ISSN 2304-4497
eISSN 2307-1710

СибГИУ
Первый вуз Кузбасса

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Научный журнал

ВЕСТНИК Сибирского государственного индустриального университета

№ 1 (55), 2026

Издается с июня 2012 года
Выходит 4 раза в год

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Scientific journal

BULLETIN of the Siberian State Industrial University

No. 1 (55), 2026

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)
Регистрационный номер СМИ:
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
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
Учредитель
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

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)
Media registration number:
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
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
Founder
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Siberian State Industrial University»

Подписано в печать
31.03.2026 г.
Выход в свет
31.03.2026 г.
Формат бумаги 60×88 1/8.
Бумага писчая.
Печать офсетная.
Усл. печ. л. 4,1.
Уч.-изд. л. 4,4.
Тираж 300 экз.
Заказ № 45.
Цена свободная

Signed to the press
31.03.2026
Coming out
31.03.2026
The paper size is 60×88 1/8.
Writing paper.
Offset printing.
Usl. pech. l. 4,1.
Uch.-ed. l. 4,4.
The circulation is 300 copies.
Order no. 45.
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, заведующий кафедрой оборудования и технологии сварочного производства, Московский политехнический университет, 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, заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Россия
Затепякин Олег Аркадьевич, д.э.н., профессор, профессор кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия
Кириенко Анна Павловна, д.э.н., профессор, директор Байкальского института БРИКС, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, профессор кафедры финансового и налогового менеджмента, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
Климков Алексей Григорьевич, к.э.н., начальник научно-исследовательского отдела ЗАО «Структурные технологии», г. Минск, Республика Беларусь
Колубаев Евгений Александрович, д.т.н., профессор Российской академии наук, директор, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия
Коган Антон Борисович, д.э.н., доцент, профессор кафедры экономики предпринимательской деятельности и логистики, Новосибирский государственный университет экономики и управления «НИНХ», г. Новосибирск, Россия
Нехорошева Людмила Николаевна, д.э.н., профессор, заведующий кафедрой экономики промышленных предприятий, Белорусский государственный экономический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Namrata Gangil, PhD, доцент кафедры машиностроения, Инженерный колледж Аджая Кумара Гарга, г. Газиабад, Индия
Осколкова Татьяна Николаевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия
Пантелеев Василий Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электроэнергетики, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия
Пантелеенко Федор Иванович, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларуси
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
Реймер Валерий Викторович, д.э.н., профессор, декан факультета экономики и бизнеса, Московский финансово-юридический университет МФЮА, г. Москва, Россия
Симченко Наталья Александровна, д.э.н., профессор, профессор кафедры экономической теории и истории экономической мысли, Санкт-Петербурский государственный университет, г. Сант-Петербург, Россия
Siddiquee Arshad Noor, PhD, профессор кафедры машиностроения Джамия Миллия Исламия, Центральный университет, г. Нью-Дели, Индия
Стрижак Павел Александрович, член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией тепломассопереноса, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
Султангузин Ильдар Айдарович, д.т.н., профессор, профессор кафедры промышленных теплоэнергетических систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия
Solotareff Stefan, PhD, доктор теоретической физики, профессор психологии-математики, Государственный университет Уджда, Марокко
Sonar Tushar Madhukar, Ph.D., старший научный сотрудник кафедры сварочного оборудования и технологий Южно-Уральского государственного университета (Национального исследовательского университета), г. Челябинск, Россия
Темлянцев 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, профессор кафедры обработки металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК, 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 Techno-logy 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, Head of the Department of Equipment and Technology of Welding Production, Moscow Polytechnic University, 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, Head of the Department of Materials Science and Technology of Materials, St. Petersburg State Maritime Technical University, St. Petersburg, Russia
Zatepyakin Oleg Arkadyevich, Doctor of Economics, Professor, Department of Management and Sectoral Economics, Siberian State Industrial University, Novokunetsk, Russia
Kiriyenko Anna Pavlovna, Doctor of Economics, Professor, Director of the Baikal BRICS Insti-tute, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Professor of the Department of Fi-nancial 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
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
Panteleenko Fedor Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
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
Reimer Valery Viktorovich, Doctor of Economics, Professor, Dean of the Faculty of Economics and Business, Accredited Private Institution of Higher Education "Moscow University of Finance and Law (MFUA), Moscow, Russia
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, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, 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, Professor of the Department of Metalworking by Pressure and Materials Science of EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Зюзин Д.И.., Маркидонов А.В. Влияние примесных атомов водорода на энергетические характеристики кристаллических решеток Ni, Al и Ni_3Al при упругой деформации.....9

Камара Д., Диавара М., Сейду М., Маркидонов А.В., Громов В.Е. Модификация электронных свойств графена, допированного атомами азота 17

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Кудинов В.А., Зайцев С.В., Керосиров Е.В., Долгих В.Д. Расчет тепловых характеристик пиролитической установки производства водорода из метана.....27

Сафонов С.О., Фейлер С.В. Исследование влияния характеристик пыли электросталеплавильного производства на процесс магнитной сепарации 37

Осипович К.С., Чумаевский А.В., Кушнарев Ю.В., Панфилов А.О., Колубаев Е.А. Управление зеренной структурой титановых сплавов, получаемых методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии при использовании ультразвукового воздействия.....47

Беляев Н.Е., Шкода О.А. Использование вторичного сырья для получения силицидов ниобия.....59

Негодяев В.О., Илларионов Д.В., Жаткин С.С., Никитин К.В. Влияние режимов лазерной наплавки на коэффициент термического линейного расширения сплава марки ЭП648.....63

Ковалев Р.Ю., Никитин А.П., Заостровский А.Н. Зависимость зольности углей различной степени метаморфизма от гранулометрического состава.....73

Куценко А.И., Князев С.В., Усольцев А.А., Темлянцев М.В., Куценко А.А., Гусев М.М. Оптимизация технологических параметров литья с использованием физико-информированных генеративных моделей для минимизации дефектности стальных отливок.....84

CONTENTS

CONDENSED MATTER PHYSICS

Ziuzin D.I., Markidonov A.V. Effect of impurity of hydrogen atoms on the energy characteristics of Ni, Al, and Ni_3Al crystal lattices under elastic deformation.....9

Camar D., Diawara M., Seydou M., Markidonov A.V., Gromov V.E. Modification of the electronic properties of graphene doped with nitrogen atoms.....17

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

Kudinov V.A., Zaitsev S.V., Kerosirov E.V., Dolgikh V.D. Calculation of thermal characteristics of a pyrolytic plant for the production of hydrogen from methane.....27

Safonov S.O., Feiler S.V. Study of the influence of dust characteristics from electric steel melting on the magnetic separation process.....37

Osipovich K.S., Chumaevskii A.V., Kushnarev Yu.V., Panfilov A.O., Kolubaev E.A. Grain structure control of titanium alloys produced by wire-feed electron beam additive technology using ultrasonic irradiation 47

Belyaev N.E., Shkoda O.A. The use of secondary raw materials for the production of niobium silicides.....59

Negodyaev V.O., Illarionov D.V., Zhatkin S.S., Nikitin K.V. Influence of laser cladding modes on the coefficient of linear thermal expansion of EP648 material.....63

Kovalev R.Yu., Nikitin A.P., Zaostrovsky A.N. Dependence of the ash content of coals of varying degrees of metamorphism on the granulometric composition 102

Kutsenko A.I., Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Temlyantsev M.V., Kutsenko A.A., Gusev M.M. Optimization of technological parameters of casting using physico-informed generative models to minimize defectiveness of steel castings.....84

Михно А.Р., Махнева Г.И., Ломиворотов Н.П., Запольская Е.М., Панченко И.А., Коновалов С.В. Электродуговая наплавка порошковой проволокой для получения износостойких покрытий.....94

Протопопов Е.В., Беленецкий Е.А., Якушевич Н.Ф., Запольская Е.М. Исследование процессов взаимодействия газокислородных факелов с расплавом в рабочем пространстве конвертеров.....103

Mikhno A.R., Makhneva G.I., Lomivorotov N.P., Zapolskaya E.M., Panchenko I.A., Konovalov S.V. Electric arc surfacing with powdered wire to produce wear-resistant coatings.....94

Protopopov E.V., Belenetsky E.A., Yakushevich N.F., Zapolskaya E.M. Investigation of the processes of interaction of oxygen gas flares with melt in the working space of converters.....103

ЭКОНОМИКА. УПРАВЛЕНИЕ. ФИНАНСЫ

ECONOMY. MANAGEMENT. FINANCE

Самохвалова О.С., Черникова О.П., Финская Т.А., Титова Ж.М. Формирование высокомаржинальной углехимической повестки Кузбасса: условия и перспективы.....114

Samokhvalova O.S., Chernikova O.P., Finskaya T.A., Titova Z.M. Formation of a high-margin coal chemical agenda in Kuzbass: conditions and prospects.....114

ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ, БИОГРАФИИ

Памяти Александра Марковича Глезера...122

К сведению авторов.....123

In memory of Alexander Markovich Glazer...122

To the authors attention.....124

Оригинальная статья

УДК 538.955:539.21:539.23:544.032.5

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-9-16

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК Ni, Al И Ni_3Al ПРИ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ

© 2026 г. Д. И. Зюзин[1], А. В. Маркидонов[2]

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

[2]**Кузбасский гуманитарно-педагогический институт Кемеровского государственного университета** (Россия, 654079, Кемеровская обл., Новокузнецк, пр. Металлургов, 19)

Аннотация. Методом молекулярной динамики при температуре 0 К исследовано влияние упругой деформации (сжатие и растяжение до ±5 %) и внедрения атомов водорода (концентрация от 1 до 50 атомов) на внутреннюю энергию кристаллических решеток никеля, алюминия и интерметаллида Ni_3Al. Моделирование проводили с использованием надежного межатомного потенциала EAM, адекватно описывающего взаимодействие в системе металл – водород. Проанализировано размещение водорода в тетраэдрических и октаэдрических междоузлиях, а также деформация вдоль одной, двух и трех осей, что позволило оценить вклад различных типов напряженного состояния. Показано, что как деформация, так и внедрение водорода приводят к увеличению внутренней энергии систем, снижая их термодинамическую стабильность. Наибольший рост энергии наблюдается при сочетании сжатия (–5 %) и высоких концентраций водорода в тетраэдрических порах, что особенно характерно для интерметаллида Ni_3Al. Обнаружено, что прочность связи водорода с решеткой зависит от природы металла: связь Ni – H оказывается прочнее, чем Al – H благодаря электронной структуре никеля. Для интерметаллида Ni_3Al характерен синергетический эффект, приводящий к повышенному сродству с водородом в отсутствие деформации. При деформировании же его чувствительность к водородному внедрению ослабевает, приближаясь к среднему значению между никелем и алюминием. Результаты согласуются с законами термодинамики и теорией упругости, а также объясняют механизм водородного охрупчивания, вызванного локальными искажениями решетки и изменением электронной плотности. Полученные результаты важны для прогнозирования долговечности и надежности материалов в условиях водородсодержащих сред и механических нагрузок.

Ключевые слова: никель, алюминий, интерметаллид, кристаллическая решетка, потенциальная энергия, водородное охрупчивание, упругая деформация, молекулярная динамика

Для цитирования: Зюзин Д.И.., Маркидонов А.В. Влияние примесных атомов водорода на энергетические характеристики кристаллических решеток Ni, Al и Ni_3Al при упругой деформации. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):9–16. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-9-16*

Original article

EFFECT OF IMPURITY OF HYDROGEN ATOMS ON THE ENERGY CHARACTERISTICS OF Ni, Al AND Ni_3Al CRYSTAL LATTICES UNDER ELASTIC DEFORMATION

© 2026 D. I. Ziuzin[1], A. V. Markidonov[2]

[1]**Altai State Technical University named after I.I. Polzunov** (46 Lenin ave., Barnaul, Altai Territory, 656038, Russian Federation)

[2]**Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of Kemerovo State University** (19 Metallurgov ave., Novokuznetsk, Kemerovo region, 654079, Russian Federation)

Abstract. The effect of elastic deformation (compression and stretching up to ±5 %) and the incorporation of hydrogen atoms (concentration from 1 to 50 atoms) on the internal energy of crystal lattices of nickel, aluminum and Ni_3al intermetallic compounds has been studied by the method of molecular dynamics at a temperature of 0 K. The simulation was performed using a reliable interatomic potential EAM, which adequately describes the interaction in the metal–hydrogen system. The placement of hydrogen in tetrahedral and octahedral interstices, as well as deformation along one, two, and three axes, was analyzed, which made it possible to evaluate the contribution of various types of stress states. It is shown that both the deformation and the introduction of hydrogen lead to an increase in the internal energy of the systems, reducing their thermodynamic stability. The greatest increase in energy is observed with a combination of compression (–5 %) and high carbon concentrations in tetrahedral pores, which is especially typical for Ni_3Al intermetallic. It was found that the bond strength of hydrogen with the lattice depends on the nature of the metal: the Ni – H bond turns out to be stronger than Al – H due to the electronic structure of nickel. Ni_3Al intermetallic compound is characterized by a synergistic effect leading to increased affinity with hydrogen in the absence of deformation. When deformed, its sensitivity to hydrogen incorporation weakens, approaching the average value between nickel and aluminum. The results are consistent with the laws of thermodynamics and the theory of elasticity, and explain the mechanism of hydrogen embrittlement caused by local lattice distortions and changes in electron density. The results obtained are important for predicting the durability and reliability of materials in conditions of hydrogen-containing media and mechanical loads.

