (методика ФУДН при Госкомимуществе РФ [1; 2]). В настоящее время эта методика уже не действует, но показатели, предложенные в ее рамках, до сих пор используются в финансовом анализе и представляют интерес с точки зрения исследования зарождения первых методик прогнозирования банкротства.

По рассматриваемой методике рассчитывается всего четыре показателя (коэффициенты текущей ликвидности, обеспеченности собственными средствами, восстановления и утраты платежеспособности). Методика 1 является одной из самых критикуемых в работах [3 – 5]. Нормативные значения коэффициентов, по которым делается вывод о платежеспособности предприятия, завышены, что говорит о неадекватности критических показателей реальной ситуации. К примеру, нормативное значение коэффициента текущей ликвидности, равное двум, взято из мировой учетно-аналитической практики без учета реальной ситуации на отечественных предприятиях, когда большинство из них продолжает работать со значительным дефицитом собственных оборотных средств. Также необходимо отметить тот факт, что в официальной системе критериев несостоятельности (банкротства) ФУДН РФ применяются исключительно показатели ликвидности коммерческих организаций. Другие показатели финансовой деятельности предприятий (рентабельность, оборачиваемость, структура капитала и другие) не учитываются, что говорит о том, что рассматриваемая система критериев предназначена исключительно для

оценки платежеспособности коммерческих организаций.

По методике 1 можно объявить банкротом даже высокорентабельное предприятие, если оно использует в обороте много заемных средств. Кроме того, нормативное значение принятых критериев не может быть одинаковым для разных отраслей экономики ввиду различной структуры капитала. Они должны быть разработаны для каждой отрасли и подотрасли. Рассматриваемая методика малоинформативна и зачастую не позволяет сделать корректные выводы.

Правила проведения арбитражными управляющими финансового анализа (Утверждены Постановлением Правительства Российской Федерации от 25 июня 2003 г. № 367) на сегодняшний день являются наиболее приемлемой методикой и заключаются в расчете десяти показателей. В ней хорошо выделены все сферы анализа финансово-хозяйственной деятельности предприятия. Также методика 2 рассматривает не только коэффициентный анализ, но и исследует всю финансовую отчетность предприятия. Эта методика достаточно глубоко рассматривает всю финансово-хозяйственную деятельность предприятия.

Однако и эта методика не лишена недостатков. Во-первых, в ней не прописаны нормативные значения коэффициентов, что затрудняет процедуру оценки финансовых результатов, арбитражному управляющему или проводящему анализ приходится полностью полагаться на свой собственный опыт и субъективное мнение. Во-вторых, имеются ошибки в терминологии, например, в группе показателей под названием «деловая активность» рассматриваются коэффициенты рентабельности. В-третьих, для анализа необходимо большое количество информации, что не всегда доступно. Также в качестве недостатка методики 2 можно отметить очень громоздкие формулы расчета показателей со многими корректировками и дополнительными расчетами. Кроме того, бухгалтерская отчетность за период с 2003 г. претерпевала многочисленные изменения, а методика оставалась неизменной, что еще больше создавало неудобств при ее использовании.

Временные правила проверки арбитражным управляющим наличия признаков фиктивного и преднамеренного банкротства (утверждены Постановлением Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2004 г. № 855) [6] в своем составе содержат две методики:

– *Методика определения признаков фиктивного банкротства* полностью соответствует федеральному закону «О несостоятельности (банкротстве)» [7], в ней признаки банкротства четко

прописаны в соответствии с законом. На основании полученных данных можно сделать корректные выводы о признаках фиктивного банкротства. Единственным недостатком этой методики является то, что она основана только на данных бухгалтерского баланса и отчета о финансовых результатах. Так как в России отчетность в ряде случаев не соответствует действительности, то можно сделать ошибочные выводы о реальном состоянии предприятия.

– *Методика определения признаков преднамеренного банкротства* четко определяет преднамеренное банкротство, в ней хорошо прописан не только коэффициентный расчет, но и анализ совершения сделок, их адекватность и необходимость. Однако, вторая часть анализа по рассматриваемой методике очень трудоемкая и требует большого количества данных. Для внешних пользователей отчетности эта методика будет недоступна, она предназначена для арбитражных управляющих и для внутренних пользователей отчетности.

Обобщая выводы по правительственным методикам, представим их плюсы и минусы в табл. 1.

Авторские методики

Наряду с правительственными методиками, утвержденными соответствующими нормативными документами, существуют и авторские. Классификация авторских методик прогнозирования банкротства представлена на рис. 1 [4].

В зависимости от тех параметров, которые закладываются в систему оценки, авторские модели прогнозирования банкротства делятся на количественные и качественные.

Первый подход (количественный) основан на построении экономико-математической модели и дальнейшем оперировании некоторыми коэффициентами. Модели оценки вероятности банкротства количественного уровня в зависимости от применяемого математического аппарата можно разделить на К-прогнозные модели и *logit*-модели, каждая из рассматриваемых подгрупп подразделяется в зависимости от происхождения автора методики (на зарубежные и российские модели).

Наиболее популярными являются так называемые К-прогнозные или кризис-прогнозные модели [8 – 10]. Начало развития этим методикам положил Эдвард Альтман в 1968 г. Суть К-прогнозных моделей заключается в том, чтобы проверить путем недолгих вычислений насколько финансово здорово предприятие и нет ли угрозы банкротства. При этом данные берутся в основном только из двух публичных форм отчетности (бухгалтерского баланса и отчета о

Плюсы и минусы правительственных методик прогнозирования банкротства
The pros and cons of government bankruptcy forecasting methods

Достоинства	Недостатки
<i>Методические положения по оценке финансового состояния предприятий и установлению неудовлетворительной структуры баланса</i>	
– простота в расчетах	– нормативные значения завышены; – малоинформативная; – часто выдает некорректные результаты; – нет учета отраслевой специфики
<i>Правила проведения арбитражными управляющими финансового анализа</i>	
– рассматривает все сферы финансово-хозяйственной деятельности предприятия	– нет нормативных значений коэффициентов; – есть ошибки в терминологии; – не учитывает произошедших изменений в бухгалтерской отчетности; – громоздкие формулы расчета
<i>Временные правила проверки арбитражным управляющим наличия признаков фиктивного и преднамеренного банкротства</i>	
– соответствует закону «О банкротстве»; – дает возможность сделать корректные выводы; – хорошо прописан анализ совершения сделок	– необходимо много внутренней информации; – формулы расчета уже не во всем соответствуют формам отчетности; – трудоемкая

финансовых результатах), что делает рассматриваемые методики доступными для широкого круга пользователей.

Качественный уровень можно разбить на два подуровня, также в зависимости от происхождения автора методики (зарубежные и российские модели). В состав зарубежных моделей вошла А-счет модель Дж. Аргенти и модель Т. Скоуна, а в состав российских моделей – модель В.В. Ковалева [11].

На основе проведенного анализа методик прогнозирования банкротства можно выделить сильные и слабые стороны каждой из них (табл. 2).

На основе анализа достоинств и недостатков как качественных, так и количественных моделей прогнозирования банкротства, можно выделить наиболее удачные из них. Все вышеперечисленные методики анализа были неоднократно апробированы на данных бухгалтерской (финансовой) отчетности организаций г. Новокузнецк (АО «Органика», ООО «ОК «Сибшахтострой», ООО «Анжеромаш-сталь», АО «Кузнецкие ферросплавы», АО «Кузбасская птицефабрика», ООО «Разрез Березовский», ООО «Новокузнецкая кондитерская фабрика» и другие). Данные для анализа были взяты с официального сайта <https://bo.nalog.ru/> [29].

К наиболее удобным и точным моделям оценки вероятности банкротства можно отнести следующие модели: Г. Спрингейта, В.В. Ковалева,

А.В. Постюшкова и Э. Альтмана – Д. Сабаты. Выбор этих моделей обусловлен их простотой расчетов, а также тем, что они наиболее точно оценивают риск наступления банкротства предприятия.

Цель настоящей работы состоит также в том, чтобы системно проанализировать все показатели, используемые в К-прогнозных моделях. В рамках исследования использовали только те модели, по которым можно провести расчеты при использовании данных бухгалтерской отчетности, не прибегая к показателям из других «не публичных» источников.

Все показатели сведены табл. 3, которая построена в шахматном порядке, где на пересечении наименования модели и показателя отмечается факт использования рассматриваемого показателя в конкретной модели. Заливкой выделены показатели, которые наиболее часто встречаются в моделях разных авторов, а цветом показатели разбиты на величины разных разделов финансового анализа (платежеспособности, финансовой устойчивости, деловой активности и рентабельности).

Сравнительный содержательный анализ методик позволил выделить наиболее часто встречающиеся, а значит наиболее значимые показатели финансового состояния предприятия. Представленные величины в дальнейшем будем называть «говорящими».

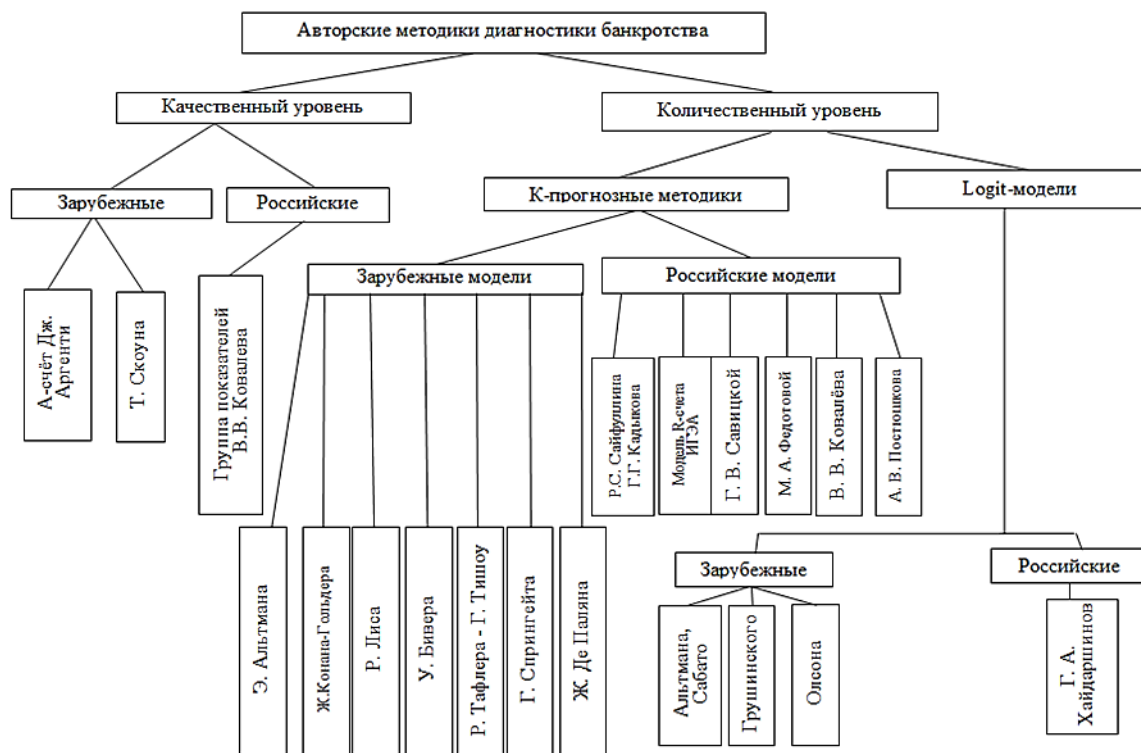


Рис. 1. Классификация авторских методик прогнозирования банкротства

Fig. 1. Classification of author's bankruptcy forecasting methods

Наиболее часто используемыми («говорящими») показателями при оценки вероятности банкротства являются коэффициенты текущей ликвидности, обеспеченности собственными оборотными средствами, доля оборотных активов в валюте баланса, коэффициент оборачиваемости активов, рентабельность собственного капитала и показатель финансовой устойчивости, выраженный отношением собственного капитала к заемному (рис. 2).

Помимо рассмотренных показателей, выявленных по результатам анализа всех методик, следует выделить рентабельность продаж, которая отражает способность предприятия извлекать прибыль при текущем режиме производства и бизнес-процессах.

На основе системного анализа методик прогнозирования банкротства был выделен ряд «говорящих» показателей, низкие значения или отрицательная динамика которых являются тревожными звонками, свидетельствующими о зарождающихся проблемах, которые могут привести к банкротству в дальнейшем.

Выводы

В рамках проведенного исследования были обозначены преимущества и недостатки как правительственных, так и авторских методик прогнозирования банкротства. Приведена клас-

сификация авторских методик прогнозирования банкротства. Все методики были апробированы на цифрах отчетности разных предприятий г. Новокузнецк. Проведенный углубленный анализ К-прогнозных моделей позволил выявить наиболее значимые («говорящие») показатели финансового анализа. Полученные результаты могут помочь пользователям отчетности и финансовым аналитикам в выборе наиболее подходящей методики прогнозирования для конкретного предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение ФУДН при Госкомимуществе РФ «О Методических рекомендациях по проведению экспертизы о наличии (отсутствии) признаков фиктивного или преднамеренного банкротства»: от 08.10.1999 г. № 33-р: [утратило силу]. URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 20.04.2025).
2. Распоряжение ФУДН при Госкомимуществе РФ «О некоторых вопросах обеспечения единого методического подхода при проведении анализа финансового состояния предприятий, имеющих неудовлетворительную структуру баланса и признанных неплатежеспособными»: от 12.09.1994 г. № 56-р (с изм. от 14.11.1994 г.) URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_4875/ (дата обращения: 20.04.2025).