Keywords: nickel, aluminum, intermetallic, crystal lattice, potential energy, hydrogen embrittlement, elastic deformation, molecular dynamics

For citation: Ziuzin D.I., Markidonov A.V. Effect of impurity of hydrogen atoms on the energy characteristics of Ni, Al, and Ni_3al crystal lattices under elastic deformation. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):9–16. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-9-16*

Введение

Высокая прочность, коррозионная стойкость и термическая устойчивость делают никель, алюминий и интерметаллид Ni_3Al востребованными в высокотехнологичных отраслях. При этом примесные атомы водорода способны значительно ухудшать их эксплуатационные характеристики [1 – 6]. Целью настоящей работы является установление количественных зависимостей потенциальной энергии ГЦК решеток никеля, алюминия и интерметаллида Ni_3Al от упругой деформации (1 – 5 %), ее направления вдоль одной, двух, трех осей, типа междоузлия, занимаемого атомом водорода (тетраэдрическое или октаэдрическое), и концентрации примесных атомов водорода (1 – 50 атомов). Для этого методом молекулярной динамики при температуре 0 К рассмотрели влияние указанных факторов на энергетическое состояние систем. Это позволит количественно оценить вклад каждого фактора и их взаимодействия в изменение энергии, непосредственно сравнив влияние разного количества атомов водорода в тетраэдрических и октаэдрических порах при различных деформациях.

Методы и принципы исследования

Исследования были проведены с помощью метода молекулярной динамики [7], используя модифицированный потенциал EAM [8 – 11]. Размер моделируемой решетки составляет 10 × 10 × 10 элементарных ячеек, граничные условия приняли периодические.

Рассмотрели внедрение атомов водорода в решетку в тетраэдрическую и октаэдрическую поры, а также виды и размеры упругой деформации (сжатие и растяжение) от 1 до 5 % вдоль одной, двух, трех осей и их влияние. При проведе-

нии исследований влияние изменения температуры на потенциальную энергию исключено. Упругая деформация до 5 % рассматривается в рамках идеализированных условий молекулярно-динамического моделирования. Однако для реальных материалов (Ni, Al, Ni_3Al) деформация 5 % физически не может сохраняться как упругая.

Первостепенно было проведено моделирование ГЦК решеток Ni, Al, Ni_3Al без добавления примесных атомов водорода и без влияния упругой деформации и температуры. После чего были получены следующие значения:

Материал	Энергия, эВ/атом
Ni	−4,435/−4,450
Al	−3,340/−3,360
Ni_3Al	−4,5900/−4,5983

Примечание: в числителе и знаменателе указаны справочные и экспериментальные значения.

Расхождение для никеля составляет 0,34 %, для алюминия 0,6 % и для интерметаллида 0,18 %.

Установленные расхождения между смоделированными значениями потенциальной энергии и справочными данными находятся в пределах характерной погрешности метода молекулярной динамики с EAM-потенциалами [5; 12]. Это свидетельствует о корректном описании термодинамического состояния идеальных ГЦК решеток в рамках принятой модели. Следовательно, полученные на ее основе результаты, касающиеся влияния деформации и внедрения водорода, являются научно обоснованными и достоверными.

Эксперименты, проведенные в настоящей работе, состояли в следующем:

1. Расчетная модель состояла из атомов никеля, алюминия, интерметаллида Ni_3Al.

2. В поры (тетраэдрические или откаэдрические) помещали примесный атом водорода (1, 10, 20, 30, 40, 50).

3. Кристаллические решетки подвергали упругой деформации (сжатие от 0 до –5 и растяжение от 0 до +5 % с шагом 1 %) вдоль определенной оси (*X*, *Y*, *Z*).

4. Температура системы была установлена на уровне 0 К.

Полученные зависимости представлены в табл. 1 и 2.

Обсуждение полученных результатов

Увеличение упругой деформации (сжатие от –5 до 0 %, растяжение от 0 до +5 %) приводит к росту внутренней энергии (уменьшению ее отрицательного значения). Это наблюдается для всех трех исследуемых материалов (никеля, алюминия и интерметаллида Ni_3Al).

Это объясняется законом Гука, где при упругой деформации приложенное для нее напряжение требует совершения работы над кристаллом. Растяжение ослабляет связи (увеличивает энергию), сжатие усиливает отталкивание на малых расстояниях (также увеличивает энергию). Изменение энергии при деформации можно описать с точки зрения термодинамики дефектов, так как при любой деформации искажается кристаллическая решетка [8; 9], что приводит к изменению межатомных расстояний и углов, а вместе с тем это влияет на энергию межатомных связей [8; 12].

Расчеты показывают, что энергия связи Ni – H более отрицательна (то есть связь прочнее), чем Al – H. Это обусловлено электронной структурой никеля, который как переходный металл обладает частично заполненной *d*-электронной оболочкой [13 – 15]. Электроны водорода эффективно взаимодействуют с *d*-электронами, образуя более прочную химическую связь. Эта особенность согласуется со склонностью переходных металлов (Ni, Pd) к образованию гидридных фаз и водородному охрупчиванию под нагрузкой [2; 3; 16]. В отличие от никеля, алюминий является непереходным металлом, его электронная структура обеспечивает более слабое взаимодействие с электронами водорода. Как следствие, никель проявляет большую способность удерживать водород в своей кристаллической решетке по сравнению с алюминием.

Интерметаллическое соединение Ni_3Al демонстрирует уникальное сочетание свойств. При отсутствии деформации энергия связи водорода в соединении Ni_3Al оказывается еще более отрицательной (то есть связь еще прочнее), чем в чистом никеле. Это указывает на синергетический эффект, усиливающий взаимодействие водорода с решеткой интерметаллида. При упругой деформации относительное изменение энергии связи в соединении Ni_3Al оказывается близким к алюминию и меньшим, чем в чистом никеле. Несмотря на изначально более прочную связь, энергетическое состояние системы Ni_3Al с водородом менее чувствительно к упругим искажениям решетки, чем состояние системы Ni – H, но более чувствительно чем Al – H.

Происходит рост энергии при внедрении атомов водорода. Это наблюдается для всех трех исследуемых материалов (никеля, алюминия и интерметаллида Ni_3Al). Водород, располагаясь в кристаллической решетке, снижает энергию связи между атомами металла, что приводит к зарождению и распространению трещин, особенно под влиянием деформации [4; 16; 17]. Атомы водорода в междоуз-

Таблица 1

Изменение потенциальной энергии в зависимости от количества примесных атомов водорода и упругой деформации (расположение атомов водорода в тетраэдрической поре)

Table 1. **Change in potential energy depending on the number of impurity hydrogen atoms and elastic deformation (arrangement of hydrogen atoms in a tetrahedral pore)**

Направление упругой деформации	Упругая деформация, %	Значение потенциальной энергии, эВ, при количестве примесных атомов водорода				
		0	5	10	15	20
Ось *Y*	1	–4,596928	–4,594071	–4,591216	–4,588365	–4,585523
	2	–4,593894	–4,591070	–4,588249	–4,585433	–4,582625
	3	–4,589264	–4,586471	–4,583683	–4,580899	–4,578122
	4	–4,583152	–4,580388	–4,577629	–4,574876	–4,572129
	5	–4,575679	–4,572942	–4,570210	–4,567484	–4,564764
	–1	–4,597802	–4,594874	–4,591946	–4,589020	–4,586105
	–2	–4,595462	–4,592495	–4,589528	–4,586562	–4,583608
	–3	–4,591055	–4,588048	–4,585040	–4,582032	–4,579038
	–4	–4,584371	–4,581323	–4,578272	–4,575222	–4,572185
	–5	–4,575791	–4,572700	–4,569605	–4,566509	–4,563429
Ось *YZ*	1	–4,594681	–4,591857	–4,589038	–4,586221	–4,583413
	2	–4,586031	–4,583268	–4,580512	–4,577757	–4,575011
	3	–4,572732	–4,570020	–4,567316	–4,564613	–4,561919
	4	–4,555196	–4,552522	–4,549857	–4,547192	–4,544536
	5	–4,533825	–4,531171	–4,528528	–4,525884	–4,523249
	–1	–4,596352	–4,593383	–4,590417	–4,587453	–4,584499
	–2	–4,588476	–4,585426	–4,582376	–4,579330	–4,576294
	–3	–4,573914	–4,570777	–4,567640	–4,564506	–4,561383
	–4	–4,551823	–4,548596	–4,545365	–4,542139	–4,538924
	–5	–4,522494	–4,519171	–4,515841	–4,512517	–4,509205
Ось *XYZ*	1	–4,591493	–4,588701	–4,585914	–4,583130	–4,580354
	2	–4,574426	–4,571714	–4,569010	–4,566308	–4,563613
	3	–4,547749	–4,545085	–4,542430	–4,539778	–4,537132
	4	–4,512021	–4,509355	–4,506700	–4,504047	–4,501401
	5	–4,467681	–4,465011	–4,462351	–4,459692	–4,457041
	–1	–4,593922	–4,590913	–4,587907	–4,584902	–4,581908
	–2	–4,577488	–4,574352	–4,571216	–4,568081	–4,564958
	–3	–4,546926	–4,543651	–4,540375	–4,537099	–4,533838
	–4	–4,499321	–4,495901	–4,492476	–4,489049	–4,485639
	–5	–4,435131	–4,431553	–4,427967	–4,424376	–4,420805

лиях создают локальные напряжения из-за несоответствия размеров.

Выявленный рост энергии при комбинации сжатия и внедрения водорода в поры указывает на склонность материалов к охрупчиванию водородом. Полученные данные согласуются с известной на практике высокой чувствительностью интерметаллидов на основе никеля к водородному охрупчиванию [6; 18 – 20]. Наблюдаемое увеличение внутренней энергии системы по мере роста концентрации водорода указывает на суммарный эффект от внедрения каждого дополнительного атома H. Особенно при высоких концентрациях рост энергии становится нелинейным, что объясняется наложением локальных полей упругих напряжений, создаваемых соседними атомами водорода и усиливающимся взаимодействием между ними [5; 19].

Выводы

Стабильность системы Ni – Al определяется балансом между упругими напряжениями, геометрией внедрения водорода и электронными взаимодействиями.

Упругая деформация (сжатие/растяжение) и внедрение атомов водорода увеличивают внутреннюю энергию системы за счет локальных искажений кристаллической решетки.

Таблица 2

Изменение потенциальной энергии в зависимости от количества примесных атомов водорода и упругой деформации (расположение атомов водорода в тетраэдрической поре)

Table 2. **Change in potential energy depending on the number of impurity hydrogen atoms and elastic deformation (arrangement of hydrogen atoms in an octahedral pore)**

Направление упругой деформации	Упругая деформация, %	Значение потенциальной энергии, эВ, при количестве примесных атомов водорода				
		0	5	10	15	20
Ось *Y*	1	–4,596928	–4,594070	–4,591217	–4,588368	–4,585532
	2	–4,593894	–4,591069	–4,588251	–4,585435	–4,582632
	3	–4,589264	–4,586472	–4,583685	–4,580901	–4,578129
	4	–4,583152	–4,580389	–4,577632	–4,574878	–4,572135
	5	–4,575679	–4,572943	–4,570214	–4,567486	–4,564769
	–1	–4,597802	–4,594872	–4,591945	–4,589023	–4,586116
	–2	–4,595462	–4,592493	–4,589525	–4,586565	–4,583620
	–3	–4,591055	–4,588045	–4,585037	–4,582036	–4,579052
	–4	–4,584371	–4,581319	–4,578268	–4,575225	–4,572201
	–5	–4,575791	–4,572696	–4,569599	–4,566514	–4,563447
Ось *YZ*	1	–4,594681	–4,591857	–4,589038	–4,586223	–4,583421
	2	–4,586031	–4,583268	–4,580512	–4,577759	–4,575017
	3	–4,572732	–4,570020	–4,567316	–4,564615	–4,561923
	4	–4,555196	–4,552522	–4,549857	–4,547194	–4,544538
	5	–4,533825	–4,531171	–4,528528	–4,525885	–4,523249
	–1	–4,596352	–4,593383	–4,590417	–4,587456	–4,584511
	–2	–4,588476	–4,585426	–4,582376	–4,579333	–4,576308
	–3	–4,573914	–4,570777	–4,567640	–4,564509	–4,561399
	–4	–4,551823	–4,548596	–4,545365	–4,542143	–4,538943
	–5	–4,522494	–4,519171	–4,515841	–4,512522	–4,509227
Ось *XYZ*	1	–4,591493	–4,588701	–4,585914	–4,583132	–4,580361
	2	–4,574426	–4,571714	–4,569010	–4,566310	–4,563618
	3	–4,547749	–4,545085	–4,542430	–4,539779	–4,537132
	4	–4,512021	–4,509355	–4,506700	–4,504047	–4,501396
	5	–4,467681	–4,465011	–4,462351	–4,459693	–4,457040
	–1	–4,593922	–4,590913	–4,587907	–4,584905	–4,581921
	–2	–4,577488	–4,574352	–4,571216	–4,568084	–4,564975
	–3	–4,546926	–4,543651	–4,540375	–4,537104	–4,533859
	–4	–4,499321	–4,495901	–4,492476	–4,489055	–4,485666
	–5	–4,435131	–4,431553	–4,427967	–4,424384	–4,420840

Водород изменяет распределение электронной плотности, создавая дополнительные напряжения в решетке. Наибольший эффект наблюдается в тетраэдрических порах из-за их меньшего объема и более сильного искажения межатомных связей.

Тетраэдрические поры проявляют высокую чувствительность к внедрению водорода, тогда как октаэдрические поры обеспечивают меньший рост энергии. Наибольшее увеличение энергии зафиксировано для интерметаллида Ni_3Al, что связано с его упорядоченной структурой. Система демонстрирует иерархию чувствительности: $Ni_3Al > Ni > Al$.