Преимущества и недостатки авторских методик прогнозирования банкротства
Advantages and disadvantages of the author's bankruptcy forecasting methods

Модели прогнозирования банкротства	Достоинства	Недостатки
<i>Качественные модели прогнозирования банкротства</i>		
<i>Зарубежные модели</i>		
А-счет Дж. Аргенти [12]	– упрощенный процесс оценки; – оперативное выделение и учет одновременно как финансовых, так и нефинансовых показателей организации, характеризующих риски негативного финала ее деятельности	– высокая зависимость качества оценки от точности предоставляемой исходной информации; – субъективизм оценки экспертов; – отсутствие итоговой количественной оценки, обеспечивающей формирование детальных рекомендаций по антикризисному управлению
Т. Скоуна [12]	– подходит наилучшим образом для начальных этапов диагностики вероятности банкротства организации	– обладает наименьшей функциональностью и характеризуются наибольшими значениями функции потерь качества
<i>Российские модели</i>		
Группа показателей В.В. Ковалева [12]	– упрощенный процесс оценки	– четких рекомендаций, позволяющих судить о степени приближения оцениваемого предприятия к банкротству данная методика не дает; – требует накопления определенных статистических данных
<i>Количественные модели прогнозирования банкротства</i>		
<i>Зарубежные К-прогнозные модели</i>		
Двухфакторная модель Э. Альтмана [13; 16]	– простота при расчетах; – возможность применения при проведении внешнего анализа на основе бухгалтерского баланса	– применяется для больших компаний, чьи акции находятся в свободной продаже на фондовой бирже, поэтому применение данной модели в российских условиях ограничено; – нет данных о базе расчета весовых значений коэффициентов
Пятифакторная модель Э. Альтмана [13; 17; 19 – 23]	– простота при расчетах; – высокая вероятность предсказания банкротства за два года до его фактического объявления	– применяется для больших компаний, чьи акции находятся в свободной продаже на фондовой бирже; – применение данной модели в российских условиях ограничено; – нет данных о базе расчёта весовых значений коэффициентов
Модель Р. Лиса [14]	– простота в расчетах; – прогнозирование банкротства на год вперед	– не учитывает налоговый режим; – большое влияние оказывает показатель прибыли от продаж; – высокое пороговое значение интегрального показателя
Модель Р. Тафлера – Г. Тишоу [14; 16; 18]	– простота в расчетах; – возможность применения при проведении внешнего диагностического анализа	– получение отрицательного значения интегрального показателя очень сложно
Модель Г. Спрингейта [15]	– модель показывает достаточный уровень надежности прогноза; – простота в расчетах	– нет отраслевой и региональной дифференциации Z-счета; – между переменными наблюдается достаточно высокая корреляция
Модель У. Бивера [17]	– простота в расчетах.	– модель не адаптирована под российские стандарты; – нет данных о базе расчета весовых значений коэффициентов

Модель Ж. Де Паляна [3]	– простота в расчетах; – учитывает специфику отрасли	– установленные пороговые значения коэффициентов завышены
Российские К-прогнозные модели		
Модель Р.С. Сайфуллина – Г.Г. Кадыкова [5, 15]	– простота в расчетах	– не учитывает отраслевые особенности предприятия и полагается исключительно на усредненные нормальные значения финансовых показателей; – высокое весовое значение коэффициента обеспеченности собственными средствами
Модель R-счета ИГЭА [5; 15]	– простота в расчетах – подробно описаны все основные этапы расчетов	– применима для прогнозирования банкротства, когда уже заметны очевидные признаки; – зависимость от точности предоставленной информации; – не учитывается отраслевая специфика деятельности организации
Модель Г.В. Савицкой [24]	– простота в расчетах	– нет данных о базе расчета весовых значений коэффициентов
Модель М.А. Федотовой [25]	– простота в расчетах	– основывается на двух коэффициентах
Модель В.В. Ковалева [11]	– возможно использование данных методик для проведения внешнего анализа – определены нормативы переменных, которые дифференцированы по отраслям	– установленные пороговые значения коэффициентов завышены – резкие «переходы» от одной оценки финансовой состоятельности к другой, то есть даже если организация получит 99 баллов из ста, ее финансовое положение будет признано неустойчивым
Модель А.В. Постюшкова [26]	– модель наиболее сбалансирована; – простота в расчётах; – можно использовать для предприятий любой отрасли, а также любого масштаба деятельности	– не выявлено
Зарубежные <i>logit</i> -модели		
Модель Э. Альтмана – Д. Сабато [27; 28]	– простота в расчетах – позволяет однозначно интерпретировать результат	– предназначена для малых и средних предприятий
Российские <i>logit</i> -модели		
Модель Грушинского [28]	– простота в расчетах – позволяет однозначно интерпретировать результат	– не выявлено

- Буйвис Т.А., Рябцева Л.В. Несостоятельность (банкротство) юридических лиц. Процедура проведения, учет, анализ и диагностика банкротства. Москва: Научное обозрение, 2015:140.
- Буйвис Т.А., Батанова М.В. Прогнозирование банкротства организации на примере АО «Органика». *Вектор экономики*. 2021;6(60). URL: https://vectoreconomy.ru/images/publications/2021/6/accounting/Buyvis_Batanova.pdf (дата обращения: 20.04.2025).
- Котлярова О.А. Сравнительный анализ отечественных и зарубежных моделей оценки и прогнозирования вероятности банкротства компаний: необходимость их применения в России в современных условиях. *Экономика и бизнес*. 2020;9-1(67):155–158.
- Постановление Правительства РФ «Об утверждении Временных правил проверки арбитражным управляющим наличия признаков фиктивного и преднамеренного банкротства»: от 27.12.2004 г. № 855. URL:

Таблица 3

Анализ К-прогнозных методик прогнозирования банкротства
Analysis of K-predictive bankruptcy forecasting techniques

Модель Показатель	Э. Альтмана (двухфактор- ная)	Э. Альтмана (пятифактор- ная)	Р. Лиса	У. Бивера	Р. Тафлера - Г. Тишоу	Г. Спринггейта	Ж. Де Паляна	Ж. Конана – М. Голдера	Ж. Лего	О.П. Зайцевой	Р.С. Сайфуллина Г.Г. Кадыкова	Модель R-счета ИГЭА	Г. В. Савицкой	М. А. Федотовой	В. В. Ковалева	А. В. Постюшкова	Лидирующие показатели
Коэффициент текущей ликвидности (отношение текущих активов к текущим обязательствам)	*										*			*	*	*	K _{тл}
Доля заемного капитала в валюте баланса	*													*			
Доля оборотных активов в валюте баланса		*	*			*	*					*					Доля ОА
Налогооблагаемая прибыль к валюте баланса		*	*														
Прибыль от продаж к валюте баланса		*	*														
Отношение собственного капитала к заемному капиталу		*	*												*		
Коэффициент оборачиваемости активов (отношение выручки от реализации продукции к среднегодовой стоимости активов)		*			*	*					*	*				*	K _{оа}
Коэффициент Бивера (отношение операционного потока к заемному капиталу)				*													
Рентабельность активов (отношение чистой прибыли к среднегодовой стоимо- сти активов)				*								*					P _а
Коэффициент финансового левериджа (отношение заемного капитала к соб- ственному капиталу)				*													
Коэффициент покрытия активов (отношение активов за вычетом нематериаль- ных активов, займов и краткосрочных обязательств к суммарным обязатель- ствам)				*													
Коэффициент платежеспособности (отношение оборотных активов к кратко- срочным обязательствам)				*													
Отношение прибыли от продаж к краткосрочным обязательствам					*												
Отношение оборотных активов к заемному капиталу					*												
Доля краткосрочных обязательств в пассивах					*												
Операционная рентабельность активов (отношение операционной прибыли к среднегодовой величине активов)						*											
Отношение прибыли до налогообложения к краткосрочным обязательствам						*											
Коэффициент быстрой ликвидности (отношение суммы краткосрочной деби- торской задолженности, краткосрочных финансовых вложений и денежных							*										

средств к краткосрочным обязательствам)																	
Коэффициент кредитования (отношение активов к заемному капиталу)							*										
Коэффициент оборачиваемости запасов (отношение выручки от реализации продукции к среднегодовой стоимости запасов)							*							*			3
Коэффициент оборачиваемости дебиторской задолженности (отношение выручки от реализации продукции к среднегодовой стоимости дебиторской задолженности)							*										
Доля денежных средств и дебиторской задолженности в валюте баланса								*									
Доля устойчивых пассивов (собственного капитала и долгосрочных обязательств) в валюте баланса								*									
Доля налога на прибыль и уплачиваемых процентов в выручке от реализации продукции								*									
Доля расходов на оплату труда в добавленной стоимости								*									
Операционная рентабельность заемного капитала								*									
Доля уставного капитала в валюте баланса									*								
Рентабельность активов по прибыли до налогообложения									*					*			
Отношение выручки от реализации продукции за 2 года к валюте баланса за 2 года									*								
Рентабельность собственного капитала по прибыли до налогообложения										*							
Отношение кредиторской задолженности к дебиторской задолженности										*							
Отношение текущих обязательств к текущим активам										*							
Рентабельность продаж по прибыли до налогообложения										*				*			
Финансовый рычаг (отношение заемного капитала к собственному)										*							
Отношение валюты баланса к выручке от реализации продукции										*							
Коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами (отношение собственного оборотного капитала к оборотным активам)										*		*			*		K _{сое}
Рентабельность продукции (отношение прибыли от продаж к выручке от реализации продукции)										*							
Рентабельность собственного капитала (отношение чистой прибыли к среднегодовой стоимости собственного капитала)										*	*	*			*		P _{ск}
Рентабельность производства по чистой прибыли (отношение чистой прибыли к себестоимости продукции)											*						
Отношение оборотных активов к собственному капиталу												*					
Коэффициент финансовой независимости (автономии) (отношение собственного капитала к валюте баланса)												*					
	– показатели платежеспособности																
	– показатели деловой активности																
	– показатели финансовой устойчивости																
	– показатели рентабельности																



Рис. 2. «Говорящие» показатели оценки вероятности банкротства

Fig. 2. "Talking" indicators for assessing the probability of bankruptcy

- <http://www.consultant.ru/> (дата обращения: 20.04.2025).
- Федеральный закон от 26.10.2002 № 127-ФЗ (ред. от 26.12.2024) «О несостоятельности (банкротстве)» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2025). URL: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения: 20.04.2025).
 - Иванова Е.В., Ефремова Т.И. Методологические предпосылки развития модели прогнозирования банкротства. *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2020;4-3:336–343. EDN: OERCSN. <https://doi.org/10.17513/vaael.1092>
 - Дорошенко Н.С. Обзор зарубежных и отечественных факторных моделей проведения диагностирования и прогнозирования. В кн.: *VII Международная научная конференция по междисциплинарным исследованиям*. Екатеринбург, 20 сентября 2024 года. Екатеринбург: ООО «Институт цифровой экономики и права», 2024:25–28. EDN: SLAANQ.
 - Карпов С.В. Развитие моделей прогнозирования банкротства организации: обзор литературы. *Инновационная наука*. 2024;2-1:51–52. EDN: YDGHLC.
 - Ковалев В.В., Молдобаев Т.Ш. Тестирование зарубежных и отечественных моделей прогнозирования банкротств на российских предприятиях. *Развитие территорий*. 2021;3(25):10–19. EDN: NLOFYL. <https://doi.org/10.32324/2412-8945-2021-3-10-19>
 - Тебекин А.В. Оценка методов антикризисного управления на основе качественных показателей деятельности предприятий. *Вестник Московского университета имени С.Ю. Витте. Серия I Экономика и управление*. 2019;2(29):71–81.
 - Максимов Н.Б., Меркулова Н.С. Диагностика банкротства предприятий и модели прогнозирования возможности наступления банкротства. *Наука и практика регионов*. 2024;2(35):49–55. EDN: CHRNPJ.
 - Мальцева К.К., Герасименко О.А. Практика использования различных моделей прогнозирования банкротства организаций. *Colloquium-Journal*. 2019;7-7(31):23–25. EDN: VAXPPU.
 - Петрова Е.В., Наговицына В.П. Диагностика вероятности банкротства: зарубежные и отечественные модели прогнозирования. *Вектор экономики*. 2023;12(90). EDN: WPWQWS. https://doi.org/10.51691/2500-3666_2023_12_3
 - Фейзрахманова Н.М. Применимость классических моделей прогнозирования банкротства (Альтман, Фулмер и Тафлер) для отечественных сельскохозяйственных компаний. *OpenScience*. 2023;1:123–134. EDN: FJZYCG. https://doi.org/10.51632/2658-7939_2023_5_1_123
 - Almamy J., Aston J., Ngwa L.N. An evaluation of Altman 's Z-score using cash flow ratio to predict corporate failure amid the recent financial crisis: Evidence from the UK. *Journal of Corporate Finance*. 2016;6:278–285.
 - Wang Y., Campbell M. Do bankruptcy models really have predictive ability? Evidence using China publicly listed companies. *International Management Review*. 2010;6(2):77–82.
 - Lifschutz S., Jacobi A. Predicting bankruptcy: Evidence from Israel. *International Journal of Business and Management*. 2010;5(4):133–141.
 - Bhunia A., Sarkar R. A study of financial distress based on MDA. *Journal of Management Research*. 2011;3(2):1–11.
 - Maux J.L., Morin D. Black and white and red all over: Lehman Brothers' inevitable bankruptcy splashed across its financial statements. *International Journal of Business and Social Science*. 2010;2(20):39–65.

22. Agrawal K., Maheshwari Y. Efficacy of industry factors for corporate default prediction. *IIMB Management Review*. 2019;31:71–77.
23. Wu D., Ma X., Olson D. L. Financial distress prediction using integrated Z-score and multilayer perceptron neural networks. *Decision Support Systems*. 2022;159(March):113814. EDN: LGMGGJ. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2022.113814>
24. Галицкая Ю.Н., Терещенко О.О. Прогнозирование риска банкротства предприятия при помощи отечественных моделей с целью сохранения платежеспособности. *Journal of Economy and Business*. 2019;12-1(58):82–85.
25. Попов В.Б., Кадыров Э.Ш. Анализ моделей прогнозирования вероятности банкротства предприятий. *Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского Серия «Экономика и управление»*. 2014;1:118–128.
26. Постюшков А.В. Прогнозирование банкротства. *Арбитражный управляющий*. 2007;6:11–16.
27. Bandyopadhyay A. Predicting probability of default of Indian corporate bonds: logistic and Z-score approaches. *The Journal of Risk Finance*. 2006;7(3):255–272.
28. Багаутдинова Г.М. Логистические модели (logit-модели) оценки риска банкротства предприятия. *Инновационные научные исследования*. 2021;2-1(4):78–89.
29. Официальный сайт раскрытия бухгалтерской (финансовой) отчетности. URL: <https://bo.nalog.ru/> (дата обращения: 20.04.2025).
4. Buivis T.A., Batanova M.V. Forecasting the bankruptcy of an organization using the example of JSC Organica. *Vektor ekonomiki*. 2021;6(60). URL: https://vettoreconomy.ru/imaes/publications/2021/6/accounting/Buyvis_Batanova.pdf (accessed 20.04.2025). (In Russ.).
5. Kotlyarova O.A. Comparative analysis of domestic and foreign models for assessing and predicting the likelihood of bankruptcy of companies: the need for their application in Russia in modern conditions. *Ekonomika i biznes*. 2020;9-1(67):155–158. (In Russ.).
6. Resolution of the Government of the Russian Federation "On Approval of the Provisional Rules for the Verification by the Arbitration administrator of the presence of signs of fictitious and intentional bankruptcy": dated December 27, 2004, No. 855. URL: <http://www.consultant.ru/> (accessed 20.04.2025). (In Russ.).
7. Federal Law No. 127-FZ dated 10.26.2002 (as amended on 12.26.2024) "On Insolvency (Bankruptcy)" (with amendments and additions, intro. effective from 03/01/2025). URL: <https://www.consultant.ru/> (accessed 20.04.2025). (In Russ.).
8. Ivanova E.V., Efremkova T.I. Methodological prerequisites for the development of the bankruptcy forecasting model. *Vestnik Altaiskoi akademii ekonomiki i prava*. 2020;4-3:336–343. EDN: OERCSN. <https://doi.org/10.17513/vael.1092> (In Russ.).
9. Doroshenko N.S. An overview of foreign and domestic factor models for diagnosis and forecasting. In: *VII International Scientific Conference on Interdisciplinary Research*. Yekaterinburg, September 20, 2024. Yekaterinburg: ООО «Institut tsifrovoy ekonomiki i prava», 2024:25–28. EDN: SLAANQ. (In Russ.).
10. Karpov S.V. Development of models for predicting the bankruptcy of an organization: a review of the literature. *Innovatsionnaya nauka*. 2024;2-1:51–52. EDN: YDGHLC. (In Russ.).
11. Kovalev V.V., Moldobaev T.Sh. Testing of foreign and domestic bankruptcy forecasting models at Russian enterprises. *Razvitie territorii*. 2021;3(25):10–19. EDN: NLOFYL. <https://doi.org/10.32324/2412-8945-2021-3-10-19> (In Russ.).
12. Tebekin A.V. Assessment of anti-crisis management methods based on qualitative performance indicators of enterprises. *Vestnik Moskovskogo universiteta imeni S.Yu. Vitte. Seriya 1 Ekonomika i upravlenie*. 2019;2(29):71–81. (In Russ.).
13. Maksimov N.B., Merkulova N.S. Diagnostics of bankruptcy of enterprises and models of forecasting the possibility of bankruptcy. *Nauka i praktika regionov*. 2024;2(35):49–55. EDN: CHRNPJ. (In Russ.).
14. Mal'tseva K.K., Gerasimenko O.A. The practice of using various models of forecasting

REFERENCES

1. Order of the Federal Tax Service under the State Property Committee of the Russian Federation "On Methodological recommendations for conducting an expert examination on the presence (absence) of signs of fictitious or intentional bankruptcy": dated 08.10.1999 No. 33-r: [expired]. URL: <http://www.consultant.ru/> (accessed 20.04.2025). (In Russ.).
2. Order of the Federal Budget Committee under the State Property Committee of the Russian Federation "On some issues of ensuring a unified methodological approach to Analyzing the Financial condition of Enterprises with an unsatisfactory Balance Sheet Structure and declared Insolvent": dated 12.09.1994, No. 56-r (as amended. dated 14.11.1994) URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_4875/ (accessed 20.04.2025). (In Russ.).
3. Buivis T.A., Ryabtseva L.V. Ryabtseva L.V. *Insolvency (bankruptcy) of legal entities. The procedure for conducting, accounting, analysis and diagnosis of bankruptcy*. Moscow: Nauchnoe obozrenie, 2015:140. (In Russ.).

- bankruptcy of organizations. *Colloquium-Journal*. 2019;7-7(31):23–25. EDN: VAXPPU.
15. Petrova E.V., Nagovitsyna V.P. Diagnostics of bankruptcy probability: foreign and domestic forecasting models. *Vektor ekonomiki*. 2023;12(90). EDN WPWQWS. https://doi.org/10.51691/2500-3666_2023_12_3
 16. Feizrahmanova N.M. Applicability of classical bankruptcy forecasting models (Altman, Fulmer and Tafler) for domestic agricultural companies. *OpenScience*. 2023;1:123–134. EDN FJZYCG. https://doi.org/10.51632/2658-7939_2023_5_1_123
 17. Almamy J., Aston J., Ngwa L.N. An evaluation of Altman 's Z-score using cash flow ratio to predict corporate failure amid the recent financial crisis: Evidence from the UK. *Journal of Corporate Finance*. 2016; 6:278–285.
 18. Wang Y., Campbell M. Do bankruptcy models really have predictive ability? Evidence using China publicly listed companies. *International Management Review*. 2010;6(2):77–82.
 19. Lifschutz S., Jacobi A. Predicting bankruptcy: Evidence from Israel. *International Journal of Business and Management*. 2010;5(4):133–141.
 20. Bhunia A., Sarkar R. A study of financial distress based on MDA. *Journal of Management Research*. 2011;3(2):1–11.
 21. Maux J.L., Morin D. Black and white and red all over: Lehman Brothers' inevitable bankruptcy splashed across its financial statements. *International Journal of Business and Social Science*. 2010;2(20):39–65.
 22. Agrawal K., Maheshwari Y. Efficacy of industry factors for corporate default prediction. *IIMB Management Review*. 2019;31:71–77.
 23. Wu D., Ma X., Olson D. L. Financial distress prediction using integrated Z -score and multilayer perceptron neural networks. *Decision Support Systems*. 2022;159(March):113814. EDN: LGMGGJ. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2022.113814>
 24. Galitskaya Yu.N., Tereshchenko O.O. Forecasting the risk of bankruptcy of an enterprise using domestic models in order to maintain solvency. *Journal of Economy and Business*. 2019;12-1(58):82–85. (In Russ.).
 25. Popov V.B., Kadyrov E.Sh. Analysis of models for predicting the probability of bankruptcy of enterprises. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo Seriya «Ekonomika i upravlenie»*. 2014;1:118–128. (In Russ.).
 26. Postyushkov A.V. Forecasting bankruptcy. *Arbitrazhnyi upravlyayushchii*. 2007;6:11–16. (In Russ.).
 27. Bandyopadhyay A. Predicting probability of default of Indian corporate bonds: logistic and Z-score approaches. *The Journal of Risk Finance*. 2006;7(3):255–272.
 28. Bagautdinova G.M. Logistic models (logit models) for assessing the risk of bankruptcy of an enterprise. *Innovatsionnye nauchnye issledovaniya*. 2021;2-1(4):78–89. (In Russ.).
 29. The official website for the disclosure of accounting (financial) statements. URL: <https://bo.nalog.ru/> (accessed 20.04.2025). (In Russ.).

Сведения об авторах:

Татьяна Анатольевна Буйвис, к.э.н., доцент кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: bujvis_tv@sibsiu.ru

ORCID: 0009-0000-8325-8637

SPIN-код: 1595-9350

Елена Владимировна Иванова, к.э.н., доцент кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: ivanova_ev@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-3174-0426

SPIN-код: 3163-2542

Анна Андреевна Касацкая, преподаватель кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: kasatskaya_aa@sibsiu.ru

ORCID: 0009-0006-4978-846X

SPIN-код: 3202-1231

Information about the authors:

Tatyana A. Buivis, Cand. Sci. (Econ.), associate professor of the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University

E-mail: bujvis_tv@sibsiu.ru

ORCID: 0009-0000-8325-8637

SPIN-код: 1595-9350

Elena V. Ivanova, Cand. Sci. (Econ.), associate professor of the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University

E-mail: ivanova_ev@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-3174-0426

SPIN-код: 3163-2542

Anna A. Kasatskaya, teacher of the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University

E-mail: kasatskaya_aa@sibsiu.ru

ORCID: 0009-0006-4978-846X

SPIN-код: 3202-1231

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

Поступила в редакцию 12.05.2025

После доработки 23.05.2025

Принята к публикации 30.05.2025

Received 12.05.2025

Revised 23.05.2025

Accepted 30.05.2025

Оригинальная статья

УДК 330.3

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-140-148

**ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

© 2025 г. Т. В. Бобко, М. В. Постниченко

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

Аннотация. Исследование посвящено количественной оценке производительности труда в организации. Актуальность темы обусловлена несколькими ключевыми факторами: во-первых, в условиях глобальной конкуренции в металлургической отрасли и быстро меняющейся внешнеэкономической среды эффективность использования трудовых ресурсов становится особенно важным фактором для обеспечения устойчивого роста и повышения конкурентоспособности предприятия; во-вторых, внедрение современных технологий организации производства, основанных на цифровизации и автоматизации производственных процессов, влияет на результативность работы сотрудников. Это требует от организации постоянного анализа текущей производительности труда с целью выявления резервов повышения эффективности использования трудовых ресурсов. Оценивали динамику и определяли направления повышения производительности труда крупного металлургического предприятия. Анализировали статистические данные, проводили количественный и сравнительный анализы, обобщали и систематизировали информацию. Представлен анализ динамики производительности труда на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» за период 2020 – 2025 гг. Рассмотрены основные показатели, отражающие уровень эффективности использования трудовых ресурсов предприятия. Сделаны выводы об устойчивом положительном изменении в организации процессов и оптимизации работы сотрудников. Проведена оценка влияния внутренних и внешних факторов на изменение производительности труда. Выявлены ключевые факторы, позволяющие увеличить объемы производства и улучшить качество выпускаемой продукции, включая модернизацию производства, внедрение цифровых технологий и изменение организационной структуры. На основе статистических данных выявлены текущие тенденции и предложены направления повышения производительности труда на предприятии. Подчеркнута необходимость продолжать инвестировать в инновации и развивать корпоративную культуру, ориентированную на результат.

Ключевые слова: производительность труда, оценка динамики, анализ эффективности, трудовые ресурсы, металлургия, цифровизация, модернизация производства, инвестиционная деятельность

Для цитирования: Бобко Т.В., Постниченко М.В. Оценка динамики производительности труда металлургического предприятия. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):140–148. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-140-148](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-140-148)

Original article

**ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF LABOR PRODUCTIVITY
OF A METALLURGICAL ENTERPRISE**

© 2025 T. V. Bobko, M. V. Postnichenko

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

Abstract. The study is devoted to the quantitative assessment of labor productivity in an organization. The relevance of the topic is determined by several key factors: firstly, in the context of global competition in the metallurgical industry and a rapidly changing external economic environment, the efficiency of using labor resources is becoming a particularly important factor for ensuring sustainable growth and increasing the

competitiveness of the enterprise.; Secondly, the introduction of modern production management technologies based on digitalization and automation of production processes affects the effectiveness of employees' work. This requires the organization to constantly analyze current labor productivity in order to identify reserves for improving the efficiency of using labor resources. The dynamics were assessed and the directions for increasing the productivity of a large metallurgical enterprise were determined. Statistical data was analyzed, quantitative and comparative analyses were carried out, information was generalized and systematized. The analysis of the dynamics of labor productivity at JSC EVRAZ ZSMK for the period 2020 – 2025 is presented. The main indicators reflecting the level of efficiency of using the enterprise's labor resources are considered. Conclusions are drawn about a steady positive change in the organization of processes and optimization of the work of employees. The impact of internal and external factors on changes in labor productivity has been assessed. The key factors allowing to increase production volumes and improve the quality of products, including modernization of production, introduction of digital technologies and a change in the organizational structure, have been identified. Based on statistical data, current trends have been identified and directions for increasing labor productivity at the enterprise have been proposed. The need to continue investing in innovation and developing a results-oriented corporate culture was emphasized.

Keywords: labor productivity, dynamics assessment, efficiency analysis, labor resources, metallurgy, digitalization, modernization of production, investment activity

For citation: Bobko T.V., Postnichenko M.V. Evaluation of the dynamics of labor productivity of a metallurgical enterprise. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):140–148. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-140-148](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-140-148)

Введение

В отечественной и зарубежной практике повышение производительности труда является одной из ключевых задач любого промышленного предприятия, особенно в условиях нестабильной мировой экономической ситуации и растущих требований к повышению эффективности производства [1 – 4].

Анализ динамики рассматриваемого показателя позволяет не только зафиксировать достигнутые успехи, но и выявить проблемные зоны, требующие дополнительных мер по совершенствованию производственного процесса [5; 6].

Актуальность настоящей работы обусловлена высокой ролью производительности труда в системе управления конкурентоспособностью предприятия и необходимостью ее повышения в отечественной металлургии [7; 8].

В металлургической отрасли рассматриваемый показатель напрямую влияет не только на объем выпускаемой продукции, но и на себестоимость, рентабельность и конкурентоспособность компании как на внутреннем, так и на внешнем рынках [9].

Цель исследования – определение направлений повышения эффективности использования трудовых ресурсов.

Задачи исследования:

- оценка трендов производительности труда металлургического предприятия за период с 2020 по 2025 гг.;

- выявление факторов, влияющих на динамику производительности труда металлургического предприятия.

В настоящей работе использовали методы эмпирического исследования (изучение документов и результатов деятельности предприятия) и научного анализа (аналитический и графический методы, методы сравнения, факторного анализа и отраслевого бенчмаркетинга).