Упругая деформация и внедрение водорода повышают внутреннюю энергию никеля, алюминия и соединения Ni_3Al, что свидетельствует о снижении термодинамической устойчивости материалов. Максимальный эффект достигается при комбинации сжатия (–5 %) и внедрения водорода в тетраэдрические поры. Результаты согласуются с законами термодинамики и теорией упругости, подтверждая роль водорода как дестабилизирующего фактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Влияние водородосодержащей среды при высоких

температурах и давлениях на поведение металлов и конструкций из них. *Интернет-журнал Науковедение*. 2012;4(13):95. *EDN: PVXFRN.*

2. Fukai Y. *The Metal-Hydrogen System*. Berlin: Springer, 2005;450.
3. Zhao J., Zhang X., Li Y. Hydrogen embrittlement mechanisms in high-strength steels. *Acta Materialia*. 2020;183:10–18.
4. Зюзин Д.И., Маркидонов А.В. Водородное охрупчивание и влияние водорода на свойства металлов и сплавов. *Механики XXI веку*. 2024;23:389–395. *EDN: DDSXFP*.
5. Kirchheim R. Reducing grain boundary, dislocation line and vacancy formation energies by solute segregation: I. Theoretical background. *Acta Materialia*. 2007;55(15):5129–5138.
6. Robertson Ia.M., Sofronis P., Nagao A. et al. Hydrogen Embrittlement Understood. In: Metallurgical and Materials Transactions B: Process *Metallurgy and Materials Processing Science*. 2015;46(3):1085–1103. *https://doi.org/10.1007/s11663-015-0325-y. EDN: DOMXPA*.
7. Зоря И.В., Полетаев Г.М. Влияние упругой деформации кристаллической решетки ГЦК металлов на энергию связи и миграции примесных атомов легких элементов. *Химическая физика и мезоскопия*. 2019;21:135–139.
8. Нагорных И.Л., Бурнышев И.Н. Численное моделирование влияния водорода на поведение кристаллов Al, Fe, Ni и Pd при растяжении. *Химическая физика и мезоскопия*. 2012;14(4):604–608. *EDN: PVHTCZ*.
9. Бурнышев И.Н., Нагорных И.Л. О механизмах водородного охрупчивания и некоторых результатах молекулярно-динамического моделирования систем металл-водород. В кн.: *Труды Института механики УрО РАН "Проблемы механики и материаловедения"*. Ижевск: изд. Института механики Уральского отделения РАН, 2015:20–30. *EDN: TPGOXR*.
10. Poletaev G.M., Novoselova D.V., Starostenkov M.D., Zorya I.V. Molecular dynamics simulation of hydrogen atom diffusion in crystal lattice of fcc metals. *International Journal of Materials Research*. 2017;108(10):785–790. *https://doi.org/10.3139/146.111556. EDN: XOKKQY*.
11. Нагорных И.Л., Бурнышев И.Н. Молекулярно-динамическое исследование механизмов водородной хрупкости металлов. В кн.: *Механика и физико-химия гетерогенных сред, наносистем и новых материалов: Материалы научных исследований*. Ижевск: Институт механики Уральского отделения РАН, 2015:199–211. *EDN: ULMEXT*.
12. Шалаев А.А. *Основы физического материаловедения. Методы экспериментальной физики конденсированного состояния. Ч. 1*. Иркутск: изд. Иркутского государственного университета, 2013;159. *EDN: TKRZUX*.
13. Callister W. D., Rethwisch D. G. *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013.
14. Fukai Y. The Metal-Hydrogen System Basic Bulk Properties. *Springer Series in Materials Science*. 2005;21:1–28. *https://doi.org/10.1007/978-3-662-02801-8_1. EDN: KMHOFO*.
15. Смирнов Ю.М. Возбуждение 3F-уровней атома никеля соударениями с медленными электронами. *Журнал прикладной спектроскопии*. 2009;76(5):645–651. *EDN: KUISAN*.
16. Robertson Ia.M., Sofronis P., Nagao A. et al. Hydrogen Embrittlement Understood. In: *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2015;46(3):1085–1103. *https://doi.org/10.1007/s11663-015-0325-y. EDN: DOMXPA*.
17. Nagumo M. Hydrogen related failure of steels – a new aspect. *Materials Science and Technology*. 2004;20(8):940–950. *https://doi.org/10.1179/026708304225019687*
18. Агеева Е.В., Горохов А.А. *Конструкционные материалы, используемые в машиностроении*. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2014:130. *EDN: SHGOUT*.
19. Zorya I. V., Poletaev G. M. Influence of elastic deformation of the crystal lattice of FCC metals on the binding energy and migration of impurity atoms of light elements. *Chemical Physics and mesoscopy*. 2019;21(4):135.
20. Зоря И.В. *Взаимодействие атомов C, N, O, H с дефектами кристаллический решетки в ГЦК металлах на примере Ni, Ag, Al*: автореф. дис. докт. наук, 2022:31. *EDN: CBFCLP*.

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. Influence of a hydrogen-containing medium at high temperatures and pressures on the behavior of metals and structures made of them. *Internet-zhurnal Naukovedenie*. 2012;4(13):95. (In Russ.). *EDN: PVXFRN.*
2. Fukai Y. *The Metal-Hydrogen System*. Berlin: Springer, 2005;450.
3. Zhao J., Zhang X., Li Y. Hydrogen embrittlement mechanisms in high-strength steels. *Acta Materialia*. 2020;183:10–18.

4. Zyuzin D.I., Markidonov A.V. Hydrogen embrittlement and the effect of hydrogen on the properties of metals and alloys. *Mekhaniki XXI veku*. 2024;23:389–395. (In Russ.). *EDN: DDSXFP*.
5. Kirchheim R. Reducing grain boundary, dislocation line and vacancy formation energies by solute segregation: I. Theoretical background. *Acta Materialia*. 2007;55(15):5129–5138.
6. Robertson Ia.M., Sofronis P., Nagao A. et al. Hydrogen Embrittlement Understood. In: Metallurgical and Materials Transactions B: Process *Metallurgy and Materials Processing Science*. 2015;46(3):1085–1103. *https://doi.org/10.1007/s11663-015-0325-y*. *EDN: DOMXPA*.
7. Zorya I.V., Poletaev G.M. The effect of elastic deformation of the crystalline lattice of FCC metals on the binding energy and migration of impurity atoms of light elements. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya*. 2019;21:135–139. (In Russ.).
8. Nagornykh I.L., Burnyshev I.N. Numerical modeling of the influence of hydrogen on the behavior of crystals of Al, Fe, Ni and Pd under tension. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya.* 2012;14(4):604–608. (In Russ.). *EDN: PVHTCZ*.
9. Burnyshev I.N., Nagornykh I.L. On the mechanisms of hydrogen embrittlement and some results of molecular dynamic modeling of metal-hydrogen systems. In: *Proceedings of the Institute of Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences "Problems of Mechanics and Materials Science"*. Izhevsk: izd. Instituta me-khaniki Ural'skogo otdeleniya RAN, 2015:20–30. (In Russ.). *EDN: TPGOXR*.
10. Poletaev G.M., Novoselova D.V., Starostenkov M.D., Zorya I.V. Molecular dynamics simulation of hydrogen atom diffusion in crystal lattice of fcc metals. *International Journal of Materials Research*. 2017;108(10):785–790. *https://doi.org/10.3139/146.111556*. *EDN: XOKKQY*.
11. Nagornykh I.L., Burnyshev I.N. Molecular dynamic investigation of mechanisms of hydrogen brittleness of metals. In: *Mechanics and physico-chemistry of heterogeneous media, nanosystems and new Materials: Materials of scientific research*. Izhevsk: Institut mekhaniki Ural'skogo otdeleniya RAN, 2015:199–211. (In Russ.). *EDN: ULMEXT*.
12. Shalaev A.A. *Fundamentals of physical materials science. Methods of experimental condensed matter physics. Part 1*. Irkutsk: izd. Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta, 2013;159. (In Russ.). *EDN TKRZUX*.
13. Callister W. D., Rethwisch D. G. *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach*. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013.
14. Fukai Y. The Metal-Hydrogen System Basic Bulk Properties. *Springer Series in Materials Science*. 2005;21:1–28. *https://doi.org/10.1007/978-3-662-02801-8_1*. *EDN: KMHOFO*.
15. Smirnov Yu.M. Excitation of 3F levels of a nickel atom by collisions with slow electrons. *Zhurnal prikladnoi spektroskopii*. 2009;76(5):645–651. (In Russ.). *EDN: KUISAN*.
16. Robertson Ia.M., Sofronis P., Nagao A. et al. Hydrogen Embrittlement Understood. In: *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2015;46(3):1085–1103. *https://doi.org/10.1007/s11663-015-0325-y*. *EDN: DOMXPA*.
17. Nagumo M. Hydrogen related failure of steels – a new aspect. *Materials Science and Technology*. 2004;20(8):940–950. *https://doi.org/10.1179/026708304225019687*
18. Ageeva E.V., Gorokhov A.A. *Structural materials used in mechanical engineering*. Kursk: ZAO «Universitetskaya kniga», 2014:130. (In Russ.). *EDN SHGOUT*.
19. Zorya I.V., Poletaev G.M. Influence of elastic deformation of the crystal lattice of FCC metals on the binding energy and migration of impurity atoms of light elements. *Chemical Physics and mesoscopy*. 2019;21(4):135.
20. Zorya I.V. *Interaction of C, N, O, H atoms with crystalline lattice defects in FCC metals on the example of Ni, Ag, Al:* avtoref. dis. dokt. nauk, 2022:31. (In Russ.). *EDN: CBFCLP*.

Сведения об авторах:

***Денис Игоревич Зюзин**, аспирант 3 курса «Физика конденсированного состояния»*, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
***E-mail**:* denis.physic96@mail.ru
***ORCID**:* 0009-0008-6602-6058
***SPIN-код**:* 4479-0654

***Артем Владимирович Маркидонов**, д.ф.-м.н., доцент кафедры информатики и вычислительной техники им. Буторина В.К.*, Кузбасский гуманитарно-педагогический институт Кемеровского государственного университета
***E-mail**:* markidonov_artem@mail.ru
***ORCID**:* 0000-0002-4566-528X
***SPIN-код**:* 3939-7328

Information about the author:
***Denis I. Zyuzin**, 3rd year postgraduate student "Condensed Matter Physics",* Altai State Technical University named after I.I. Polzunov
***E-mail**:* denis.physic96@mail.ru
***ORCID**:* 0009-0008-6602-6058
***SPIN-код**:* 4479-0654

***Artem V. Markidonov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Computer Science and Computer Engineering. Butorina V.K., Kuzbass Humanitarian Pedagogical Institute of KemSU, Novokuznetsk, Russia.*
***E-mail**: markidonov_artem@mail.ru*
***ORCID**: 0000-0002-4566-528X*

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

Поступила в редакцию 12.01.2026
После доработки 06.02.2026
Принята к публикации 20.02.2026

Received 12.01.2026
Revised 06.02.2026
Accepted 20.02.2026

Оригинальная статья

УДК 538.915

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-17-26

МОДИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ ГРАФЕНА, ДОПИРОВАННОГО АТОМАМИ АЗОТА

© 2026 г. Д. Камара[1], М. Диавара[2, 3], М. Сейду[2, 4], А.В. Маркидонов[1, 5], В.Е. Громов[1]

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

[2]**Университет наук, техники и технологий Бамако** (Мали, B.P.E423, провинция Столичный округ Бамако, Бамако, ул. 405, 359)

[3]**Парижский исследовательский институт химии** (Франция, 75231, регион Иль-де-Франс, Париж, ул. Пьера и Марии Кюри, 11)

[4]**Парижский городской университет** (Франция, 75205, регион Иль-де-Франс, Париж, ул. Ж.-А. де Баиф, 15)

[5]**Кузбасский гуманитарно-педагогический институт Кемеровского государственного университета** (Россия, 654041, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Циолковского, 23)

Аннотация. Уникальные физические свойства графена (высокая подвижность электронов, прочность, эластичность и теплопроводность) делают его идеальным объектом для изучения новых физических явлений. Графен рассматривается как перспективный материал, который может быть положен в основу наноэлектроники. Но при этом есть существенное ограничение его широкого использования – он обладает нулевой шириной запрещенной зоны. Исследование способов модификации его электронных свойств, в том числе с применением моделирования, является актуальным, так как это может позволить расширить сферу применения графена в электронике, сенсорике, энергетике и других областях, позволяя создавать более эффективные, быстрые и энергоэффективные устройства. Представлены результаты исследования электронных свойств графена, допированного атомами азота, с использованием метода компьютерного моделирования. Методология исследования базируется на первопринципных вычислениях в рамках метода функционала плотности (DFT) с применением программного пакета VASP. Моделирование проводили для гексагональной суперячейки 4 × 4 с варьируемой концентрацией атомов азота от 3,125 до 18,750 %. Установлено, что допирование графена атомами азота приводит к существенным изменениям его электронных свойств. Показано формирование запрещенной зоны и смещение уровня Ферми выше точки Дирака, что трансформирует графен в полупроводник *n*-типа. Выявлена немонотонная зависимость ширины запрещенной зоны от концентрации и расположения атомов азота в решетке. Полученные результаты демонстрируют возможность целенаправленной модификации электронных свойств графена путем контролируемого допирования азотом, что открывает новые перспективы для его практического применения в наноэлектронике.

Ключевые слова: графен, допант, азот, модель, ab-initio, DFT, PDOS, запрещенная зона

Для цитирования: Камара Д., Диавара М., Сейду М., Маркидонов А.В., Громов В.Е. Модификация электронных свойств графена, допированного атомами азота. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):17–26. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-17-26*

Original article

MODIFICATION OF THE ELECTRONIC PROPERTIES OF GRAPHENE DOPED WITH NITROGEN ATOMS

© 2026 D. Camar[1], M. Diawara[2, 3], M. Seydou[2, 4], A.V. Markidonov[1, 5], V.E. Gromov[1]

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

[2]**University of Science and Technology of Bamako** (359 405 Str., Bamako, Bamako Metropolitan District, B.P.E423, Mali)

[3]**Chemistry Research Institute of Paris** (11 Pierre and Marie Curie Str., Paris, Ile-de-France region, 75231, France)

[4]**University Paris Cite** (15 J.-A. de Baif Str., Paris, Ile-de-France region, 75205, France)

[5]**Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of Kemerovo State University** (23 Tsiolkovsky Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654041, Russian Federation)

Abstract. The unique physical properties of graphene, such as high electron mobility, strength, elasticity, and thermal conductivity, make it an ideal object for studying new physical phenomena. Despite significant advances in the study of its properties, graphene's potential is still far from being exhausted, and studies of its possible practical application are continuing. In particular, graphene is considered as a promising material that can be used as the basis for nano-electronics. However, there is a significant limitation to its widespread use - it has a zero band gap. Therefore, the study of ways to modify its electronic properties, including using modeling, is relevant, as this may allow expanding the scope of graphene's applications in electronics, sensors, energy and other fields, allowing the creation of more efficient, fast and energy-efficient devices. The article presents the results of a study of the electronic properties of graphene doped with nitrogen atoms using the computer modeling method. The research methodology is based on first-principle calculations using the density functional (DFT) method using the VASP software package. The simulation was performed for a 4 × 4 hexagonal supercell with a variable concentration of nitrogen atoms from 3.125 to 18.750 %. In the course of the study, it was found that doping graphene with nitrogen atoms leads to significant changes in its electronic properties. The formation of a band gap and the displacement of the Fermi level above the Dirac point are shown, which transforms graphene into an n-type semiconductor. A nonmonotonic dependence of the band gap width on the concentration and arrangement of nitrogen atoms in the lattice is revealed. The results obtained during the study demonstrate the possibility of purposefully modifying the electronic properties of graphene by controlled nitrogen doping, which opens up new prospects for its practical application in nanoelectronics. The data obtained can be used to optimize the parameters of graphene structures in the development of new electronic devices.

Keywords: graphene, dopant, nitrogen, model, ab-initio, DFT, PDOS, gap

For citation: Camar D., Diawara M., Seydou M., Markidonov A.V., Gromov V.E. Modification of the electronic properties of graphene doped with nitrogen atoms. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):17–26. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-17-26*

Введение

Известно, что графен обладает уникальными физическими свойствами, часть из которых была изучена еще в середине прошлого века [1]. Подвижность носителей заряда в рассматриваемом наноматериале предположительно может достигать запредельно высоких значений (примерно $1{,}5 \cdot 10^6$ см^2/(В·с)) [2 – 5]. Модуль Юнга графена равен примерно 1 ТПа, что делает его наиболее прочным из известных материалов и, кроме того, он может без разрушения выдерживать механическую нагрузку с относительным удлинением 20 % [6; 7]. Графен обладает теплопроводностью примерно 5000 Вт/(м·К), что на сегодняшний день считается самым высоким значением [8; 9]. Несмотря на толщину в один атом, графен поглощает 2,3 % падающего света, что является следствием его особой электронной структуры [10].

Благодаря значительной подвижности электронов, а также высокими прочностью, эластичностью и теплопроводностью, к графену приковано пристальное внимание исследователей, он находит практическое применение в различных перспективных разработках. Благодаря уникальным электронным свойствам, графен рассматривается как альтернатива кремнию в наноэлектронике, но идеальный графен не представляет большого интереса в рассматриваемом случае, так как является

полупроводником, обладающим зонной структурой, при которой область проводимости и валентная зона перекрываются, но это пересечение очень мало, а для применения графена (например, в транзисторах) он должен обладать ненулевой шириной запрещенной зоны.

Чтобы создать в графене энергетическую щель прибегают к различным методам, в частности применяется *n*- или *p*-допирование путем замещения атомов углерода атомами примесей. Подобное гетероатомное замещение существенно модифицирует структуру на атомном уровне, а также электрофизические свойства. В частности, допирование азотом меняет электронную структуру графена из-за участия неопределенной электронной пары азота в формировании его π-сопряженной системы.

Несмотря на значительный научный интерес к графену и широкий спектр его возможного применения, существует ряд значительных препятствий, которые не позволяют осуществить его повсеместное внедрение в различные инновационные решения. Основные трудности обусловлены как технологическими сложностями получения высококачественного графена, так и проблемами управления этим уникальным наноматериалом.

В рассматриваемом случае компьютерное моделирование можно рассматривать как перспективный инструмент для преодоления этих сложностей. Оно позволяет детально исследовать структурные особенности графена, а также его термодинамические и электронные характеристики на атомном уровне, что открывает новые возможности для оптимизации свойств материала и разработки эффективных методов его практического применения.

Целью настоящей работы является исследование электронных свойств графена, допированного атомами азота методом компьютерного моделирования.

Методика исследования

При проведении исследования выполняли первопринципные вычисления в рамках метода функционала плотности (DFT), базирующегося на теореме Хохенберга-Кона, с использованием программного пакета VASP [11 – 14]. Электронионное взаимодействие описывали с помощью PAW-псевдопотенциалов [15; 16]. Обменно-корреляционные эффекты учитывали с помощью обобщенного градиентного приближения (GGA), параметризованного Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) [17]. Для визуализации результатов моделирования применяли пакет Modelview [18]. Расчеты проводили для модели, которая представляла собой гексагональную суперячейку 4 × 4, содержащую 32 атома.

На начальном этапе моделирования была выполнена проверка сходимости полной энергии в зависимости от размера базиса плоских волн (энергии обрезания E_{cut}), а также количества *k*-точек, определяющих разбиение обратного пространства (рис. 1). Изменения полной энергии практически отсутствуют при следующих параметрах моделирования: энергия обрезания E_{cut} = 500 эВ для базисного набора плоских волн; сетка из *k*-точек 3 × 3 × 3 в зонах Бриллюэна.

Допирование графена осуществляли заменой от одного до шести атомов углерода атомами азота, в результате чего достигалась концентрация примесей от 3,125 до 18,750 % (рис. 2).

Основные результаты

На начальном этапе был проведен расчет длин межуглеродных линейных C – C (*L*) и параллельных C – C (*P*) связей в идеальной конфигурации графена, а также длины связей C – N после процедуры допирования. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Длина межуглеродной связи в графене при отсутствии атомов примеси согласуются с известными (1,42 Å) данными [19].

У азота и углерода близкие значения атомного радиуса, поэтому при допировании кристаллическая решетка не претерпевает значительных изменений, за исключением сокращения расстояния между соседними атомами.

При изучении электронных свойств материала важной характеристикой является плотность состояний (*density of the states*, DOS), которая показывает количество доступных для электронов энергетических уровней на определенном интервале энергий. Разновидностью характеристики DOS является парциальная плотность состояний (*partial density of states*, PDOS), характеризующая вклад определенных атомных орбиталей в общую плотность состояний.

На рис. 3 приведены парциальные и полные плотности состояний, из которого можно сделать вывод о том, что энергетическая структура идеального графена определяется в первую очередь *p*-орбиталями атомов углерода, которые формируют π-связи.

На рис. 4 представлены аналогичные зависимости для допированного графена (концентрация атомов азота 6,25 %), согласно которому общая плотность состояний определяется по большей части *p*-орбиталями атомов углерода и азота. Кроме того, наблюдается сдвиг уровня Ферми

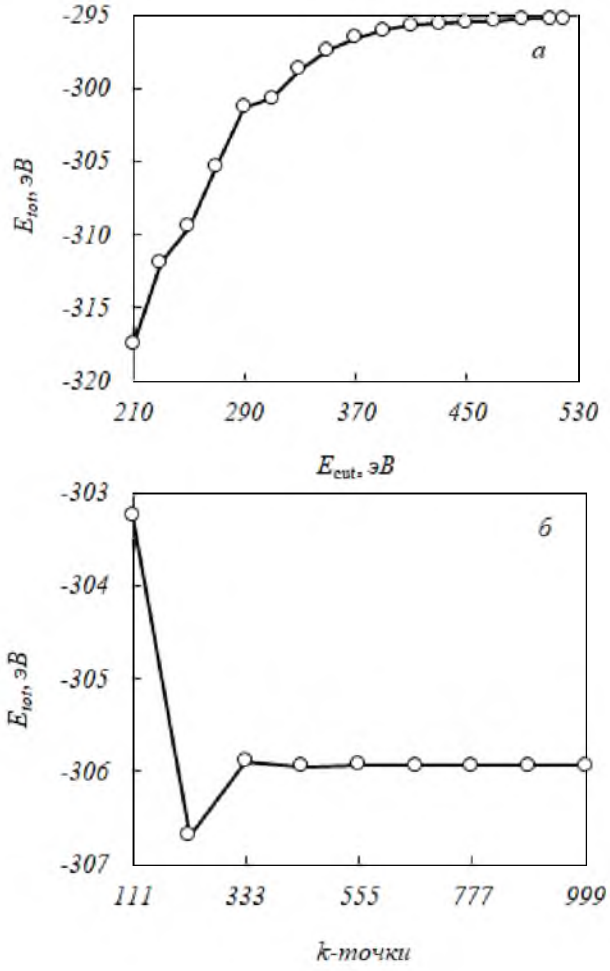


Рис. 1. Сходимость полной энергии E_{tot} в зависимости от энергии обрезания E_{cut} (*а*) и количества *k*-точек (*б*)
Fig. 1. Convergence of the total energy E_{tot} as a function of the cutoff energy E_{cut} (*а*) and the number of *k*-points (*б*)

выше точки Дирака, что свидетельствует об изменениях электронных свойств графена после допирования атомами азота.

Расчет запрещенных зон показал, что допирование приводит к их открытию, но при этом наблюдается немонотонная зависимость ширины энергетической щели от концентрации атомов азота (табл. 2), что может быть использовано для тонкой настройки запрещенной зоны в графене, который в рассматриваемом случае рассматривается как полупроводник *n*-типа.

Немонотонность зависимости в табл. 2 обусловлена особенностями расположением допантов в решетке графена, а именно их неуопрядочивание. К такому же выводу пришли авторы работы [20].

Выводы

Результаты компьютерного моделирования показали, что электронные свойства графена, допированного атомами азота, претерпевают значительные изменения. Графен становится полупроводником *n*-типа, энергетическая щель в зонной структуре которого может корректироваться путем изменения расположения и концентрации атомов примеси, что создает предпосылки для тонкой настройки электронных характеристик материала.

Выбранная методология исследования, основанная на моделировании с использованием метода функционала плотности (DFT), подтвердила свою эффективность и позволила детально изучить изменения в электронной структуре графена. При этом было установлено, что кристаллическая решетка сохраняет стабильность при внедрении азота, происходит лишь незначительное сокращение межатомных расстояний.

Таким образом, исследование демонстрирует значительный потенциал допированного азотом графена как материала для современной электроники и открывает новые направления для дальнейших исследований в этой области.

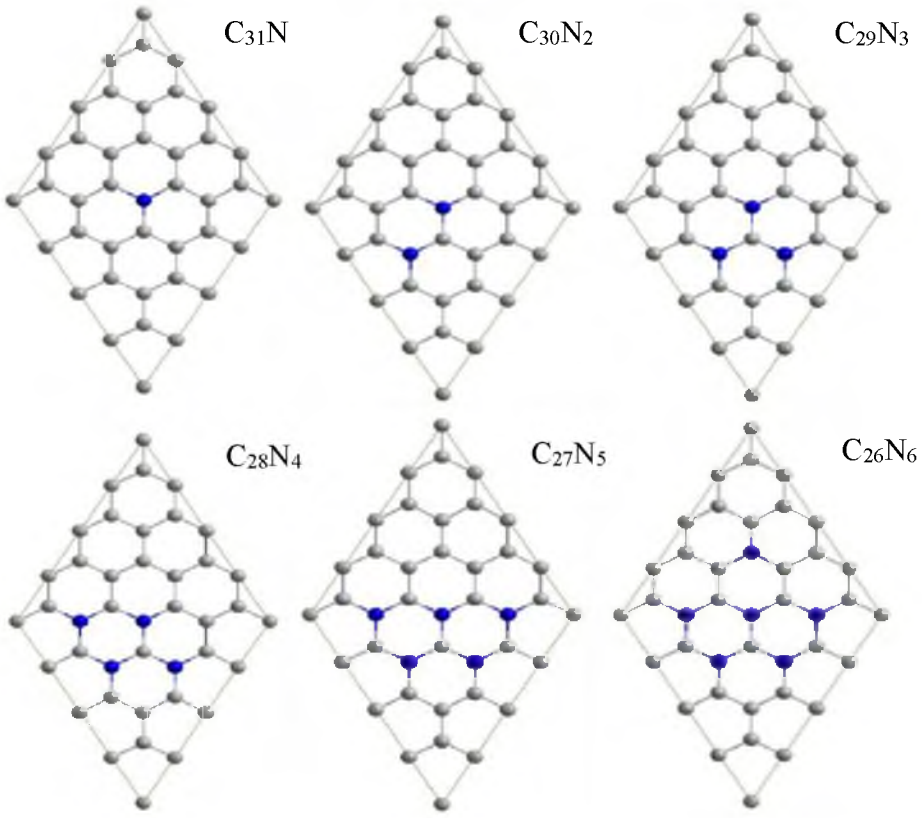


Рис. 2. Атомная структура суперячейки графена, допированного азотом
Fig. 2. Atomic structure of a supercell of graphene doped with nitrogen

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*. 2004;306(5696):666–669. *https://doi.org/10.1126/science.1102896*
2. Hwang E. H., Adam S., Sarma S.D. Carrier transport in 2D graphene layers. *Physical Review Letters*. 2007;98:186806. *https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.186806*
3. Chen B., Huang H., Ma X., Huang L., Zhang Z., Peng L.-M. How good can CVD-grown monolayer graphene be? *Nanoscale*. 2014;6:15255–15261. *https://doi.org/10.1039/C4NR05664G*
4. Chen J.-H., Jang C., Xiao S., Ishigami M., Fuhrer M.S. Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO_2. *Nature Nanotechnology*. 2008;3;206–209. *https://doi.org/10.1038/nnano.2008.58*
5. Bolotin K.I., Sikes K.J., Jiang Z., Klima M., Fudenberg G., Hone J., Kim P., Stormer H.L. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Communications*. 2008;146:351–355. *https://doi.org/10.1016/j.ssc.2008.02.024*
6. Lee C., Wei X., Kysar J.W., Hone J. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*. 2008;321:385–388. *https://doi.org/10.1126/science.1157996*

Таблица 1

Значения длин межатомных связей в графене при различной концентрации *n* атомов азота