Основные результаты исследования

Акционерное общество «ЕВРАЗ Объединенный ЗападноСибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») представляет собой одно из крупнейших металлургических предприятий России и ведущий актив компании EVRAZ, входящей в число мировых лидеров в производстве стали [10]. Предприятие входит в состав базовой отрасли экономики Кемеровской обл. – Кузбасса, является градообразующим предприятием г. Новокузнецк и занимает значимую долю в формировании валового регионального продукта [11].

Основным видом деятельности АО «ЕВРАЗ ЗСМК» является производство сортового горячекатаного проката, относится к предприятиям полного металлургического цикла (от переработки железной руды и коксующегося угля до выпуска готового металлопроката). Его продукция охватывает широкий спектр сортамента: рельсы, балки, арматура, фасонный прокат, канатка, заготовка и полуфабрикаты. Особенно следует отметить производство рельсов для железнодорожного транспорта, включая высокоскоростные магистрали, в том числе по европейским стандартам [12].

Технический потенциал предприятия позволяет выпускать более 7 млн т металлопродукции в год. Производственные мощности постоянно модернизируются, включая внедрение современных автоматизированных систем управления технологическими процессами, переход на цифровую трансформацию, использование технологий Industry 4.0. На предприятии внедрены системы MES, цифровой контроль качества продукции, автоматизированные комплексы диагностики оборудования, а также технологии энергосбережения.

АО «ЕВРАЗ ЗСМК» играет важную роль в цепочке добавленной стоимости EVRAZ: значительная часть сырья поступает от других предприятий группы (РУДГОК («Евразруда») и угольные активы «ЕВРАЗ») в Кузбассе, а продукция поставляется как на внутренний рынок, так и на экспорт, включая страны Европы, Азии и Ближнего Востока. Предприятие активно участвует в реализации национальных инфраструктурных проектов, в том числе строительства новых железных дорог, мостов, стадионов, промышленных объектов.

Для такого крупного предприятия значимость роста производительности труда выходит за рамки производственного процесса и приобретает стратегическое значение для устойчивого развития [13]. Высокий уровень производительности позволяет снижать себестоимость продукции, увеличивать инвестиционную привлекательность компании, способствовать росту доходов работников и налоговых поступлений в бюджеты разных уровней.

В условиях жесткой конкуренции и глобализации металлургическая отрасль России должна стремиться к достижению показателей производительности, сопоставимых с международными стандартами, опираясь при этом на реализацию стратегий модернизации, цифровизации и устойчивого развития [14; 15].

В металлургической промышленности производительность труда определяется совокупным воздействием технологических, организационных и трудовых факторов. Технологическая составляющая охватывает уровень автоматизации и механизации, степень износа основных производственных фондов, внедрение новых технологических процессов и режимов. Организационная компонента включает рационализацию производственных потоков, эффективность логистики, управление загрузкой мощностей, структуру управления и степень централизации. Трудовые аспекты включают численность персонала, структуру занятости, уровень профессиональной подготовки, систему стимулирования и режим труда.

Для углубления анализа производительности труда в металлургии применяются специализированные показатели. Наиболее распространенными являются среднегодовая (или среднесменная) выработка на одного рабочего, удельная трудоемкость продукции, фондовооруженность труда, производительность труда (соотношение производственного эффекта с численностью работающих), темпы роста трудоотдачи по сравнению с темпами роста заработной платы (коэффициент Кейнса) [16].

На металлургическом предприятии большое внимание уделяется управлению производительностью труда, на практике применяется комплексная система управления, включающая оценку трудовых резервов, анализ потерь рабочего времени, расчет коэффициентов использования оборудования, внедрение стандартов операционной эффективности [17; 18]. Широко распространены такие инструменты как методики 5S, Kaizen, система бережливого производства (Lean), производственный анализ с применением KPI и цифровых панелей мониторинга.

Анализ производительности труда всегда сопряжен с оценкой инновационной активности предприятий [19]. Инновации в металлургии проявляются в форме внедрения энергоэффективных технологий, использования вторичных ресурсов, цифровизации производственных процессов, развития автоматизированных систем управления и интеллектуального анализа данных (Industry 4.0). Эти инновации повышают технологическую гибкость, снижают потери и увеличивают объемы выпуска при тех же трудовых затратах [20].

Производительность труда на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в 2020 г. составляла 3,95 млн рублей на одного работающего в год (по выработке в стоимостном выражении). В 2021 г. этот показатель вырос до 4,12 млн рублей (+4,3 %), что объясняется восстановлением спроса на металлопродукцию после пандемийного спада и частичным повышением цен на прокат [4]. В 2022 г. рост продолжился и составил 4,35 млн рублей (+5,6 %), а в 2023 г. – 4,58 млн рублей (+5,3 %). Однако в 2024 г. наблюдалось замедление темпов роста до 3,9 %: выработка составила 4,76 млн рублей, тогда как по предварительным итогам 2025 г. (согласно данным производственно-экономического отдела) показатель достиг 4,89 млн рублей (+2,7 %) [12].

Параллельно с увеличением выработки снижалась удельная трудоемкость продукции. Так, если в 2020 г. средняя трудоемкость 1 т проката составляла 4,15 нормо-часа, то к 2023 г. она сократилась до 3,72 нормо-часа, а в 2025 г. – до 3,54 нормо-часа. Это стало результатом внедрения новых автоматизированных линий (в част-

ности в сортопрокатном цехе № 2), а также цифровизации логистики внутри завода [12].

Численность персонала за этот период демонстрировала умеренно нисходящую динамику. В 2020 г. на предприятии работало 19,6 тыс. человек, а к 2025 г. численность составила 18,1 тыс. человек, что связано с оптимизацией непроизводственного персонала, а также выводом части вспомогательных функций на аутсорсинг. При этом объем валовой продукции за указанный период вырос с 77,4 млрд руб. (2020 г.) до 88,5 млрд рублей (2025 г.), что свидетельствует об опережающем росте выработки по сравнению с численностью [12].

Фондоотдача (один из важнейших производственных коэффициентов) демонстрировала положительную динамику. В 2020 г. она составляла 2,45 руб. на 1 руб. основных производственных фондов, а к 2025 г. достигла 2,82 руб., что отражает более эффективное использование оборудования, модернизированного в рамках инвестиционной программы 2021 – 2023 гг. В частности, была завершена реконструкция доменной печи № 3 и внедрена интеллектуальная система управления загрузкой металлургических агрегатов [12].

Влияние цифровизации на производительность труда отразилось на сокращении времени простоев, улучшении контроля качества и повышении прозрачности цепочек поставок. С 2022 г. на предприятии начала внедряться система MES-класса (Manufacturing Execution System), которая к 2024 г. охватила все основные производственные участки. Это позволило сократить среднее время на выявление и устранение производственных отклонений на 36 % и повысить согласованность производственных планов.

Организационные преобразования, реализованные в 2021 – 2023 гг., включали переход на принципиально новую модель производственного менеджмента (цех как производственный центр прибыли). Это позволило руководителям подразделений получать оперативную информацию о выработке, затратах и отклонениях, стимулируя управленческую инициативу и персональную ответственность за результаты [12].

Сравнительный анализ по годам показывает, что наибольший прирост производительности был зафиксирован в 2021 и 2022 гг. (+4,3 и +5,6 %). Это совпадает с периодом активной фазы модернизации оборудования и началом цифровых трансформаций. Наиболее низкий прирост отмечался в 2024 г. (всего 2,7 %), что связано с насыщением эффекта от ранее реализованных мероприятий и необходимостью новых инвестиционных импульсов [12].

К отрицательным тенденциям следует отнести рост фондоемкости в отдельных подразделениях (например, в кислородно-конвертерном цехе), связанный с увеличением амортизационных расходов и отставанием ремонтных циклов. Также сохраняются проблемы в части обновления кадрового состава: средний возраст работников в 2025 г. составил 45,6 лет, при этом дефицит квалифицированных молодых специалистов остается устойчивым.

С точки зрения отраслевого бенчмаркинга, производительность труда на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в 2025 г. находилась на уровне 92 % от среднего значения по металлургическим предприятиям Центральной и Сибирской зон России. При этом в 2020 г. этот показатель составлял всего 87 %, что указывает на положительную динамику сближения с отраслевыми лидерами. Для дальнейшего повышения необходима более активная работа по внедрению элементов промышленного интернета вещей (IIoT), беспилотного транспорта и цифрового дублирования агрегатов.

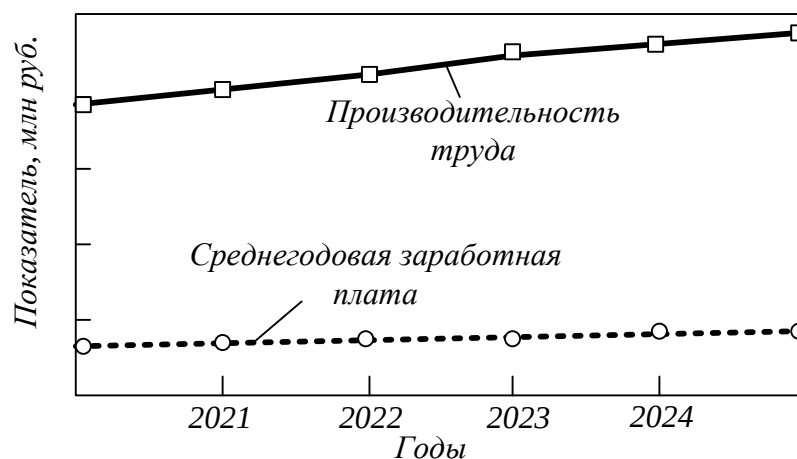
Позитивным фактором явилось внедрение системы непрерывного обучения на базе Корпоративного университета ЗСМК, благодаря которой охват персонала программами повышения квалификации с 2021 по 2025 гг. вырос с 38 до 62 %. Были внедрены инструменты непрерывной оценки компетенций рабочих кадров, в том числе на основе результатов производственного наставничества и внутренней сертификации.

В условиях постковидного восстановления экономики, а также геополитических вызовов руководство предприятия уделяло повышенное внимание устойчивости производственной системы. В 2023 г. были внедрены механизмы управления рисками, влияющими на производительность, включая резервирование критически важных узлов и локализацию цепочек поставок.

Анализ рабочих графиков и режимов труда показал, что в период 2020 – 2025 гг. наблюдается рост эффективности использования рабочего времени. Коэффициент использования сменного времени увеличился с 0,78 в 2020 г. до 0,83 в 2025 г. Также на 9 % сократились внутрисменные простои, что стало следствием перехода к системе планово-предупредительного обслуживания оборудования.

На рисунке представлен график, демонстрирующий динамику производительности труда и средней заработной платы на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в 2020 – 2025 гг. [12].

Производительность труда демонстрирует устойчивый рост (с 3,95 млн руб. на одного работника в 2020 г. до 4,89 млн руб. в 2025 г.). Среднегодовой темп прироста составил около 4,4 %, что



Динамика производительности труда и средней заработной платы на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в 2020 – 2025 гг.
Dynamics of labor productivity and average wages at JSC EVRAZ ZSMK in 2020 – 2025

отражает положительное влияние модернизации производства, цифровизации процессов и оптимизации численности персонала.

Параллельно происходил рост среднегодовой заработной платы сотрудников (с 740 тыс. руб. в 2020 г. до 920 тыс. руб. в 2025 г., что соответствует приросту около 24,3 % за пятилетний период). Очевидно, что темпы роста заработной платы отстают от темпов роста производительности, что свидетельствует о повышении эффективности использования трудовых ресурсов и улучшении рентабельности предприятия.

Направления повышения эффективности использования трудовых ресурсов

Для повышения эффективности использования трудовых ресурсов необходим комплексный подход, сочетающий технологические, организационные, кадровые и управленческие решения, подкрепленные цифровыми и инновационными инструментами. Исходя из анализа текущего уровня производительности, можно выделить ключевые направления, реализация которых обеспечит устойчивый рост рассматриваемого показателя.

Во-первых, целесообразно интенсифицировать внедрение цифровых систем управления производственными процессами. Система MES, запущенная на предприятии с 2022 г., позволила сократить время реакции на отклонения на 36 %. Однако охват системы пока не превышает 65 % всех производственных участков. Расширение ее использования на оставшиеся подразделения, в том числе на энергетические и ремонтные службы, может повысить общую координацию процессов и обеспечить сокращение потерь рабочего времени еще на 5 – 7 % в перспективе.

Во-вторых, следует продолжить автоматизацию участков с высокой долей ручного труда. Согласно внутреннему аудиту 2024 г. в сорто-

прокатном цехе № 1 и в кислородно-конвертерном производстве сохраняется более 22 % операций, выполняемых вручную или с участием устаревшего оборудования. Замена этих участков автоматизированными комплексами, включая роботизированные захваты и системы безоператорной подачи заготовок, способна повысить производительность в этих цехах на 9 – 12 % при сохранении текущей численности персонала.

В-третьих, необходимо усилить работу с кадровым потенциалом предприятия. Средний возраст работников в 2025 г. составил 45,6 лет, при этом текучесть молодого персонала за последние два года превышала 18 %, что указывает на низкую адаптацию новых кадров. Для удержания молодых специалистов необходимо активизировать программы наставничества, внедрить персонализированные карьерные треки, а также расширить количество целевых договоров с профильными вузами региона. Повышение доли молодых специалистов до 20 % от общей численности может создать эффект омоложения производственного контекста и ускорения внедрения инновационных методов труда.

Следующим направлением является совершенствование системы мотивации. В настоящее время система премирования на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» на 60 % основана на коллективных показателях и лишь на 40 % – на индивидуальных KPI. Это приводит к снижению персональной ответственности и демотивации в случае общего невыполнения плана. Корректировка системы с акцентом на индивидуальные результаты, включая показатели соблюдения графиков, качества выполнения работ, рационализаторской активности, может повысить вовлеченность персонала и трудовую отдачу на 7 – 10 % в перспективе.

Рационализация графиков сменности и улучшение использования рабочего времени

также остаются важными мерами. Коэффициент использования сменного времени в 2025 г. составил 0,83, при этом в передовых подразделениях он достигает 0,88. Введение гибких графиков в административных службах, расширение сменных заданий с электронным контролем исполнения и внедрение электронной нарядной системы позволят повысить этот коэффициент до 0,86 – 0,87 в течение двух лет.

Значительный резерв роста производительности содержится в повышении квалификации персонала. По состоянию на 2025 г. 62 % работников прошли программы повышения квалификации за последние три года. Увеличение охвата до 80 %, особенно с акцентом на цифровые компетенции, может существенно сократить ошибки, аварии и отклонения в процессе производства. В частности, дополнительное обучение операторов автоматизированных систем может снизить количество сбоев на 12 %, а также ускорить переход между партиями продукции.

Оптимизация логистики внутри производственных цепочек представляет собой еще один эффективный путь повышения производительности труда. Согласно данным производственно-экономического анализа, среднее время перемещения заготовки между переделами в 2024 г. составило 48 мин. Модернизация транспортных маршрутов, внедрение систем отслеживания перемещений в реальном времени и цифровая синхронизация с производственными заданиями могут сократить это время до 36 мин, увеличив оборачиваемость и снижая время простоев оборудования.

Одним из перспективных направлений является внедрение технологий цифрового дублирования (digital twin). Создание цифровых моделей доменных и конвертерных агрегатов позволит прогнозировать их загрузку, техническое состояние, температурные и химические параметры в режиме реального времени. Это позволит избежать внеплановых простоев и аварийных ситуаций. По оценкам отдела главного технолога, это может дать прирост выработки на 3 – 4 % без изменения численности персонала.

Следует также активизировать внедрение технологий предиктивного обслуживания оборудования. Анализ текущей статистики показал, что около 9 % простоев оборудования связано с непредсказуемыми поломками. Использование датчиков вибрации, температуры, давления в сочетании с искусственным интеллектом позволяет предсказывать потенциальные поломки за 48 – 72 ч до наступления аварийной ситуации. Это позволит сократить незапланированные простои и повысить надежность оборудования.

Инновационная активность персонала требует дополнительного стимулирования. Несмотря

на то, что в 2023 г. было подано 187 рационализаторских предложений, только 39 % из них были реализованы. Введение ускоренного процесса рассмотрения предложений, привязка к KPI работников и денежное стимулирование за реализованные инициативы может увеличить количество эффективных предложений в 1,5 – 2,0 раза и создать культуру непрерывных улучшений.

Заключение

Проведенное исследование, посвященное анализу производительности труда на предприятии АО «ЕВРАЗ ЗСМК», позволило всесторонне раскрыть сущность рассматриваемой экономической категории, оценить ее значение для промышленного производства (особенно в металлургическом секторе), а также определить ключевые тенденции и перспективные направления развития в этой области. Производительность труда выступает в качестве одного из основополагающих показателей эффективности использования трудовых ресурсов, отражающего соотношение между результатами производственной деятельности и затратами труда. Она оказывает прямое влияние на уровень конкурентоспособности предприятия, его финансовую устойчивость, рентабельность и инвестиционную привлекательность.

На аналитическом этапе работы рассмотрены показатели динамики производительности труда на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» за период 2020 – 2025 гг., что позволило выявить положительную тенденцию роста (с 3,95 до 4,89 млн руб. выработки на одного работника). Этот рост стал результатом реализации комплекса организационно-технических мероприятий, включая модернизацию оборудования, внедрение систем цифрового управления производством, снижение трудоемкости продукции и повышение эффективности использования сменного времени. Одновременно с этим были отмечены определенные проблемы: старение кадров, недостаточное вовлечение молодых специалистов, сохраняющиеся резервы в сфере автоматизации и логистики, высокая доля коллективной мотивации при слабом индивидуальном стимулировании.

Анализ динамики производительности труда металлургического предприятия позволил акцентировать внимание на выделении технической и социально-управленческую составляющих среди множества направлений повышения производительности труда: расширение охвата цифровых систем управления, внедрение предиктивного обслуживания, развитие системы индивидуального премирования, совершенствование графиков сменности, усиление внутрицеховой координации, стимулирование рационализаторской ак-

тивности и формирование культуры высокой эффективности. Отдельное внимание уделено кадровой политике, в том числе необходимости системного обновления персонала, повышения квалификации и создания условий для привлечения молодых работников. Расчетные данные показали, что реализация предложенных мер может обеспечить прирост производительности труда на 10 – 15 % в среднесрочной перспективе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Shi Y. Labor productivity of Chinese industrial enterprises: issues and solutions. *Journal of Economic Regulation*. 2023;14(3):51–62. <https://doi.org/10.17835/2078-5429.2023.14.3.051-062>
- Metlyakhin A.I., Nikitina N.A., Yarygina L.V., Orlova E.O., Analysis of the impact of economy digitalization on labor productivity in Russia. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2020;13(2):7–17. <https://doi.org/10.18721/JE.13201>
- Круглов Д.В., Резникова О.С., Плакса Ю.В. Производительность труда как ключевой фактор экономического роста. *Креативная экономика*. 2023;17(3):1137–1148. <https://doi.org/10.18334/ce.17.3.117404>
- Abramova N., Grishchenko N. ICTs, Labour Productivity and Employment: Sustainability in Industries in Russia. *Procedia Manufacturing*. 2020;43:299–305. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.161>
- Mayorova M.A., Markin M., Zaytsev A. Statistical analysis of the impact of innovations on labour productivity in the constituent entities of the Central Federal District. *Journal of regional and international competitiveness*. 2024;5(2):37–47. <https://doi.org/10.52957/2782-1927-2024-5-2-37-47>
- Белов С.В., Шубат О.М. Производительность труда на металлургическом предприятии: анализ и оценка. В кн.: *XVII Международная конференция «Российские регионы в фокусе перемен»: Сборник докладов, Екатеринбург, 2023:73–75.*
- Мацкуляк И.Д. Производительность труда, ее основные показатели, формы проявления и пути повышения. *Вестник университета*. 2024;9:90–98.
- Никитин Н.А., Яковлев Г.И. Производительность труда в системе управления конкурентоспособностью предприятия. *Управленческий учет*. 2024;5:215–220.
- Кузнецова Д.А., Лушникова И.С., Голубева Т.В. Факторы производительности труда на крупнейших российских предприятиях черной металлургии. *Экономика и предпринимательство*. 2023;5(154):1196–1200.
- World Steel in Figures 2022. *World Steel Association*. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2022/> (дата обращения: 05.03.2025)
- Бобко К.И., Затеякин О.А., Бобко Т.В. Отраслевая специализация Кемеровской области – Кузбасса: тенденции и проблемы, которые влияют на рост экономики и развитие региона. *Вестник университета*. 2024;9:42–55.
- Евраз ЗСМК. URL: <https://www.evraz.com/ru/company/assets/steel/> (дата обращения: 05.03.2025)
- Чижова Е.Н., Балабанова Г.Г. Резервы роста производительности труда промышленного предприятия как составляющая потенциала его развития. *Экономика. Информатика*. 2024;51(1):107–120. <https://doi.org/10.52575/2687-0932-2024-51-1-107-120>
- Лютягин Д.В., Забайкин Ю.В. Цифровизация промышленности и динамическое нормирование руда – факторы эффективного управления бизнес-процессами промышленного предприятия и роста производительности труда. *Управление образованием: теория и практика*. 2023;13(4):36–43.
- Golovina T., Polyagin A., Adamenko A., Khegay E., Schepinin V. Digital Twins as a New Paradigm of an Industrial Enterprise. *International Journal of Technology*. 2020;11(6):1115–1124. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i6.4427>
- Keynes J.M. *The General Theory of Employment, Interest and Money*. London. 1936:9.
- Prokopenko J. *Productivity management. A practical handbook*. Geneva: International Labour Office. 1987:234.
- Abramson R., Halset W. Planning for improved enterprise performance: A guide for managers and consultants. Geneva: ILO. 1979:7–19.
- Varlamova J., Larionova N. Labor Productivity in the Digital Era: A Spatial-Temporal Analysis. *International Journal of Technology*. 2020;11(6):1191–1200. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i6.4429>
- Пашеева Т.Ю. Цифровизация производственных процессов как возможность повышения производительности труда. Технологическая независимость и конкурентоспособность союзного государства, стран СНГ, ЕАЭС и ШОС. В кн.: *Сборник статей VI Международной научно-технической конференции. Т. 1*. Минск. 2023:348–350.

REFERENCES

- Shi Y. Labor productivity of Chinese industrial enterprises: issues and solutions. *Journal of Economic Regulation*. 2023;14(3):51–62. <https://doi.org/10.17835/2078-5429.2023.14.3.051-062>
- Metlyakhin A.I., Nikitina N.A., Yarygina L.V., Orlova E.O., Analysis of the impact of economy digitalization on labor productivity in Russia. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2020;13(2):7–17. <https://doi.org/10.18721/JE.13201>
- Kruglov D.V., Reznikova O.S., Plaksa Yu.V. Labor productivity as a key factor in economic growth. *Kreativnaya ekonomika*. 2023;17(3):1137–1148. (In Russ.). <https://doi.org/10.18334/ce.17.3.117404>
- Abramova N., Grishchenko N. ICTs, Labour Productivity and Employment: Sustainability in Industries in Russia. *Procedia Manufacturing*. 2020;43:299–305. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.161>
- Mayorova M.A., Markin M., Zaytsev A. Statistical analysis of the impact of innovations on labour productivity in the constituent entities of the Central Federal District. *Journal of regional and international competitiveness*. 2024;5(2):37–47. <https://doi.org/10.52957/2782-1927-2024-5-2-37-47>
- Belov S.V., Shubat O.M. Labor productivity at a metallurgical enterprise: analysis and assessment. In: *XVII International Conference «Rossiiskie regiony v fokuse peremen»: Collection of reports, Ekaterinburg*, 2023:73–75. (In Russ.).
- Matskulyak I.D. Labor productivity, its main indicators, forms of manifestation and ways of improvement. *Vestnik universiteta*. 2024;9:90–98. (In Russ.).
- Nikitin N.A., Yakovlev G.I. Labor productivity in the enterprise competitiveness management system. *Upravlencheskii uchet*. 2024;5:215–220. (In Russ.).
- Kuznetsova D.A., Lushnikova I.S., Golubeva T.V. Factors of labor productivity at the largest Russian ferrous metallurgy enterprises. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. 2023;5(154):1196–1200. (In Russ.).
- World Steel in Figures 2022. *World Steel Association*. URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2022/> (accessed 05.03.2025).
- Bobko K.I., Zatepyakin O.A., Bobko T.V. Industry specialization of the Kemerovo region - Kuzbass: trends and problems that affect the growth of the economy and development of the region. *Vestnik universiteta*. 2024;9:42–55. (In Russ.).
- Evraz ZSMK. URL: <https://www.evraz.com/ru/company/assets/steel/> (accessed 05.03.2025). (In Russ.).
- Chizhova E.N., Balabanova G.G. Reserves for growth of labor productivity of an industrial enterprise as a component of its development potential. *Ekonomika. Informatika*. 2024;51(1):107–120. (In Russ.). <https://doi.org/10.52575/2687-0932-2024-51-1-107-120>
- Lyutyagin D.V., Zabaikin Yu.V. Digitalization of industry and dynamic ore standardization are factors in the effective management of business processes of an industrial enterprise and growth of labor productivity. *Upravlenie obrazovaniem: teoriya i praktika*. 2023;13(4):36–43. (In Russ.).
- Golovina T., Polyanin A., Adamenko A., Khegay E., Schepinin V. Digital Twins as a New Paradigm of an Industrial Enterprise. *International Journal of Technology*. 2020;11(6):1115–1124. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i6.4427>
- Keynes J.M. *The General Theory of Employment, Interest and Money*. London. 1936:9.
- Prokopenko J. *Productivity management. A practical handbook*. Geneva: International Labour Office. 1987:234.
- Abramson R., Halset W. *Planning for improved enterprise performance: A guide for managers and consultants*. Geneva: ILO. 1979:7–19.
- Varlamova J., Larionova N. Labor Productivity in the Digital Era: A Spatial-Temporal Analysis. *International Journal of Technology*. 2020;11(6):1191–1200. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i6.4429>
- Pasheeva T.Yu. Digitalization of production processes as an opportunity to increase labor productivity. Technological independence and competitiveness of the union state, the CIS countries, the EAEU and the SCO. *Collection of articles of the VI International scientific and technical conference*. Vol. 1. Minsk. 2023:348–350. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Татьяна Владимировна Бобко, старший преподаватель кафедры менеджмента и территориального развития, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: BTV.27.Nov@mail.ru

ORCID: 0000-0003-4973-0189

SPIN-код: 5147-2651

Милана Витальевна Постниченко, студентка кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: milana_p_2003@icloud.com

Information about the authors:

Tatyana V. Bobko, Senior Lecturer, Head of the Department of Management and Territorial Development, Siberian State Industrial University
E-mail: BTV.27.Nov@mail.ru
ORCID: 0000-0003-4973-0189
SPIN-код: 5147-2651

Milana V. Postnichenko, student of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University
E-mail: milana_p_2003@icloud.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 12.05.2025

После доработки 20.05.2025

Принята к публикации 23.05.2025

Received 12.05.2025

Revised 20.05.2025

Accepted 23.05.2025

ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ, ПОЗДРАВЛЕНИЯ

95 ЛЕТ СИБИРСКОМУ ГОСУДАРСТВЕННОМУ ИНДУСТРИАЛЬНОМУ УНИВЕРСИТЕТУ!

Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ) отмечает важную дату в своей истории – юбилей, символизирующий выдающийся путь развития и достижения в области образования и науки на территории Сибири. Этот праздник – не только возможность вспомнить славные традиции, но и подчеркнуть перспективы дальнейшего роста и инноваций. В июне 2025 г. Сибирскому государственному индустриальному университету исполняется 95 лет.