Table 1. **The values of the lengths of interatomic bonds in graphene at different concentrations of *n* nitrogen atoms**

Связь	Значение длины межатомных связей, Å, при *n*, %						
	0	3,125	6,250	9,370	12,500	15,620	18,750
C – C (*L*)	1,424	1,421	1,422	1,420	1,425	1,417	1,418
C – C (*P*)	1,424	1,411	1,392	1,396	1,388	1,381	1,374
C – N	–	1,422	1,414	1,405	1,394	1,384	1,381

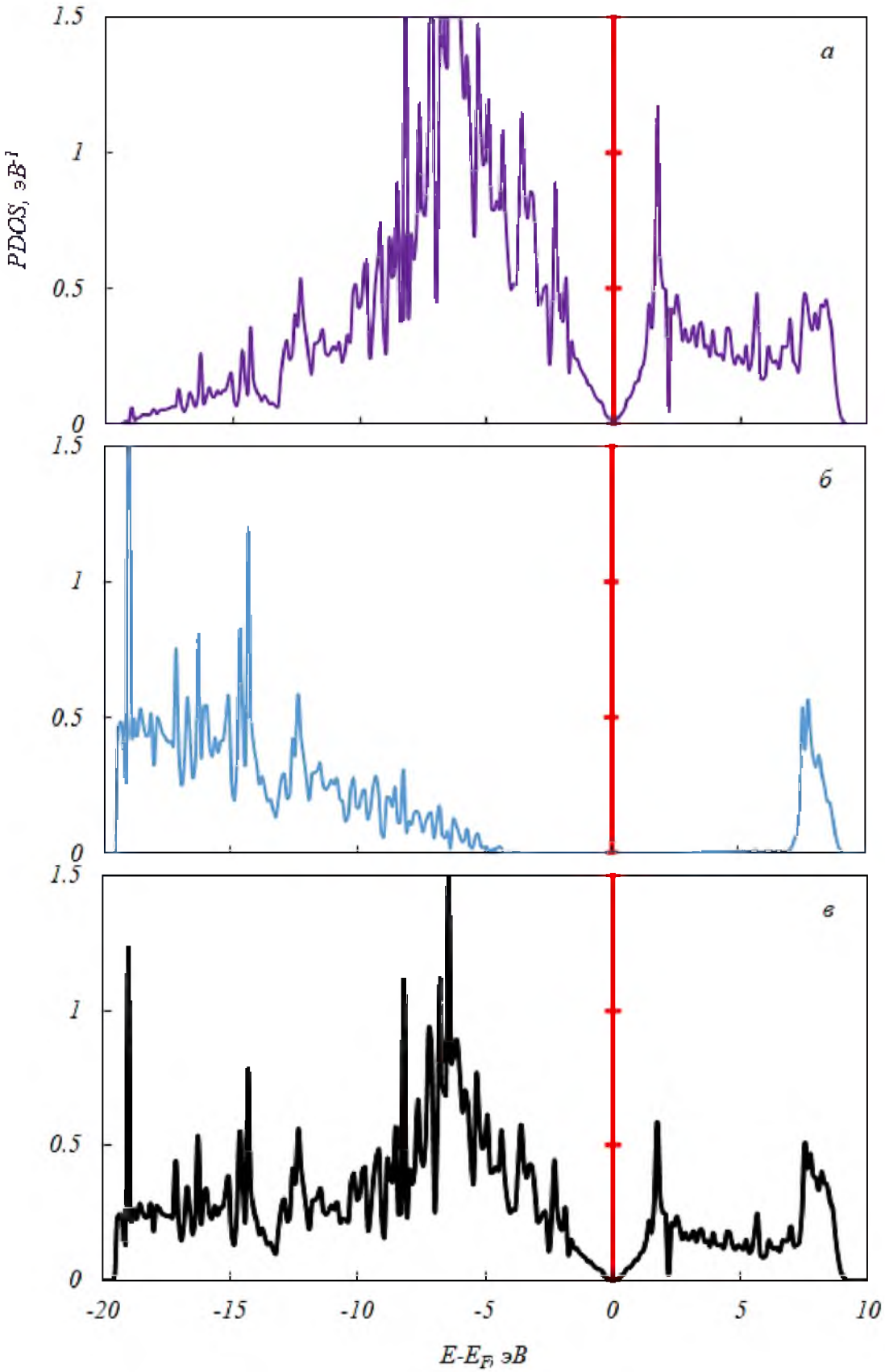


Рис. 3. PDOS для *p*-атомной орбитали (*а*), *s*-атомной орбитали (*б*) и полный PDOS (*в*) для идеального графена
Fig. 3. PDOS for *p*-atomic orbital (*а*), *s*-atomic orbital (*б*) and total PDOS (*в*) for ideal graphene

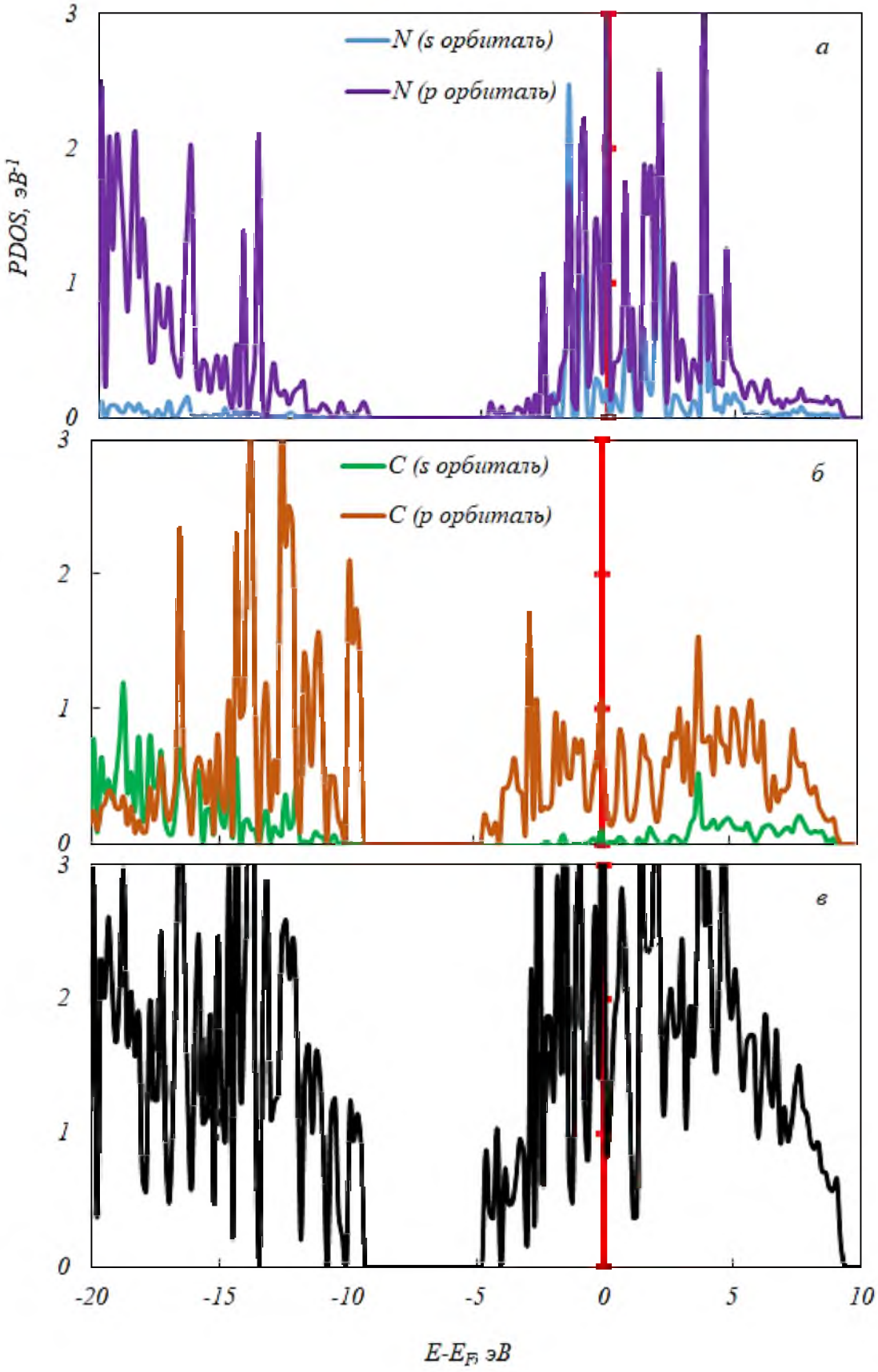


Рис. 4. PDOS для атомов азота (*а*), углерода (*б*) и полный PDOS (*в*) для графена, допированного азотом (концентрация 6,25 %)
Fig. 4. PDOS for nitrogen (*а*) and carbon (*б*) atoms and total PDOS (*в*) for graphene doped with nitrogen (concentration 6.25 %)

Таблица 2

Энергетическая щель E_g в зонной структуре допированного графена при различной концентрации атомов азота

Table 2. **Energy gap E_g in the band structure of doped graphene at different concentrations of nitrogen atoms**

Параметр	Значение параметра						
n, %	0	3,125	6,250	9,370	12,500	15,620	18,750
E_g, мэВ	0	200	250	150	0	250	100

7. Novoselov K.S., Falko V., Colombo L., Gellert P.R., Schwab M.G., Kim K.A. A roadmap for graphene. *Nature*. 2012;490:192–200. *https://doi.org/10.1038/nature11458*
8. Ghosh S., Calizo I., Teweldebrhan D., Pokatilov E.P., Nika D.L., Balandin A.A., Bao W., Miao F., Lau C.N. Extremely high thermal conductivity of graphene: prospects for thermal management applications in nanoelectronic circuits. *Applied Physics Letters*. 2008;92:151911. *https://doi.org/10.1063/1.2907977*
9. Balandin A.A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C.N. Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters*. 2008;8(3):902–907. *https://doi.org/10.1021/nl0731872*
10. Nair R.R., Blake P., Grigorenko A.N., Novoselov K.S., Booth T.J., Stauber T., Peres N.M.R., Geim A.K. Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*. 2008;320(5881):1308. *https://doi.org/10.1126/science.1156965*
11. Hafner J. Ab-initio simulations of materials using VASP: Density-functional theory and beyond. *Journal of Computational Chemistry*. 2008;29(13):2044–2078. *https://doi.org/10.1002/jcc.21057*
12. Hafner J. Materials simulations using VASP – a quantum perspective to materials science. *Computer Physics Communications*. 2007;177:6–13. *doi:10.1016/j.cpc.2007.02.045*
13. Sun G., Kurti J., Rajczy P., Kertesz M., Hafner J., Kresse G. Performance of the Vienna ab initio simulation package (VASP) in chemical applications. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*. 2003;624(1–3):37–45. *https://doi.org/10.1016/S0166-1280(02)00733-9*
14. Wang V., Xu N., Liu J.-C., Tang G., Geng W.-T. VASPKIT: A user-friendly interface facilitating high-throughput computing and analysis using VASP code. *Computer Physics Communications*. 2021;267:108033. *https://doi.org/10.1016/j.cpc.2021.108033*
15. Blochl P.E., Forst C.J., Schimpl J. Projector augmented wave method: ab-initio molecular dynamics with full wave functions. *Bulletin of Materials Science*. 2003;26:33–41. *https://doi.org/10.1007/BF02712785*
16. Jolleta F., Torrenta M., Holzwarth N. Generation of Projector Augmented-Wave atomic data: A 71 element validated table in the XML format. *Computer Physics Communications*. 2014;185:1246–1254. *http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2013.12.023*
17. Henderson T.M., Janesko B.G., Scuseria G.E. Generalized gradient approximation model exchange holes for range-separated hybrids. *The Journal of Chemical Physics*. 2008;128(19):194105. *http://dx.doi.org/10.1063/1.2921797*
18. MODELVIEW graphic software. – URL: http://www.modelview.fr/en.html (дата обращения: 23.09.2025)
19. Elias D.C., Nair R.R., Mohiuddin T.M.G., Morozov S.V., Blake P. Control of graphene's properties by reversible hydrogenation: evidence for graphane. *Science*. 2009;323:610–613. *http://dx.doi.org/10.1126/science.1167130*
20. Rani P., Jindal V.K. Designing band gap of graphene by B and N dopant atoms. *RSC Advances*. 2013;3:802–812. *http://dx.doi.org/10.1039/C2RA22664B*

REFERENCES

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*. 2004;306(5696):666–669 *https://doi.org/10.1126/science.1102896*
2. Hwang E.H., Adam S., Sarma S.D. Carrier transport in 2D graphene layers. *Physical Review Letters*. 2007;98:186806. *https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.186806*
3. Chen B., Huang H., Ma X., Huang L., Zhang Z., Peng L.-M. How good can CVD-grown monolayer graphene be? *Nanoscale*. 2014;6:15255–15261. *https://doi.org/10.1039/C4NR05664G*
4. Chen J.-H., Jang C., Xiao S., Ishigami M., Fuhrer M.S. Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO_2. *Nature Nanotechnology*. 2008;3:206–209. *https://doi.org/10.1038/nnano.2008.58*