Основанный в XX веке этот вуз прошел долгий путь развития, став центром подготовки высококвалифицированных специалистов в области металлургии, горного дела, машиностроения, энергетики, автоматизации, строительства и экономики.

За 95 лет своего существования вуз из узкоспециализированного металлургического института трансформировался в политехнический (индустриальный) университет.

Сибирский институт черных металлов (СИЧМ) создан в 1930 г. по решению Совета народных комиссаров и Центрального Исполнительного Комитета СССР на базе специальности «Металлургия черных металлов» Томского технологического института. Осенью 1931 г. по инициативе академика И.П. Бардина институт был переведен в г. Новокузнецк.

Сегодня университет – это динамично развивающийся научно-исследовательский центр, смело внедряющий современные технологии и инновационные подходы в образовательный процесс. Выпускники СибГИУ – востребованные профессионалы не только в сибирском регионе, но и далеко за его пределами, обладающие фундаментальными знаниями и практическими навыками.

В настоящее время СибГИУ осуществляет подготовку специалистов, бакалавров, магистров, аспирантов, докторантов, реализует программы дополнительного образования.

В университете успешно запущены новые образовательные программы, отвечающие вызовам времени: «Экономика и управление на предприятиях в металлургии», «Геоэкология и эффективное управление природными ресурсами», «Инженерная защита окружающей среды и природоподобные технологии».

В 2024 г. впервые осуществлен набор на уникальную программу с двойной квалификацией «Стандартизация и сертификация», реализуется

возможность освоения одновременно с высшим образованием основных программ профессионального обучения. В 2024 г. выполнен первый набор на направление подготовки 44.04.01 Педагогическое образование, профиль «Теория и методика обучения и воспитания» (магистратура).

С 2022 г. начата разработка концепции гибких модульных программ «Инженерный бакалавриат», основанных на проектном обучении. Управление подготовкой и реализацией таких программ по профилям «Цифровая металлургия», «Цифровой инжиниринг», «Управление производственными системами», «Организация перевозок и управление на автомобильном транспорте» и другим осуществляется созданным в 2023 г. Институтом передовых инженерных технологий.

Современная структура университета включает несколько институтов, научно-исследовательские центры и лаборатории, оснащенные новейшим оборудованием. Среди ключевых направлений исследований выделяются энергетика, металлургия, материаловедение, информационные технологии и экология.

За последние пять лет университет преобразился, открыв двери в мир передовых технологий и захватывающих возможностей: научно-образовательный центр «Цифровая металлургия» с применением технологий виртуальной и дополненной реальности, аддитивных технологий в металлургических производствах, лаборатория роботизированной сварки и центр коллективного пользования «Прототипирование и аддитивные технологии».

СибГИУ активно участвует в программе социально-экономического развития Кузбасса до 2030 г. и попал в направление по модернизации кузбасских вузов.

В стенах СибГИУ проводятся научные исследования фундаментального и прикладного характера по девяти основным научным направлениям, соответствующим семи отраслям науки. Тематика научно-исследовательских работ соответствует Приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ.

Современная материальная база позволяет проводить исследования по научным направлениям, связанным с горным делом, материаловедением, металлургией, сваркой и другими.

За последние годы в СибГИУ реализовано большое количество научно-исследовательских проектов в рамках федеральных и региональных грантовых программ.

Университет активно сотрудничает с ведущими предприятиями региона, обеспечивая интеграцию научных разработок в производственный процесс. Большое внимание уделяется международному сотрудничеству, участие в международных конференциях и программах обмена студентами способствует укреплению позиций вуза на мировой арене.

Одним из ярких примеров успешной интеграции теории и практики является сотрудничество с крупными промышленными компаниями, например, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», АО «Кузнецкие ферросплавы», АО «РУСАЛ Новокузнецк», ОК «Сибшхтострой» и другие. Совместные проекты позволяют студентам получать практические навыки, необходимые для будущей профессиональной деятельности.

За годы существования университет стал центром притяжения талантливых студентов, научных сотрудников и ведущих специалистов, внесших значительный вклад в развитие промышленности, технологий и экономики региона. Он успешно сочетает классические образовательные программы с современными исследованиями, что делает его одним из ведущих вузов в Сибири.

Перед университетом стоят амбициозные цели и задачи. Одной из приоритетных задач явля-

ется дальнейшее развитие научной инфраструктуры, внедрение инновационных технологий и методов обучения. Важным направлением остается повышение качества образовательного процесса, привлечение молодых ученых и талантливой молодежи.

Также планируется расширение международного сотрудничества, создание совместных исследовательских проектов и лабораторий с зарубежными партнерами. Это позволит университету укрепить позиции среди мировых лидеров высшего образования и науки.

Юбилей университета является значимым событием для всего региона, подчеркивая вклад учебного заведения в развитие промышленности и науки страны. В честь юбилея проводятся научные конференции, выставки достижений студентов и преподавателей, встречи выпускников разных поколений. Это событие объединяет всех тех, кто причастен к истории университета, позволяя вспомнить славное прошлое и задуматься о перспективах будущего развития.

В преддверии своего 95-летия научно-педагогический коллектив университета полон энергии, новых идей и амбициозных планов на дальнейшее развитие.

Ректорат университета и редакционная коллегия журнала сердечно поздравляют трудовой коллектив СибГИУ со славным юбилеем и желают неиссякаемого вдохновения, творческих свершений, новых побед и значимых достижений!

К ЮБИЛЕЮ АЛЕКСЕЯ БОРИСОВИЧА ЮРЬЕВА!



17 мая 2025 г. исполнилось 60 лет доктору технических наук, профессору, ректору Сибирского государственного индустриального университета, члену редакционной коллегии журнала Алексею Борисовичу Юрьеву.

Путь к профессиональному успеху начался с поступления в Сибирский металлургический институт (в настоящее время Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ)), который он окончил в 1987 г. по специальности «Обработка металлов давлением». Уже в студенческие годы Алексей Борисович проявлял глубокий интерес к научным исследованиям. После окончания Сибирского металлургического института в 1988 г. А.Б. Юрьев начал свой трудовой путь на Западно-Сибирском металлургическом комбинате (ЗСМК). Алексей Борисович прошел путь от бригадира по перемещению горячего металла до управляющего директора комбината. В период работы с 2000 по 2006 гг. в должности главного инженера ЗСМК он реализовал значительные реконструкции ряда производственных мощностей. Одним из самых значимых проектов стало внедрение технологии переработки конвертерного шлака, позволившей вернуть в производство до 97 % железа, содержащегося в отходах, что обеспечило экономию на закупке железорудного сырья и улучшило экологическую ситуацию в регионе. Запущены в эксплуатацию двухпозиционный агрегат ковш-печь и слабовая машина непрерывного литья заготовок в кислородно-конвертерном цехе № 2.

В 2007 г. Алексей Борисович назначен на должность управляющего директора Новокузнецкого металлургического комбината (НКМК), где под его руководством реализована программа по модернизации электросталеплавильного производства.

С 2011 по 2020 гг. А.Б. Юрьев являлся управляющим директором на ЗСМК и НКМК одновременно и затем возглавлял Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат (ЕВРАЗ ЗСМК). В этот период на объединенном комбинате реализованы несколько инвестиционных проектов. В 2013 г. запущен в эксплуатацию первый в России универсальный рельсобалочный стан, предназначенный для производства длинномерных (до 100 м) железнодорожных рельсов с повышенным эксплуатационным ресурсом. В настоящее время ЕВРАЗ ЗСМК является основным поставщиком рельсов для отечественных железнодорожных сетей; освоено производство рельсов для целого ряда зарубежных стран (Ирана, Германии, Египта, Пакистана, Саудовской Аравии, Алжира, Турции, Индии, Тайваня, Малайзии, Индонезии, Бразилии, Аргентины, Литвы, Латвии, Греции, Вьетнама). В 2014 г. на комбинате запущена в опытную эксплуатацию и затем в промышленную работу установка для вдувания пылеугольного топлива в доменные печи, что позволило значительно снизить себестоимость производства чугуна и повысить производительность доменного цеха при одновременном снижении выбросов парниковых газов в атмосферу.

Параллельно с производственной деятельностью Алексей Борисович активно занимался научными исследованиями. В 2003 г. он защитил кандидатскую диссертацию на тему «Механизмы формирования и эволюции градиентных структурно-фазовых состояний в низколегированных сталях», а в 2008 г. – докторскую диссертацию на тему «Формирование структуры и свойств железоуглеродистых сплавов при термомеханическом и плазменном упрочнении». Эти работы стали основой для разработки новых подходов к упрочнению металлов и сплавов, которые нашли применение в промышленности.

С 2020 г. Алексей Борисович перешел на постоянную работу в Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ) на должность проректора по перспективному развитию. С марта 2021 г. Алексей Борисович Юрьев по результатам проведенных выборов назначен ректором университета. Под руководством А.Б. Юрьева в СибГИУ в сотрудничестве с индустриальными партнерами проведена большая работа по модернизации лабораторной базы для проведения учебных занятий и научных исследований, открыты новые направления подготовки обучающихся. Существенно расширена тематика и увеличено количество НИР и НИОКР, проводимых при сотрудничестве с промышленными предприятиями, научных проектов, реализуемых в рамках грантов научных фондов и государственного задания.

На всем протяжении своей трудовой деятельности Алексей Борисович активно занимался наукой. Основным направлением научной деятельности А.Б. Юрьева является исследование процессов формирования и трансформации структуры и фазового состава стальных изделий в процессе их производства и эксплуатации. В рамках этого направления А.Б. Юрьевым разработаны физико-технические основы термомеханического упрочнения стальной арматуры и плазменного упрочнения валков, в том числе обоснованы механизмы формирования наноразмерных фаз и упрочнения низкоуглеродистой стали при термомеханической обработке и чугуновых валков при плазменной обработке, получена математическая модель расчета температурных полей и кинетики структурно-фазовых превращений, позволяющая прогнозировать

свойства термически упрочненного проката. Определены закономерности и природа деградации механических свойств и структурно-фазовых состояний арматуры при длительной эксплуатации в каркасе фундаментов промышленных зданий и сооружений, исследованы структурно-фазовые состояния и поверхности разрушения чугуновых валков после эксплуатации при прокатке арматуры. На основании проведенных исследований разработано агрегатное и технологическое обеспечение процесса термического упрочнения арматуры, осуществлено его внедрение и установление оптимальных режимов прокатки и охлаждения, создана промышленная технология повышения эксплуатационной стойкости валков.

На текущий момент под научным руководством Алексея Борисовича защищены четыре кандидатских диссертации, при его научной консультации – одна докторская диссертация. Перечень публикаций включает 11 монографий, более 450 научных статей, получено 99 патентов на изобретения. В 2024 г. А.Б. Юрьеву присвоено ученое звание профессора, в этом же году А.Б. Юрьев избран действительным членом (академиком) Российской академии естественных наук (РАЕН).

За результаты научно-производственной деятельности А.Б. Юрьеву присвоено звание «Почетный металлург», а за реализацию проекта реконструкции рельсобалочного цеха ЕВРАЗ ЗСМК – почетное звание Заслуженный металлург РФ. Алексей Борисович является Лауреатом премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, Лауреатом премии имени И.П. Бардина Российской академии наук; награжден орденами «Почета Кузбасса» и «Доблесть Кузбасса», медалями «За бизнес во имя созидания», «За особый вклад в развитие Кузбасса» II и III степени, почетными знаками «Золотая Шория» и «Золотой знак «Кузбасс».

Редакционная коллегия, коллектив университета и ученики сердечно поздравляют Алексея Борисовича Юрьева с юбилеем и желают крепкого здоровья и дальнейших успехов в реализации творческих планов в научной деятельности.

Оригинальная статья

УДК 539.2;669.017

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-153-159

**СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ ТЕМАТИКИ
ИССЛЕДОВАНИЙ НА КАФЕДРЕ ФИЗИКИ СибГИУ**

© 2025 г. Е. А. Будовских, Д. А. Романов, Л. П. Башенко

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

Аннотация. Рассмотрены особенности импульсных методов упрочнения и защиты поверхности металлов и сплавов, основанных на использовании физического явления электрического взрыва проводников. Выделены два основных направления исследований в этой области: электровзрывное легирование и электровзрывное напыление. Электровзрывное легирование представляет собой процесс, при котором при электрическом взрыве проводников формируется импульсная гетерогенная плазменная струя с высокими давлением и температурой, ее взаимодействие с упрочняемой поверхностью металла или сплава приводит к образованию ударно-сжатого слоя. Это ведет к оплавлению поверхности и насыщению ее компонентами струи, способствует образованию твердых растворов, формированию новых структурно-фазовых состояний и микроструктурным изменениям. Например, при электровзрывном алитировании титана вследствие образования новых фаз увеличиваются твердость и жаростойкость поверхности. Электровзрывное напыление является процессом, при котором мелкодисперсные частицы того или иного вещества, вводимые в область взрыва при формировании струи, ускоряются до высоких скоростей и наносятся на поверхность заготовки, образуя на ней покрытия с металлургической связью. Этот метод позволяет создавать защитные покрытия, повышающие, в частности, коррозионную стойкость и износостойкость деталей. Например, напыление никеля на стальные детали с использованием электрического взрыва может значительно увеличить их срок службы в агрессивных средах. Приведены сведения об основных полученных результатах, представленных в виде защищенных кандидатских и докторских диссертаций. Эти работы не только расширили понимание процессов, происходящих при электровзрывных обработках, но и открыли новые перспективы для применения этих технологий в различных областях промышленности. В целом, электровзрывные методы упрочнения и защиты металлов и сплавов остаются актуальной темой исследований, способствуя совершенствованию современных материалов и технологий.