5. Bolotin K.I., Sikes K.J., Jiang Z., Klima M., Fudenberg G., Hone J., Kim P., Stormer H.L. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene. *Solid State Communications*. 2008;146:351–355. *https://doi.org/10.1016/j.ssc.2008.02.024*
6. Lee C., Wei X., Kysar J.W., Hone J. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *Science*. 2008;321:385–388. *https://doi.org/10.1126/science.1157996*
7. Novoselov K.S., Falko V., Colombo L., Gellert P.R., Schwab M.G., Kim K.A. A roadmap for graphene. *Nature*. 2012;490:192–200. *https://doi.org/10.1038/nature11458*
8. Ghosh S., Calizo I., Teweldebrhan D., Pokatilov E.P., Nika D.L., Balandin A.A., Bao W., Miao F., Lau C.N. Extremely high thermal conductivity of graphene: prospects for thermal management applications in nanoelectronic circuits. *Applied Physics Letters*. 2008;92:151911. *https://doi.org/10.1063/1.2907977*
9. Balandin A.A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C.N. Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters*. 2008;8(3):902–907. *https://doi.org/10.1021/nl0731872*
10. Nair R.R., Blake P., Grigorenko A.N., Novoselov K.S., Booth T.J., Stauber T., Peres N.M.R., Geim A.K. Fine structure constant defines visual transparency of graphene. *Science*. 2008;320(5881):1308. *https://doi.org/10.1126/science.1156965*
11. Hafner J. Ab-initio simulations of materials using VASP: Density-functional theory and beyond. *Journal of Computational Chemistry*. 2008;29(13):2044–2078. *https://doi.org/10.1002/jcc.21057*
12. Hafner J. Materials simulations using VASP – a quantum perspective to materials science. *Computer Physics Communications*. 2007;177:6–13. *doi:10.1016/j.cpc.2007.02.045*
13. Sun G., Kurti J., Rajczy P., Kertesz M., Hafner J., Kresse G. Performance of the Vienna ab initio simulation package (VASP) in chemical applications. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*. 2003;624(1-3):37–45. *https://doi.org/10.1016/S0166-1280(02)00733-9*
14. Wang V., Xu N., Liu J.-C., Tang G., Geng W.-T. VASPKIT: A user-friendly interface facilitating high-throughput computing and analysis using VASP code. *Computer Physics Communications*. 2021;267:108033. *https://doi.org/10.1016/j.cpc.2021.108033*
15. Blochl P.E., Forst C.J., Schimpl J. Projector augmented wave method: ab-initio molecular dynamics with full wave functions. *Bulletin of Materials Science*. 2003;26:33–41. *https://doi.org/10.1007/BF02712785*
16. Jolleta F., Torrenta M., Holzwarth N. Generation of Projector Augmented-Wave atomic data: A 71 element validated table in the XML format. *Computer Physics Communications*. 2014;185:1246–1254. *http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2013.12.023*
17. Henderson T.M., Janesko B.G., Scuseria G.E. Generalized gradient approximation model exchange holes for range-separated hybrids. *The Journal of Chemical Physics*. 2008;128(19):194105. *http://dx.doi.org/10.1063/1.2921797*
18. MODELVIEW graphic software. – URL: http://www.modelview.fr/en.html (accessed: 23.09.2025)
19. Elias D.C., Nair R.R., Mohiuddin T.M.G., Morozov S.V., Blake P. Control of graphene's properties by reversible hydrogenation: evidence for graphane. *Science*. 2009;323:610–613. *https://doi.org/10.1126/science.1167130*
20. Rani P., Jindal V.K. Designing band gap of graphene by B and N dopant atoms. *RSC Advances*. 2013;3:802–812. *https://doi.org/10.1039/C2RA22664B*

Сведения об авторах

Джибрил Камара, *аспирант,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: cadj87269@gmail.com

Мусса Диавара, *преподаватель,* Университет наук, техники и технологий Бамако
E-mail: mdiawara86@yahoo.com
ORCID: 0009-0008-4099-785X

Махамаду Сейду, *адъюнкт-профессор,* Парижский городской университет
E-mail: mseydou.univ@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2261-8496

Артем 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

Виктор Евгеньевич Громов, *д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля*, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343
SPIN-код: 2834-4090

Information about the authors:
Djibril Camar, *graduate student,* Siberian State Industrial University
E-mail*:* cadj87269@gmail.com

Moussa Diawara, *lecturer,* University of Science and Technology of Bamako
E-mail*:* mdiawara86@yahoo.com
ORCID*:* 0009-0008-4099-785X

Mahamadou Seydou, *associate professor,* University Paris Cite
E-mail*:* mseydou.univ@gmail.com
ORCID*:* 0000-0003-2261-8496

Artem M. Markidonov, *Dr. Sci. (Phys. and Math.), Assist. Professor, Head of Department of Informatics and Computer Engineering named after V.K. Butorin*, Kuzbass Humanitarian and Pedagogical Institute of Kemerovo State University, *Professor of the Department of Applied Mathematics and Informatics*, Siberian State Industrial University
E-mail*:* markidonov_artem@mail.ru
ORCID*:* 0000-0002-4566-528X
SPIN-код*:* 3939-7328

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

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

Поступила в редакцию 20.10.2025
После доработки 26.01.2026
Принята к публикации 16.02.2026

Received 20.10.2025
Revised 26.01.2026
Accepted 16.02.2026

Оригинальная статья

УДК 536.2 (075)

DOI 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-27-36

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА ИЗ МЕТАНА

© 2026 г. В. А. Кудинов, С. В. Зайцев, Е. В. Керосиров, В. Д. Долгих

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

Аннотация. Разработана, изготовлена и исследована установка получения водорода из метана путем его пиролиза, включающая реактор и печь, предназначенную для его нагрева. Выполнен тепловой расчет установки с учетом теплоты, затрачиваемой на пиролиз, а также ее потерь через изоляцию и с уходящими газами при сжигании в печи метана, водорода, метано-водородной смеси, получаемой в процессе пиролиза. Выполнены расчеты по определению количества водорода, удельного расхода энергии на его получение, тепловой мощности и КПД установки при использовании в качестве топлива чистых метана и водорода, а также их смесей (70/30, 40/60). Натурные эксперименты на установке показали, что при сжигании смеси газов (60 % водорода и 40 % метана) при охлаждении уходящих газов (включающих углекислый газ и водяной пар) до температуры точки росы водяного пара получаем 0,55 кг дистиллированной воды на 1 м^3 сжигаемой смеси. Анализ полученного пиролизного углерода показал 27 %-ное содержание наноматериалов (нановолокон). Для снижения температуры уходящих газов использованы калориферы, охлаждающим агентом в которых является водопроводная вода. После нагрева в калориферах она может быть использована для отопления помещений. Применение катализаторов позволило снизить температуру пиролиза от 1000 до 750 °С при 60 %-ном выходе водорода, что приводит к уменьшению расхода сжигаемой метано-водородной смеси на 40 % по сравнению с пиролизом метана при температуре 1000 °С с таким же количеством получаемого водорода. Применение метано-водородной смеси в качестве топлива газовой печи позволяет уменьшить выбросы углекислого газа в окружающую среду по сравнению с другими методами получения водорода ввиду того, что при его сгорании уходящие газы содержат лишь водяные пары.

Ключевые слова: установка пиролиза метана, газовый нагрев, тепловой расчет, получение водорода, пиролизный углерод, дистиллированная вода, уменьшение выбросов углекислого газа

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2024-0014) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Для цитирования: Кудинов В.А., Зайцев С.В., Керосиров Е.В., Долгих В.Д. Расчет тепловых характеристик пиролитической установки производства водорода из метана. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):27–36. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-27-36*

Original article

CALCULATION OF THERMAL CHARACTERISTICS OF A PYROLYTIC PLANT FOR THE PRODUCTION OF HYDROGEN FROM METHANE

© 2026 V. A. Kudinov, S. V. Zaitsev, E. V. Kerosirov, V. D. Dolgikh

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

Abstract. A plant for producing hydrogen from methane by pyrolysis, including a reactor and a furnace designed to heat it, has been developed, manufactured and investigated. The thermal calculation of the installation has been performed taking into account the heat spent on pyrolysis, as well as its losses through insulation and with exhaust gases during combustion in the furnace of methane, hydrogen, and a methane-hydrogen mixture obtained during pyrolysis. Calculations have been performed to determine the amount of hydrogen, the specific energy consumption for its generation, the thermal power and efficiency of the installation when using pure methane and hydrogen, as well as their mixtures (70/30, 40/60), as a fuel. Field experiments at the plant have shown that when burning a mixture of gases (60 % hydrogen and 40 % methane) and cooling the exhaust gases (including carbon dioxide and water vapor) to the dew point temperature of water vapor, we obtain 0.55 kg of distilled water per 1 m^3 of the burned mixture. The analysis of the obtained pyrolysis carbon showed a 27 % content of nanomaterials (nanofibers). To cool the exhaust gases, air heaters were employed, with tap water serving as the cooling agent. After being heated in the air heaters, the water can be utilized for space heating. The use of catalysts made it possible to reduce the pyrolysis temperature from 1000 °C to 750 °C while maintaining a 60% hydrogen yield, which results in a 40% reduction in the consumption of the methane–hydrogen combustion mixture compared to methane pyrolysis at 1000 °C producing the same amount of hydrogen. The application of a methane–hydrogen mixture as a fuel for a gas furnace makes it possible to reduce carbon dioxide emissions into the environment compared to other hydrogen production methods, since the combustion of hydrogen produces exhaust gases containing only water vapor.

Keywords: methane pyrolysis plant, gas heating, thermal calculation, hydrogen production, pyrolysis carbon, distilled water, reduction of carbon dioxide emissions

Funding. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FSSE-2024-0014) within the framework of the state assignment of Samara State Technical University.

For citation: Kudinov V.A., Zaitsev S.V., Kerosirov E.V., Dolgikh V.D. Calculation of thermal characteristics of a pyrolytic plant for the production of hydrogen from methane. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):27–36. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-27-36*

Введение

Водород, являющийся ценным химическим сырьем, может быть использован как экологически чистое топливо. Для его промышленного получения применяются электролиз воды [1 – 3]; паровая конверсия метана [4 – 6]; газификация угля [7 – 9]. Однако использование перечисленных методов энергозатратно и приводит к выбросам углекислого газа в атмосферу. К числу менее энергозатратных и более экологичных относится способ получения водорода из метана посредством его пиролиза [10 – 14].

В работе [15] разработана модель морской ветряной электростанции, предназначенной для производства водорода. В работе [16] разработан реактор пиролиза, основанный на вихревом точечном разряде плазменного столба, энергия от которого используется для разложения метана. В работе [17] предложен жидкометаллический реактор, в основу которого положен барботаж газа через колонну с жидким металлом.

В настоящей работе нагрев метана до температуры пиролиза осуществляется в установке, использующей в качестве топлива различные газы (метан, водород, метано-водородную смесь в различных соотношениях концентраций компонентов). Использование метано-водородной смеси, полученной в процессе пиролиза метана, позволяет существенно снизить энергетические затраты на получение водорода, а также сократить выбросы углекислого газа в окружающую среду. На установку получен патент на полезную модель [18]. В настоящей работе представлена ее модернизированная версия, включающая оборудование для глубокого охлаждения уходящих газов.

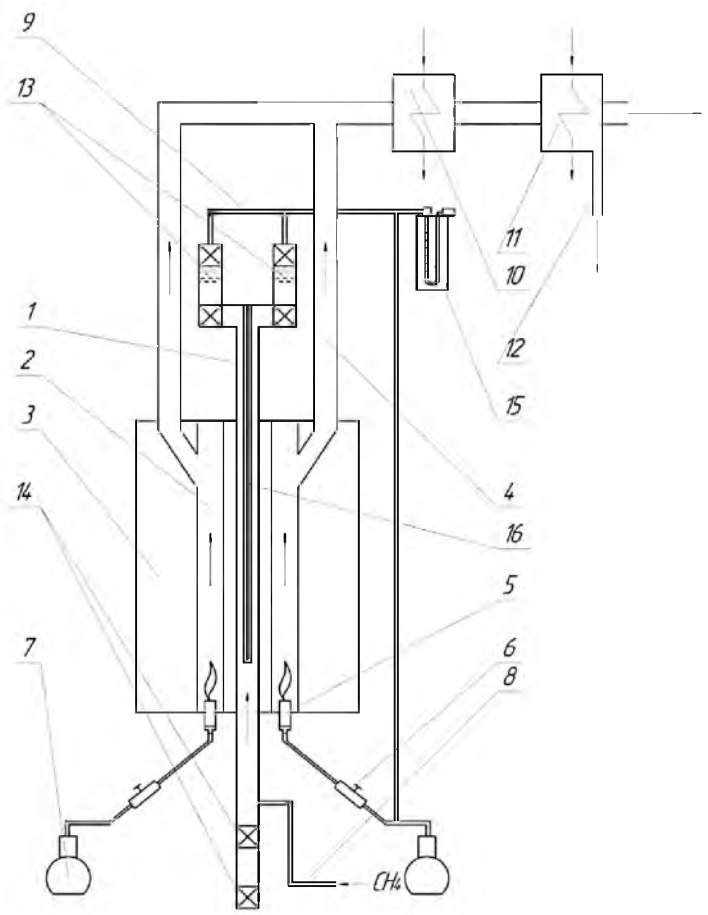


Рис. 1. Установка пиролиза метана
Fig. 1. Methane Pyrolysis Plant

Описание экспериментальной установки

Установка пиролиза метана (рис. 1) включает следующие элементы: *1* – реактор, в котором в зависимости от эффективности катализатора метан нагревается до температур 700 – 1000 °С с целью его термического разложения на водород и углерод; *2* – газовая печь, предназначенная для нагрева реактора путем факельного сжигания любого из перечисленных чистых газов (метан, водород) или части метано-водородной смеси, получаемой на выходе реактора; *3* – тепловая изоляция печи; *4* – выхлопные трубы газовой печи; *5* – горелки для сжигания газа; *6* – краны; *7* – емкости газа, используемого в качестве топлива газовой печи; *8* – трубка подачи метана в реактор для пиролиза; *9* – трубка отбора метано-водородной смеси; *10*, *11* – калориферы, в которых для охлаждения выходящих из печи газов используется водопроводная вода; *12* – трубка слива дистиллированной воды, получаемой в результате глубокого охлаждения уходящих газов; *13* – система фильтров, состоящая из минеральной ваты и металлической сетки; *14* – газоплотные задвижки; *15* – хроматограф; *16* – термопарный карман.

При сжигании газа в топке газовой печи *2* происходит ее нагрев с последующей радиационной передачей теплоты находящемуся в реакторе *1* метану (реактор *1* не находится в топочном пространстве печи *2*, рис. 1). При достижении температуры метана в реакторе 700 – 1000 °С происходит его превращение в водород и пиролизный углерод. Часть получаемой метано-водородной смеси направляется для сжигания в горелках *5* с целью обеспечения рабочей температуры в реакторе.

Тепловой расчет установки

Выполнены тепловые расчеты для четырех следующих вариантов исходных смесей: 70 % метана и 30 % водорода; 40 % метана и 60 % водорода; 100 % метан; 100 % водород.

В ходе теплового расчета при заданных геометрических характеристиках установки (рис. 2) необходимо определить расход поступающего на горение газа (смеси газов), обеспечивающий заданную температуру пиролизуемого метана; расход метана, поступающего на пиролиз; общее количество теплоты, получаемой в процессе горения; потери теплоты через изоляцию и с уходящими газами; количество теплоты, затрачиваемое на пиролиз метана; мощность и коэффициент полезного действия установки.

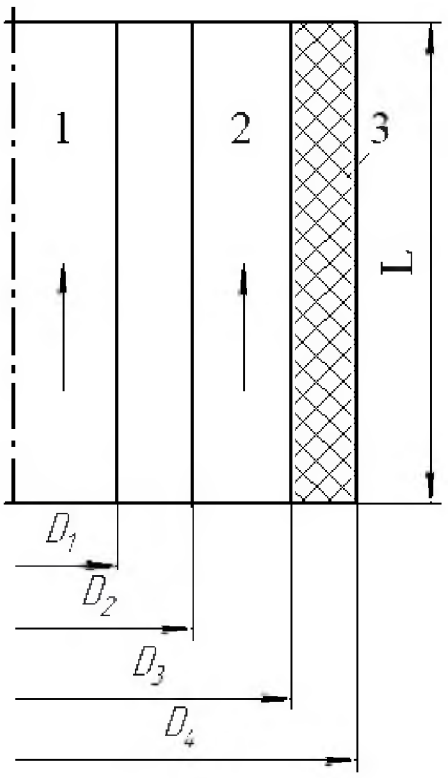


Рис. 2. Схема для теплового расчета установки пиролиза метана
Fig. 2. Scheme for thermal calculation of a methane pyrolysis plant

Рассмотрим последовательность теплового расчета при использовании в качестве топлива метано-водородной смеси в процентном соотношении: 70 % метана; 30 % водорода. Для выполнения теплового расчета использовали следующие исходные данные: t = 750 °С – температура газа внутри реактора; $q_р$ = 74,5 кДж/моль – количество теплоты, необходимой для осуществления химической реакции пиролиза метана; $Q^р_{CH_4}$ = 35845 кДж/м^3 – низшая теплота сгорания метана; $Q^р_{H_2}$ = 10806 кДж/м^3 – низшая теплота сгорания водорода; $Q^р_Н = 0{,}7Q^р_{CH_4} + 0{,}3Q^р_{H_2}$ = 28332 кДж/м^3 – низшая теплота сгорания газов (70 % метана и 30 % водорода); ρ_{CH_4} = 0,716 кг/м^3 – плотность метана; $C_р$ = 1,55 кДж/(м^3·К) – теплоемкость метана; ρ_{H_2} = 0,09 кг/м^3 – плотность водорода; M = 22,4 л – объем одного моля газа; λ = 0,035 Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности тепловой изоляции (кремнеземная вата); $\lambda_{ст}$ = 46 Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности стали; $\delta_{из}$ = 0,17 м – толщина изоляции; $\delta_{ст}$ = 0,004 м – толщина стальных стенок труб реактора и печи; $F_{из}$ = 1,3 м^2 – площадь наружной поверхности тепловой изоляции; $F_{ст}$ = 0,59 м^2 – площадь стен топочной камеры; $V_т$ = 0,006 м^3 – объем топочной камеры; $H_Л$ = 0,58 м^2 – лучевоспринимающая поверхность топочной камеры; $t_{ср} = (t_г + t_в)/2$=385 °С – средняя температура газа в реакторе; $S = 3{,}6V_т/F_{ст}$ = 0,037 м – эффективная толщина излучающего слоя; f = 0,0019 м^2 – площадь поперечного сечения реактора; α_1 = 35 Вт/(м^2·К) – коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности топки; α_2 = 8 Вт/(м^2·К) – коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности тепловой изоляции; $t_в$ = 20 °С – температура окружающей среды; t_1 = 750 °С – температура внутренней поверхности металлической стенки топки; D_1 = 57 мм – внутренний диаметр цилиндрического реактора; D_2 = 108 мм – внутренний диаметр печи; D_3 = 159 мм – внешний диаметр печи; D_4 = 500 мм – диаметр установки; L = 700 мм – длина печи.

Используя исходные данные, были получены следующие характеристики: коэффициент теплопередачи через наружную стенку печи и тепловую изоляцию k = 0,3 Вт/(м^2·К); удельный тепловой поток через тепловую изоляцию $q_{из} = k(t_1 - t_в)$ = 219 Вт/м^2; температура наружной поверхности изоляции $t_{из} = q_{из}/\alpha_2 + t_в$ = 47,3 °С; тепловые потери через наружную поверхность изоляции $Q_{из} = q_{из}F_{из}$ = 1029 кДж/ч; доля тепловых потерь в окружающую среду от теплоты затраченного топлива $q_5 = (Q_{из}/Q^р_Н)100$ = 3,6 %; коэффициент сохранения теплоты $\varphi = (100 - q_5)/100$ = 0,96.

Теоретический объем воздуха для полного сгорания смеси находится по формуле

$$V^0 = 0{,}0476\left(0{,}5H_2 + \sum\left(m + \frac{n}{4}\right)C_nH_m\right) = 0{,}0476\left(0{,}5 \cdot 30 + \left(1 + \frac{4}{4}\right)70\right) = 7{,}38 \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (1)$$

где n и m – число атомов углерода и водорода.

Теоретические объемы азота, трехатомных газов и водяных паров находятся по соотношениям

$$V^0_{N_2} = 0{,}079V^0 = 5{,}83 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (2)$$

$$V^0_{CO_2} = 0{,}01(\sum mC_nH_m) = 0{,}7 \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (3)$$

$$V^0_{H_2O} = 0{,}01\left(H_2 + \sum\frac{n}{2}C_nH_m\right) = 1{,}7 \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (4)$$

Энтальпия газов при полном сгорании (коэффициент избытка воздуха α = 1) и соответствующей температуре находится по следующей формуле [19–21]:

$$I^0_г = V^0_{CO_2}c_{CO_2} + V^0_{N_2}c_{N_2} + V^0_{H_2O}c_{H_2O}, \quad (5)$$

где c_{CO_2}, c_{N_2}, c_{H_2O} – энтальпия CO_2, N_2, H_2O при соответствующей температуре.

Энтальпия теоретически необходимого воздуха при α = 1 и соответствующей температуре будет

$$I_{\text{в}}^{0} = V^{0} c_{\text{в}}, \qquad (6)$$

где $c_{\text{в}}$ – энтальпия воздуха при соответствующей температуре.

Результаты расчетов по уравнениям (1) – (6) при коэффициенте избытка воздуха α = 1,1 (с учетом присосов в установке Δα = 0,1) представлены в табл. 1.

При расчете теплового баланса принимаем $Q_{\text{р}}^{\text{р}} = Q_{\text{Н}}^{\text{р}} = 28332$ кДж/м^3, где $Q_{\text{р}}^{\text{р}}$ – располагаемое тепло топлива. Температуру уходящих газов принимаем $t_{\text{ух}} = 1030$ °С с последующим уточнением при расчете теплового баланса. Энтальпия уходящих газов при α = 1,1 находится путем интерполяции данных из табл. 1: $I_{\text{ух}} = 14145$ кДж/м^3. Энтальпия теоретически необходимого количества воздуха при $t_{\text{в}}$ = 20 °С будет $I_{\text{в}} = \alpha I_{\text{в}}^{0} = 1{,}1 \cdot 251{,}4 = 276{,}5$ кДж/м^3.

Потери теплоты с уходящими газами находятся по следующей формуле:

$$q_2 = \left[(I_{\text{ух}} - I_{\text{в}}) / Q_{\text{н}}^{\text{р}}\right] \cdot 100 = 49 \ \%.$$

Суммарные тепловые потери установки определяются по следующему уравнению:

$$\Sigma q = q_2 + q_3 + q_5 = 53{,}1 \ \%,$$

где q_3 = 0,5 % – потери теплоты от химического недожога.

Коэффициент полезного действия установки составляет η = 100 – Σq = 46,9 %.

Количество теплоты, затрачиваемой на осуществление химической реакции пиролиза метана $Q_{\text{рп}} = q_{\text{р}}/M = 3326{,}9$ кДж/м^3.

Количество теплоты, необходимой для нагрева метана от 20 до 750 °С

$$Q_{\text{м}} = C_{\text{р}}(t - t_{\text{в}}) = 1131 \text{ кДж/м}^3.$$

Количество теплоты, затрачиваемой на нагрев 1 м^3 газа в реакторе пиролиза

$$Q_{\text{р}} = \left(Q_{\text{рп}} + Q_{\text{м}}\right)/\eta = 9482 \text{ кДж/м}^3.$$

Найдем объем воздуха и продуктов сгорания при работе топки без наддува (при атмосферном давлении p_1 = 1 атм) при α = 1,1. Объем воздуха, водяных паров, газов определим по следующим уравнениям:

$$V_{\text{в}} = (\alpha - 1)V^{0} = 0{,}75 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$
$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{0} + 0{,}016(\alpha - 1)V^{0} = 1{,}71 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$
$$V_{\text{г}} = V_{\text{CO}_2}^{0} + V_{\text{N}_2}^{0} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{0} + V_{\text{в}} = 8{,}99 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Таблица 1

Расчетные значения энтальпий газов при термохимическом разложении

Table 1. **Calculated values of enthalpies of gases during thermochemical decomposition**

t, °С	$I_{\text{CO}_2}^{0}$	$I_{\text{N}_2}^{0}$	$I_{\text{H}_2\text{O}}^{0}$	$I_{\text{г}}^{0}$	$I_{\text{в}}^{0}$	$I_{\text{ух}} = I_{\text{г}}^{0} + (\alpha - 1)I_{\text{в}}^{0}$
700	1022	5522	1965	8505	7236	9230
800	1210	6377	2283	9854	8099	10688
900	1365	7257	2606	11229	9461	12176
1000	1542	8132	2953	12628	10604	13688
1100	1722	9012	3297	14032	11782	15209
1200	1902	9892	3645	15444	12955	16739
1300	2086	10797	4014	16894	14132	18306
1800	3016	15415	5916	24348	20162	26363
1900	3201	16366	6314	25881	21398	28022
2000	3393	17296	6721	27410	22634	29673
2100	3582	18247	7123	28952	23870	31341
2200	3775	19198	7529	30503	25110	33013

Примечание: $V_{CO_2}^{0} = 0{,}7$ м^3/м^3, $V_{\text{N}_2}^{0} = 5{,}83$ м^3/м^3, $V_{\text{H}_2\text{O}}^{0} = 1{,}7$ м^3/м^3, $V^{0} = 7{,}38$ м^3/м^3; $I_{\text{CO}_2}^{0} = V_{\text{CO}_2}^{0} c_{\text{CO}_2}$; $I_{\text{N}_2}^{0} = V_{\text{N}_2}^{0} c_{\text{N}_2}$; $I_{\text{H}_2\text{O}}^{0} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{0} c_{\text{H}_2\text{O}}$.

Доли газов находятся по формулам

$$r_{CO_2}=\frac{V^0_{CO_2}}{V_г}=0{,}078;\ r_{H_2O}=\frac{V_{H_2O}}{V_г}=0{,}19;$$
$$r_n=r_{CO_2}+r_{H_2O}=0{,}268.$$

Суммарное давление трехатомных газов будет $p_n=pr_n=0{,}268$ ата.

Коэффициент ослабления лучей трехатомных газов при температуре на выходе из топки $t_{ух}$ = 1030 °С находится по следующему выражению:

$$k_г=\frac{0{,}8+1{,}6r_{H_2O}}{\sqrt{p_nS}}\left(1-0{,}38\frac{t_{ух}+273}{1000}\right)=5{,}54.$$

Формулы для определения степени черноты топочной среды a, степени экранирования топки Ψ и эффективной степени черноты факела $a_ф$ имеют вид: $a=1-e^{-k_г p_n S}=0{,}054$; $\Psi=H_л/F_{ст}=0{,}58/0{,}59=0{,}98$; $a_ф=\beta a=0{,}054$, где $\beta=1$ (при сжигании газа); $k_г p_n S=0{,}056$.

Степень черноты топочной среды находится по формуле

$$a_т=\frac{0{,}82a_ф}{a_ф+(1-a_ф)\Psi\xi}=0{,}045,$$

где $\xi=1$ – коэффициент загрязнения топки.

Теплота, вносимая в топку с воздухом, составляет $Q_в$= 276 кДж/м^3.

Тепловыделение в топке на 1 м^3 топлива

$$Q_m=Q_в+Q^р_Н\frac{100-q_3}{100}=28466\ кДж/м^3.$$

Теоретическая температура горения находится по тепловыделению (табл. 1) и составляет t_a = 1927 °С.

Теплота от топки к реактору передается конвекцией и излучением. Общее количество полезно используемой теплоты примем равным Q_n = 23864 кДж/ч (с последующим уточнением).

Для расчета передачи теплоты конвекцией найдем объем $V_м$ и скорость $W_м$ прокачиваемого через реактор метана

$$V_м=\frac{Q_п}{Q_р}=2{,}51\ м^3/ч;$$
$$W_м=\frac{V_м(t_{ср}+273)}{3600\cdot f\cdot 273}=0{,}88\ м/с.$$

Для расчета коэффициента теплоотдачи конвекцией найдем критерии Прандтля и Рейнольдса: $Pr_м$ = 0,82 при $t_{ср}$ = 385 °С; $Pr_{ст}$ = 0,9 при $t_{ст}$ = 750 °С; $Re=\frac{W_м D_1}{\nu}=822$, где $\nu=61\cdot10^{-6}$ м^2/с – кинематический коэффициент вязкости метана.