Ключевые слова: поверхность, упрочнение, защита, электрический взрыв проводников, электровзрывное легирование, электровзрывное напыление

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10012, <https://rscf.ru/project/22-79-10012/>

Для цитирования: Будовских Е.А., Романов Д.А., Башенко Л.П. Становление и развитие электровзрывной тематики исследований на кафедре физики СибГИУ. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):153–159. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-153-159](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-153-159)

Original article

**FORMATION AND DEVELOPMENT OF ELECTRO-EXPLOSIVE RESEARCH
TOPICS AT THE DEPARTMENT OF PHYSICS OF SibSIU**

© 2025 E. A. Budovskikh, D. A. Romanov, L. P. Bashchenko

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

Abstract. The features of pulsed methods of hardening and protecting the surface of metals and alloys based on the use of the physical phenomenon of an electrical explosion of conductors are considered. Two main areas of research in this area are identified: electro-explosive alloying and electro-explosive spraying. Electro-explosive alloying is a process in which, during an electric explosion of conductors, a pulsed heterogeneous plasma jet with high pressure and temperature is formed, its interaction with the reinforced surface of a metal or alloy leads to the formation of a shock-compressed layer. This leads to melting of the surface and saturation of its components with jet, promotes the formation of solid solutions, the formation of new structural and phase states and microstructural changes. For example, during electroexplosion of titanium, due to the formation of new phases, the hardness and heat resistance of the surface increase. Electro-explosive spraying is a process in which finely dispersed particles of a substance introduced into the explosion area during the formation of a jet are accelerated to high speeds and applied to the surface of the workpiece, forming coatings with a metallurgical bond on it. This method makes it possible to create protective coatings that enhance, in particular, the corrosion resistance and wear resistance of parts. For example, spraying nickel onto steel parts using an electric explosion can significantly increase their service life in aggressive environments. The information about the main results obtained, presented in the form of defended candidate's and doctoral dissertations, is given. These works have not only expanded the understanding of the processes occurring during electrical explosive treatments, but have also opened up new perspectives for the application of these technologies in various fields of industry. In general, electro-explosive methods of hardening and protecting metals and alloys remain an urgent research topic, contributing to the improvement of modern materials and technologies.

Keywords: surface, hardening, protection, electrical explosion of conductors, electro-explosive alloying, electro-explosive spraying

Financing. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-79-10012, <https://rscf.ru/project/22-79-10012/>

For citation: Budovskikh E.A., Romanov D.A., Bashchenko L.P. Formation and development of electro-explosive research topics at the department of physics of SibSIU. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):153–159. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-153-159](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-153-159)

Введение

Упрочнение и защита поверхности конструкционных и инструментальных материалов – одна из актуальных целей современного производства в различных отраслях промышленности. Основной причиной разрушения материалов изделий и конструкций является воздействие на поверхность эксплуатационных факторов (теплового, механического, химического и других). В связи с этим постоянно совершенствуются и разрабатываются новые методы обработки поверхности.

В настоящее время в Сибирском государственном индустриальном университете (СибГИУ) сформировалась научная школа, которая активно проводит исследования по разработке новых методов упрочнения и защиты поверхности конструк-

ционных и инструментальных материалов в двух направлениях: электровзрывное легирование (ЭВЛ) и электровзрывное напыление (ЭВН).

В первом случае необходимые свойства поверхности обрабатываемого материала формируются, прежде всего, вследствие образования новых упрочняющих фаз при насыщении оплавленного поверхностного слоя продуктами электровзрывного разрушения проводника (например, металлической фольги из того или иного металла или сплава). Во втором случае в область взрыва вводится навеска того или иного химического соединения, которая плазменной струей переносится на нагреваемую до оплавления поверхность и формирует на ней покрытие с металлургической связью с основой.



Рис. 1. Лабораторная электровзрывная установка ЭВУ 60/10
Fig. 1. Laboratory electroexplosive spray coating plant EVU 60/10

Исследования по электровзрывному легированию металлов

В 60-е гг. прошлого века на кафедре физики Сибирского металлургического института им. С. Орджоникидзе (в настоящее время СибГИУ) научные интересы были сконцентрированы на механизмах разрушения ионных кристаллов. По электровзрывной тематике заведующим кафедрой В.М. Финкелем была защищена докторская диссертация [1], содержание которой отражено в монографии [2]. Впоследствии в качестве инструмента, приводящего к разрушению материала, В.М. Финкелем было предложено использовать импульсные плазменные струи, сформированные при электрическом взрыве проводников [3]. Была создана установка для их генерации (рис. 1), начаты исследования по разрушению поверхности ионных кристаллов. По результатам проведенных исследований аспирантом кафедры В.Н. Гурарием была защищена кандидатская диссертация [4].

Исследования по электровзрывной обработке материалов были продолжены аспирантом П.С. Носаревым, в диссертации которого исследовано уже не только разрушение, но и упрочнение поверхности [5]. Объектом воздействия были уже не ионные кристаллы, а углеродистые стали.

Развитием исследований В.Н. Гурария явилась диссертация Е.В. Евстифеева [6], посвященная разработке способа нанесения резистивных металлических покрытий на диэлектрические подложки. Научным руководителем работы был заведующий кафедрой физики Сибирского металлургического института (СМИ), д.ф.-м.н., профессор Л.Б. Зуев. Под его же руководством Л.Н. Гудимовой была выполнена еще одна диссертационная работа по электровзрывному упрочнению углеродистых и легированных сталей [7].

Последующие исследования, выполняемые под руководством уже к.т.н. П.С. Носарева, получили развитие, которое имело ярко выраженный прикладной характер. В конце 80-х гг. им были налажены научные связи с сотрудниками Московского авиационно-технологического института им. К.Э. Циолковского (МАТИ). Большой интерес к электровзрывной тематике проявил профессор кафедры материаловедения и технологии обработки материалов Г.В. Бобров. Материал об ЭВЛ и ЭВН был включен им в учебное пособие [8]. Результаты совместной работы СМИ и МАТИ отражены в диссертации В.П. Симанова [9], к.т.н., доцента кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники СибГИУ.

В это же время была создана новая электровзрывная установка, которая могла быть использована в условиях промышленного производства. Основная ее особенность заключалась в большой по объему вакуумируемой технологической камере, в которой размещался механизм для перемещения упрочняемых инструментов (сверл, резцов, штампов и другие). Взрываемые проводники располагали в кассете по 20 – 30 штук. Такая конструкция установки позволяла повысить производительность упрочняющей обработки и использовать ее в условиях промышленного производства. В связи с начавшейся в стране политико-экономической перестройкой продолжения эти исследования и разработки не получили.

Именно на этом этапе в СибГИУ сформировалась не только технологическая, но и научная основа дальнейших исследований электровзрывного легирования и электровзрывного напыления.



Рис. 2. Сотрудники лаборатории электровзрывного напыления СибГИУ при планировании исследований
Fig. 2. Employees of the SibGIU electro-explosive spraying Laboratory during research planning

Результаты исследования процессов при ЭВЛ отражены в кандидатской [10], а затем в докторской диссертациях [11] Е.А. Будовских. По результатам этих исследований опубликована монография [12]. Изучение ЭВЛ продолжено в кандидатской диссертации Л.П. Бащенко [13].

Электровзрывное напыление покрытий

При электровзрывном напылении навеска химического соединения вводится в область взрыва плазменной струей, переносится на облучаемую поверхность и затем распределяется по глубине оплаваемого слоя.

Отличие ЭВЛ от ЭВН состоит в том, что при ЭВЛ фазовый состав зоны легирования формируется из химических компонентов взрываемого проводника, образующих плазменную струю и взаимодействующих с элементами подложки. При этом содержание материала оплаваемого поверхностного слоя подложки (основы) в случае легирования является основным, а в случае напыления состав поверхностного модифицированного слоя определяется как материалом взрываемого проводника, так и порошковой навески того или иного химического соединения, вносимого в область взрыва. В обоих случаях обработка носит импульсный характер, поэтому формируется мелкодисперсная структура.

По результатам исследований в области ЭВН Д.А. Романовым защищены кандидатская [14] и докторская [15] диссертации. В них разработаны защищенные патентами на изобретения способы электровзрывного напыления износостойких и электроэрозийностойких покрытий различных составов на медь и алюминий, из которых изготавливаются электрические контакты и выключатели тока. Последующая электронно-пучковая обработка использована для гомогенизации состава и выравнивания рельефа покрытий. Полученные результаты могут быть использованы для обра-

ботки деталей и изделий, применяемых в машиностроительной, горнодобывающей и электротехнической отраслях промышленности.

По результатам исследований в области электровзрывной тематики в последние годы в СибГИУ защищены 10 кандидатских диссертаций. Так, под руководством Д.А. Романова в диссертации С.В. Московского [16] изучены особенности упрочнения поверхностей контактов переключателей мощных электрических сетей, в диссертации К.В. Соснина [17] исследованы особенности ЭВН иттрия на титановые сплавы, в диссертации В.В. Почетуки [18] проведено исследование формирования структуры и свойств электроэрозийностойких покрытий методом электронно-ионно-плазменного напыления.

В настоящее время в университете созданы Лаборатория электровзрывного напыления высоконадежных покрытий и новая электровзрывная установка для их напыления (рис. 2), на которой выполняются работы по упрочняющей обработке поверхности металлов импульсными плазменными струями. Актуальность выполняемых исследований подтверждают аналогичные работы, проводимые в Украине [19 – 21], Белоруссии [22 – 24], Казахстане [25; 26] и Китае. Коллектив лаборатории продолжает сотрудничать с молодыми учеными, в том числе иностранными, открыт для контактов с промышленными предприятиями, научными и учебными организациями в России и в других странах.

Заключение

Анализ публикаций, выполняемых в области импульсной плазменной обработки с целью упрочнения и защиты поверхности конструкционных и инструментальных материалов, показывает большие возможности в развитии новых методов и технологий обработки, в том числе электровзрывного легирования и электровзрывного напыле-

ния, которые активно на протяжении последних десятилетий развиваются в СибГИУ. Проводимые в настоящее время коллективом ученых лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий исследования соответствуют мировым тенденциям. Описанный научный путь и дух исследований, проводимых учеными СибГИУ в рассматриваемой области с 60-х гг. прошлого века, актуален и в настоящее время.

Ученые сохраняют исторические традиции и ищут новые пути решения актуальных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финкель В.М. *Экспериментальное исследование кинетики разрушения некоторых твердых тел*: автореф. дисс. докт. физ.-мат. наук. Москва. 1965;25.
2. Финкель В.М. *Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах*. Москва: Металлургия, 1970;376.
3. Финкель В.М. *Об импульсивном воздействии плазмы на материалы*. Новокузнецк: Сиб. металлург. ин-т им. Серго Орджоникидзе, 1969;47.
4. Гурарий В.Н. *Прочность и разрушение кристаллов при импульсивном воздействии сверхзвуковых плазменных струй*: автореф. дис. канд. техн. наук. Новокузнецк. 1969;19.
5. Носарев П.С. *Упрочнение и разрушение углеродистых сталей при воздействии быстрых плазменных пучков*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 1973;22.
6. Евстифеев Е.В. *Получение и исследование физических свойств металлических покрытий на диэлектриках*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Томск. 1991;18.
7. Гудимова Л.Н. *Обработка сплавов высокотемпературными плазменными потоками с целью создания слоев с особыми физическими свойствами*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Томск. 1992;25.
8. Бобров Г.В., Ильин А.А. *Нанесение неорганических покрытий. Теория. Технология. Оборудование*. Москва: Интермет Инжиниринг, 2004;628.
9. Симаков В.П. *Поверхностное легирование металлов при воздействии плазмы конденсаторного разряда*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Москва. 1992;22.
10. Будовских Е.А. *Формирование структурно-фазового состояния и свойств поверхностных слоев металлов при электровзрывном легировании*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 1999;24.
11. Будовских Е.А. *Закономерности формирования поверхностных слоев металлов и сплавов при электровзрывном легировании*: автореф. дисс. докт. техн. наук. Новокузнецк. 2008;37.
12. *Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов* / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. Новокузнецк: СибГИУ; 2007;301.
13. Башенко Л.П. *Упрочнение поверхности титана при электровзрывном науглероживании и карбоборировании и последующей электронно-пучковой обработке*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 2013;17.
14. Романов Д.А. *Формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионностойких покрытий методом электровзрывного напыления*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 2012;17.
15. Романов Д.А. *Закономерности формирования структуры и свойств электровзрывных покрытий на металлах и сплавах*: автореф. дисс. докт. техн. наук. Новокузнецк. 2018;37.
16. Московский С.В. *Формирование структуры и свойств электровзрывных электроэрозионностойких покрытий на основе серебра и оксидов металлов на медных контактах переключателей мощных электрических сетей*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 2020;20.
17. Соснин К.В. *Структура, фазовый состав и свойства титана после электровзрывного легирования иттрием и электронно-пучковой обработки*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 2017;21.
18. Почетуха В.В. *Формирование структуры и свойств электроэрозионностойких покрытий на основе серебра и упрочняющих фаз методом электронно-ионно-плазменного напыления*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 2022;18.
19. Nikolchuk I.S., Chumakov A.N., Kuznechik O.O., Minko D.V. Pulsed plasma surface treatment of constructional steel in the air. In: 7 International Conference "Plasma Physics and Plasma Technology": contributed papers. Minsk, Belarus, 2012;438–441.
20. Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N. Modification of material properties and coating deposition using plasma jets. *Physics Uspekhi*. 2005;48(5):487–514. <https://doi.org/10.1070/PU2005v048n05ABEH002055>
21. Тюрин Ю.Н., Жадкевич М.Л. *Плазменные упрочняющие технологии*. Киев: Наукова думка, 2008;216.
22. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynskic V.M., Kuzmitski A.M. Thermal stability of the structure and phase composition

- of titanium treated with compression plasma flows. *Surf. Coat. Tech.* 2015;278:183. <https://doi.org/10.1134/S102745101804016X>
23. Черенда Н.Н., Басалай А.В., Шиманский В.И., Асташинский В.М. Модификация поверхности сплава Ti – 6Al – 4V при высокоэнергетическом плазменном воздействии. *Докл. НАН Беларуси.* 2016;60(2):102–108.
 24. Асташинский В.М., Углов В.В., Черенда Н.Н., Шиманский В.И. *Модификация титана при воздействии компрессионными плазменными потоками.* Минск: Белорусская наука, 2016;179.
 25. Kakimzhanov D.N., Rakhadilov K., Tyurin Yu.N., Kolisnichenko O.V., Zhurerova L.G., Dautbekov M.K. Influence of pulsed plasma treatment on phase composition and hardness of Cr₃C₂ – NiCr coatings. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials.* 2021;5(2):45–51.
 26. Kengesbekov A.B., Rakhadilov B.K., Tyurin Yu.N., Magazov N.M., Kylyshkanov M.K., Sagdoldina Zh.B. The influence of pulse-plasma treatment on the phase composition and hardness of Fe – TiB₂ – CrB₂ coatings. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials.* 2021;5(2):155–162.
- ### REFERENCES
1. Finkel V.M. *Experimental investigation of fracture kinetics of some solids.* Extended abstract of doctor's thesis. Moscow. 1965:25. (In Russ.).
 2. Finkel V.M. *Physics of destruction. The growth of cracks in solids.* Moscow: Metallurgiya Publ., 1970:376. (In Russ.).
 3. Finkel V.M. *On the impulsive effect of plasma on materials.* Novokuznetsk: Sib. metallurg. in-t named after Sergo Ordzhonikidze, 1969:47. (In Russ.).
 4. Gurari V.N. *Strength and fracture of crystals under the impulsive action of supersonic plasma jets.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk, 1969:19. (In Russ.).
 5. Nosarev P.S. *Hardening and destruction of carbon steels under the influence of fast plasma beams.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk, 1973:22. (In Russ.).
 6. Evstifeev E.V. *Preparation and investigation of the physical properties of metal coatings on dielectrics.* Extended abstract of candidate's thesis. Tomsk, 1991:18. (In Russ.).
 7. Gudimova L.N. *Processing of alloys by high-temperature plasma flows in order to create layers with special physical properties.* Extended abstract of candidate's thesis. Extended abstract of candidate's thesis. Tomsk, 1992:25. (In Russ.).
 8. Bobrov G.V., Ilyin A.A. *Application of inorganic coatings. Theory. Technology. Equipment.* Moscow: Internet Engineering, 2004:628. (In Russ.).
 9. Simakov V.P. *Surface alloying of metals under the influence of plasma capacitor discharge.* Extended abstract of candidate's thesis. Moscow, 1992:22. (In Russ.).
 10. Budovskikh E.A. *Formation of the structural and phase state and properties of metal surface layers during electroexplosive alloying.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk, 1999:24. (In Russ.).
 11. Budovskikh E.A. *Patterns of formation of surface layers of metals and alloys during electroexplosive alloying.* Extended abstract of doctor's thesis. Novokuznetsk, 2008:37. (In Russ.).
 12. Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Physical foundations of electroexplosive alloying of metals and alloys.* Novokuznetsk: SibGIU;2007:301. (In Russ.).
 13. Bashchenko L.P. *Hardening of the titanium surface during electro-explosive carburization and carboborination and subsequent electron beam treatment.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk. 2013;17. (In Russ.).
 14. Romanov D.A. *Formation of the structure, phase composition and properties of electroerosion-resistant coatings by electro-explosive spraying.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk, 2012;17. (In Russ.).
 15. Romanov D.A. *Patterns of formation of the structure and properties of electroexplosive coatings on metals and alloys.* Extended abstract of doctor's thesis. Novokuznetsk. 2018;37. (In Russ.).
 16. Moskovsky S.V. *Formation of the structure and properties of electroexplosive electroerosion-resistant coatings based on silver and metal oxides on copper contacts of switches of high-power electrical networks.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk. 2020;20. (In Russ.).
 17. Sosnin K.V. *Structure, phase composition and properties of titanium after electroexplosive doping with yttrium and electron beam treatment.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk. 2017;21. (In Russ.).
 18. Pochetukha V.V. *Formation of the structure and properties of electroerosion-resistant coatings based on silver and hardening phases by electron-plasma spraying.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk. 2022;18. (In Russ.).
 19. Nikolchuk I.S., Chumakov A.N., Kuznechik O.O., Minko D.V. Pulsed plasma surface treatment of constructional steel in the air. In: *7 International Conference "Plasma Physics and Plasma Technology": contributed papers.* Minsk, Belarus, 2012;438–441.

20. Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N. Modification of material properties and coating deposition using plasma jets. *Physics Uspekhi*. 2005;48(5):487–514.
<https://doi.org/10.1070/PU2005v048n05ABEH002055>
21. Tyurin Yu.N., Zhadkevich M.L. *Plasma strengthening technologies*. Kiev: Naukova dumka, 2008;216. (In Russ.).
22. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynskic V.M., Kuzmitski A.M. Thermal stability of the structure and phase composition of titanium treated with compression plasma flows. *Surf. Coat. Tech.* 2015;278:183.
<https://doi.org/10.1134/S102745101804016X>
23. Cherenda N.N., Basalai A.V., Shimansky V.I., Astashinsky V.M. Modification of the surface of Ti – 6Al – 4V alloy under high-energy plasma exposure. *Dokl. NAS of Belarus*. 2016;60(2):102–108. (In Russ.).
24. Astashinsky V.M., Uglov V.V., Cherenda N.N., Shimansky V.I. *Modification of titanium under the influence of compression plasma flows*. Minsk: Belorusskaya Nauka Publ., 2016;179. (In Russ.).
25. Kakimzhanov D.N., Rakhadilov K., Tyurin Yu.N., Kolisnichenko O.V., Zhurerova L.G., Dautbekov M.K. Influence of pulsed plasma treatment on phase composition and hardness of Cr₃C₂ – NiCr coatings. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*. 2021;5(2):45–51.
26. Kengesbekov A.B., Rakhadilov B.K., Tyurin Yu.N., Magazov N.M., Kylyshkanov M.K., Sagdoldina Zh.B. The influence of pulse-plasma treatment on the phase composition and hardness of Fe – TiB₂ – CrB₂ coatings. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*. 2021;5(2):155–162.

Сведения об авторах

Евгений Александрович Будовских, д.т.н., доцент, профессор-консультант кафедры естественнонауч-

ных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: budovskikh@mail.ru

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

Денис Анатольевич Романов, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник УНИ, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-6880-2849

E-mail: romanov_da@physics.sibsui.ru

Information about the authors:

Evgeny A. Budovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof, Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

E-mail: budovskikh@mail.ru

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

Denis A. Romanov, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof, Leading Researcher, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-6880-2849

E-mail: romanov_da@physics.sibsui.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 02.06.2025

После доработки 16.06.2025

Принята к публикации 19.06.2025

Received 02.06.2025

Revised 16.06.2025

Accepted 19.06.2025

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

С 22 июня 2023 г. журнал «Вестник Сибирского государственного индустриального университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальностям:

1.3.8. *Физика конденсированного состояния (физико-математические, технические);*

2.6.1. *Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические);*

2.6.2. *Металлургия черных, цветных и редких металлов (технические);*

2.6.17. *Материаловедение (технические).*

В журнале публикуются оригинальные, ранее не публиковавшиеся статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера по следующим направлениям:

1. *Физика конденсированного состояния.*

2. *Металлургия и материаловедение.*

3. *Экономика. Управление. Финансы.*

К рукописи следует приложить рекомендацию соответствующей кафедры высшего учебного заведения, экспертное заключение, разрешение ректора или проректора высшего учебного заведения (для неучебного предприятия – руководителя или его заместителя) на опубликование результатов работ, выполненных в данном вузе (предприятии), авторское согласие.

В редакцию следует направлять материалы статьи в электронном виде и два экземпляра текста статьи на бумажном носителе. Для ускорения процесса рецензирования статей электронный вариант статьи и скан-копии сопроводительных документов рекомендуется направлять по электронной почте по адресу e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru. При направлении материалов в редакцию необходимо указывать раздел, в котором статья будет опубликована.

Таблицы, библиографический список и подрисуночный 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 Equation 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 статье необходимо привести на английском языке: название статьи, Ф.И.О. авторов, место их работы, аннотацию и ключевые слова.

Краткие сообщения должны иметь самостоятельное научное значение и характеризоваться новизной и оригинальностью. Они предназначены для публикации в основном аспирантских работ. Объем кратких сообщений не должен превышать двух страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, включая таблицы и библиографический список. Под заголовком в скобках следует указать, что это краткое сообщение. Допускается включение в краткое сообщение одного несложного рисунка, в этом случае текст должен быть уменьшен. Приводить в одном сообщении одновременно таблицу и рисунок не рекомендуется.

Количество авторов в кратком сообщении должно быть не более трех. Требования к оформлению рукописей и необходимой документации те же, что к оформлению статей.

Корректуры статей авторам, как правило, не посылают.

В случае возвращения статьи автору для исправления (или при сокращении) датой представления считается день получения окончательного текста.

Статьи, поступающие в редакцию, проходят гласную рецензию.

Статьи журнала индексируются в РИНЦ, представлены на сайтах <https://vestnik.sibsiu.ru/> и <https://www.sibsiu.ru> в разделе Наука и инновации (Периодические научные издания).

TO THE AUTHORS ATTENTION

On June 22, 2023 the journal, "Bulletin of Siberian State Industrial University" was included in the List of peer-reviewed scientific editions. The journal should publish the main scientific results of dissertations for the degrees of Candidates and Doctors of Sciences in following specialties:

1.3.8. *Condensed matter physics (physical and mathematical, engineering);*

2.6.1. *Metallurgy and heat treatment of metals and alloys (engineering);*

2.6.2. *Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals (engineering);*

2.6.17. *Materials science (engineering).*

The journal "Bulletin of the Siberian State Industrial University" received K2 category.

The journal publishes original, previously unpublished articles containing the most significant results of scientific and technical experimental research, as well as the results of problematic work in the following areas:

1. *Condensed matter physics;*
2. *Metallurgy and materials science;*
3. *Economics. Management. Finance.*

The paper should be accompanied by the recommendation of the relevant department of the higher education institution, expert opinion, permission of the rector or vice-rector of the higher education institution (for a non-academic enterprise – the head or his deputy) to publish the results of the work performed in this university (enterprise), author's consent.

The editorial office should receive the materials of the article in electronic form and two copies of the text of the article in hard copy. To speed up the review process, it is recommended to send the electronic version of the article and scanned copies of accompanying documents by e-mail to vestnicsibgiu@sibsiu.ru. You should indicate the section in which the article will be published before sending materials to the editorial office.

Tables, reference list, and captions should be presented on separate pages. You need to make references to tables, figures and references cited in the article.

Illustrations should be presented separately from the text. Explanatory inscriptions in illustrations should be made in Times New Roman Italic font size 9 (Greek letters – in Symbol Regular font). Gray-scale images, the size of which should not exceed 75 × 75 mm (photographs and other images containing shades of black), should be sent as raster graphic files (formats *.bmr, *.jpg, *.gif, *.tif) in the color scale "shades of gray" with a resolution of at least 300 dpi. Stroke drawings (graphs, flowcharts, etc.) should be presented in "black and white" scale with a resolution of at least 600 dpi. You do not need to draw grid lines on the graphs, and to "fill" black experimental or calculation points (markers) without absolute necessity. Stroke drawings created using common programs MS Excel, MS Visio, etc., should be presented in the format of the original application (*.xls, *.vsd, etc.).

Typography of physical quantities: Latin letters in light italic, Russian and Greek letters in light straight type. Numbers and units of measurement are in light-colored straight type. Particular attention should be paid to the correct representation of indexes and degree indicators. Formulas are typed with the help of formula editors' Equatn or Math Ture, the scale of formulas should be 100 %. The scale is set in the Format Object dialog box. In the formula editor, use the "Math" style for Latin and Greek letters, and the "Text" style for Russian letters. The size should be "Full", for degrees and

indexes – "Subscript / Sub-Subscript". Do not use the "Other" style.

It is necessary to avoid repetition of the same data in tables, graphs and the text of the article. The volume of the article should not exceed 18 – 20 pages of text, printed in font 14 at one and a half intervals.

The manuscript should be carefully checked, signed by the author (if there are several authors, the number of which should not exceed five – by all authors). At the end of the manuscript indicate the full name of the higher education institution (enterprise) and department, the date of submission of the manuscript, as well as complete information about each author (full name, place of work, position, academic degree, title, office and home addresses with postal codes, telephone, e-mail, ORCID). It is necessary to indicate with whom to correspond.

References cited in the article should be given in a general list in the order of mentioning in the article, with the reference in the text indicated by a serial number. The list of literature sources is recommended no less than 20.

The references shall be arranged in accordance with GOST 7.0. 100 – 2018: a) for books – surnames and initials of authors, full title of the book, volume number, place of publication, publisher and year of publication, total number of pages; b) for journal articles - surnames and initials of authors, full title of the journal, title of the article, year of publication, volume number, issue number, pages covered by the article; c) for articles from collections – surnames and initials of authors, title of the collection, title of the article, place of publication, publisher, year of publication, to whom it belongs, number or issue, pages covered by the article.

Foreign names and terms should be given in the text in Russian transcription. In the references, the names of authors, full names of books and journals should be given in their original transcription.

References to unpublished works are not allowed.

The article should be accompanied by an abstract of 200 – 250 words and key words.

The title of the article, full name of the authors, place of their work, abstract and key words should be given in English at the of the article.

Short reports should have independent scientific value and be characterized by novelty and originality. These are mainly meant for the publication of postgraduate papers. Short reports should not exceed two pages of text, typed in 14-point font at one and a half intervals, including tables and bibliography. It should be indicated in brackets under the title that it is a short paper. You can include one simple figure in a brief message; in this case, the text should be reduced. We do not recommended 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).

На д н о м е р о м р а б о т а л и

Коновалов С.В., главный редактор

Запольская Е.М., ответственный секретарь

Темлянцева Е.Н., верстка

Олендаренко Е.В., менеджер по работе с клиентами

Безродная Е.А., администратор сайта