Так как Re < 2300 (ламинарный режим течения), то коэффициент теплоотдачи конвекцией находится по следующему критериальному уравнению

$$Nu=1{,}4\left(Re\frac{d}{L}\right)^{0{,}4}\cdot Pr_м^{0{,}33}\left(\frac{Pr_м}{Pr_{ст}}\right)^{0{,}25}=6{,}8,$$

где $Nu=\frac{\alpha_к\lambda_м}{D_1}$ – критерий Нуссельта; $\alpha_к$ – коэффициент теплоотдачи конвенкцией; $\lambda_м$ = 0,09 Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности метана.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией находится по формуле

$$\alpha_к=Nu\lambda_м/D_1=11{,}6\ Вт/(м^2\cdot К).$$

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется по формуле

$$\alpha_л=\frac{\varepsilon C_0}{10^8}\frac{t^4_{ух}-t^4_{ср}}{t_{ух}-t_{ср}}=\varepsilon\Theta C_0=65{,}7\ Вт/(м^2\cdot К),$$

где $\varepsilon=\varepsilon_п\varepsilon_м$; $\Theta=\frac{1}{10^8}\frac{t^4_{ух}-t^4_{ср}}{t_{ух}-t_{ср}}=42{,}5$ – температурный коэффициент; $\varepsilon_м$ = 0,4 – степень черноты топки; C_0 = 4,9 Вт/(м^2·К) – коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε_n – приведенная степень черноты, определяемая по формуле

$$\varepsilon_n=1/\left[1/\varepsilon'_p+F_p(1/\varepsilon_2-1)/F_2\right]=0{,}744,$$

где $F_р=\pi D_1 L=0{,}125$ м^2; $F_2=\pi D_2 L=0{,}238$ м^2; $\varepsilon'_р=0{,}5(\varepsilon_р+1)=0{,}8$ – эффективная степень черноты трубы реактора; $\varepsilon_р$ = 0,61 – степень черноты трубы реактора; ε_2 = 0,85 – степень черноты стенки топки.

Удельное количество теплоты, переданное от топки к реактору, находится по формуле

$$q_0=(\alpha_к+\alpha_л)(t_{ух}-t_{ср})=49794\ Вт/м^2.$$

Общее количество полезно используемой теплоты

$$Q'_n=q_0F_р=22406\ кДж/ч.$$

Различие с предварительно принятой величиной Q_n = 23804 кДж/ч составляет 1,06 %. Считаем, что результат удовлетворительный и дополнительный перерасчет не требуется.

Полный расход топлива

$$B_{\text{р}}=\frac{Q_n 100}{Q_{\text{р}}^{\text{р}}\eta} = 1{,}39 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Теплосодержание газов на выходе из топки

$$J_m'' = Q_m - \frac{Q_n}{B_{\text{р}}\varphi} = 14220 \text{ кДж/м}^3.$$

Этому теплосодержанию по $J-\vartheta''$ таблице соответствует $\vartheta''=1078$ °С.

При величине $\vartheta_m''=1078$ °С средняя теплоемкость продуктов сгорания

$$Vc_{\text{ср}}=\frac{Q_m - J_m''}{t_{\text{а}} - \vartheta_m''} = 16 \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{К)}.$$

Температура газов на выходе из топки находится по следующей формуле [21]:

$$\vartheta_m''=\frac{\text{T}_{\text{а}}}{\left(\frac{1{,}27\cdot10^{-8}\xi H_{\text{д}} a_{\text{т}} T_{\text{а}}^3}{\phi B_p Vc_{\text{ср}}}\right)^{0{,}6}+1} - 273 = 1077 \text{ °С},$$

где $T_{\text{а}} = t_{\text{а}} + 273 = 2200$ °С.

Расхождение с ранее принятой $t_{\text{ух}} = 1030$ °С составляет 1,04 % (перерасчет не требуется).

Через реактор прокачивается $V_{\text{м}} = 2{,}51$ м^3/ч метана, поступающего на пиролиз. Полный расход сжигаемого в печи топлива, необходимого для пиролиза этого объема газа, составляет $B_{\text{р}} = 1{,}39$ м^3/ч.

При этом образуется $V_{\text{H}_2} = \eta_{\text{в}} V_{\text{м}} = 1{,}5$ м^3/ч водорода (где $\eta_{\text{в}} = 0{,}6$ – объемная доля водорода в газовой смеси, выходящей из реактора). Тепловая мощность установки пиролиза метана определяется по формуле

$$N = B_{\text{р}} Q_{\text{р}}^{\text{р}} = 10{,}9 \text{ кВт}.$$

При этом на производство 1 м^3 водорода расходуется количество теплоты, равное

$$q_{\text{уд}} = N/V_{\text{H}_2} = 7{,}29 \text{ кВт·ч/м}^3.$$

Результаты расчетов всех вариантов состава топлива для температур (750 и 1000 °С) пиролиза метана представлены в табл. 2. Показано, что наиболее экономичным, но наименее экологичным, является вариант со сжиганием метана, при котором для пиролиза 2,93 м^3 метана в реакторе необходимо использование 1,37 м^3 метана для сжигания в печи. В этом случае при температуре пиролиза 750 °С, протекающего с использованием катализатора на никелевой основе, получается 1,8 м^3 водорода (61,4 %) и 1,13 м^3 метана (38,6 %). Менее экономичным, но более экологичным (по выбросу оксида CO_2 в окружающую среду) является вариант со сжиганием метано-водородной смеси, включающей 70 % метана и 30 % водорода. В рассматриваемом случае для пиролиза 2,51 м^3 метана при температуре 750 °С требуется сжигание 1,39 м^3 смеси при выходе водорода и метана из реактора в количестве 1,5 (59,7 %) и 1,01 м^3 (40,3 %). Сжигание в печи чистого водорода, являясь наиболее экологичным, экономически нецелесообразно, так как при пиролизе 5,8 м^3 метана количество сжигаемого водорода (9,53 м^3) превышает его количество (3,48 м^3), получаемое в процессе пиролиза, что связано с низкой теплотой сгорания водорода (10806 кДж/м^3) в сравнении с теплотворностью метана (35845 кДж/м^3). Расчет пиролиза метана в количестве 2,83 м^3 при температуре 1000 °С (без использования катализатора) показал, что при затратах сжигаемого топлива (чистый метан) 1,63 м^3 получается 1,7 м^3 водорода (60 %) и 1,13 м^3 метана (40 %).

Таблица 2

Значения величин по видам топлива

Table 2. **Values of quantities by fuel type**

Показатель	Значение показателя							
Вид топлива	Метан		Водород		60 % водорода + 40 % метана		30 % водорода + 70 % метана	
Теплотворность топлива, кДж/м^3	37102		10806		20820		28165	
Температура в топке, °С	1010	1070	1230	1300	1080	1150	1030	1095
Расход топлива, м^3/ч	1,37	1,63	9,53	12,05	3,12	3,92	1,39	2,12
Температура нагрева метана в реакторе, °С	750	1000	750	1000	750	1000	750	1000
КПД установки, %	44,4	43,3	41,9	38,3	43,9	40	46,9	44,2
Расход метана через реактор, м^3/ч	2,93	2,83	5,8	6,22	3,84	4,05	2,51	3,9
Количество получаемого водорода, м^3/ч	1,8	1,7	3,48	3,73	2,3	2,43	1,5	2,2
Тепловая мощность установки, кВт	13,6	16,2	28,6	36,1	18,03	22,65	10,9	17,2
Удельный расход энергии на получение водорода, кВт· ч/м^3	7,6	9,5	8,2	9,7	7,84	9,32	7,29	9,4

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования были выполнены с целью проверки работоспособности установки на различных видах топлива, используемого для горения в печи, а также оценки количества получаемого на выходе из реактора водорода в зависимости от температуры пиролиза метана. При сжигании 1 м³/ч чистого метана была обеспечена температура пиролизуемого в реакторе метана 1000 °С при его расходе 1 м³/ч. В смеси газов на выходе из реактора количество водорода, полученного в результате пиролиза метана, составляло 60 %. Глубокое охлаждение уходящих из печи газов, включающих оксид углерода CO_2 и водяной пар H_2O, до температуры конденсации (точки росы) водяных паров позволило получить 0,5 кг дистиллированной воды. Для охлаждения уходящих газов применен двухсекционный оребренный теплообменник (калорифер), охлаждающим агентом в котором была водопроводная вода с температурой 20 °С. При использовании в качестве топлива смеси газов, состоящей из 50 % водорода и 50 % метана на 1 м³ сжигаемого топлива, получено 0,6 кг дистиллированной воды.

В процессе пиролиза метана на внутренних поверхностях стенок реактора происходило отложение углерода в количестве 100 г на 1 м³ пиролизуемого метана.

Выводы

Выполненные расчеты показали, что наиболее экономичным оказался вариант сжигания метана, при котором затраты на пиролиз составляют 2,93 м³ метана при затратах на нагрев реактора 1,37 м³ метана, что позволяет получить 1,8 м³ (61,4 %) водорода и 1,13 м³ (38,6 %) метана при температуре пиролиза 750 °С с использованием никелевого катализатора.

Сжигание метано-водородной смеси (70 % метана и 30 % водорода) оказалось менее экономичным, но более экологичным с точки зрения выбросов оксида CO_2. Для пиролиза 2,51 м³ метана требуется 1,39 м³ смеси, обеспечивающей выход 1,5 м³ (59,8 %) водорода и 1,01 м³ (40,2 %) метана.

Использование чистого водорода для сжигания показало наибольшую экологичность, но экономически нецелесообразно, поскольку затраты на пиролиз 5,8 м³ метана требуют сжигания 9,53 м³ водорода, что превосходит количество (3,48 м³) водорода, полученное в результате пиролиза. Это объясняется низкой теплотворной способностью водорода в сравнении с метаном.

Без использования катализатора при пиролизе 2,83 м³ метана при температуре 1000 °С затраты составляют 1,63 м³ сжигаемого метана, давая выход 1,7 м³ (60 %) водорода и 1,13 м³ (30 %) метана.

Практические эксперименты показали, что сжигание смеси 60 % водорода и 40 % метана при охлаждении дымовых газов до точки росы водяного пара позволяет получать 0,55 кг дистиллированной воды на 1 м³ сжигаемой смеси. Анализ пиролизного углерода выявил содержание наноматериалов на уровне 27 %, включая нановолокна.

Таким образом, установка демонстрирует потенциал для эффективного и экологичного производства водорода, при этом выбор топлива для сжигания существенно влияет на экономичность и экологичность процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chisholm G., Zhao T., Cronin L. Hydrogen from water electrolysis. *Storing Energy (Second Edition). Elsevier*. 2022;559–591. *https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824510-1.00015-5*
2. Zhou Y., Li R., Zexuan Lv., Liu J., Zhou H., Xu C. Green hydrogen: A promising way to the carbon-free society. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2022;43:2–13. *https://doi.org/10.1016/j.cjche.2022.02.001*
3. Shih, A.J., Monteiro, M.C.O., Dattila, F. et al. Water electrolysis. *Nat Rev Methods Primers*. 2022;84(2). *https://doi.org/10.1038/s43586-022-00164-0*
4. Zhang H., Sun Z., Hu Y.H. Steam reforming of methane: Current states of catalyst design and process upgrading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;149:111330. *https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111330*
5. Oni A.O., Anaya K., Giwa T., Di Lullo G., Kumar A. Comparative assessment of blue hydrogen from steam methane reforming, autothermal reforming, and natural gas decomposition technologies for natural gas-producing regions. *Energy Conversion and Management*. 2022;254:115245. *https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115245*
6. Szablowski L., Wojcik M., Dybinski O. Review of steam methane reforming as a method of hydrogen production. *Energy*. 2025;316:134540. *https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134540*
7. Midilli A., Kucuk H., Topal M.E., Akbulut U., Dincer I. A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(50):25385–25412. *https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.088*
8. Kong W. et al. Biological treatment of refractory organic compounds in coal gasification wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*. 2024;60:105255. *https://doi.org/10.3390/pr11061765*
9. Burchart D. et al. Life cycle assessment of hydrogen production from coal gasification as an alternative transport fuel. *Energies*. 2022;16(1):383. *https://doi.org/10.3390/en16010383*
10. McConnachie M., Konarova M., Smart S. Literature review of the catalytic pyrolysis of me-

thane for hydrogen and carbon production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(46):25660–25682. *https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.123*

11. Pan M., Jin C., Han B., Ye R., Zhang R., Feng G. A theoretical insight about co-pyrolysis reaction of natural gas and coal. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2023;63:220–225. *https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.05.007*
12. Okeke I.J., Saville B.A., MacLean H.L. Low carbon hydrogen production in Canada via natural gas pyrolysis. International Journal of Hydrogen Energy. 2023;48(34):12581–12599. *https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.169*
13. Moghaddam A. L. et al. Methane pyrolysis for hydrogen production: navigating the path to a net zero future. *Energy & Environmental Science*. 2025;18(6);2747–2790. *https://doi.org/10.1039/D4EE06191H*
14. Scheiblehner D. et al. Hydrogen production by methane pyrolysis in molten binary copper alloys. *International journal of hydrogen energy*. 2023;48(16):6233–6243. *https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.115*
15. Dinh V.N., Leahy P., McKeogh E., Murphy J., Cummins V. Development of a viability assessment model for hydrogen production from dedicated offshore wind farms. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(48):24620–24631. *https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.232*
16. Bharathi R.R., Sarathi R., Vinu R. Selective production of hydrogen and solid carbon via methane pyrolysis using a swirl-induced point-plane non-thermal plasma reactor. *Energy Fuels*. 2022;6(2):826–836. *https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c03383*
17. Uhlenbruck N., Neele B. et al. Methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor: a model approach combining bubble dynamics with byproduct and soot formation. *Energy Technology*. 2022;10(11):2200654. *https://doi.org/10.1002/ente.202200654*
18. Пат. RU 217185U1. Устройство для получения водорода путем термического разложения углеводородов в реакторе с газовым нагревом / И.В. Кудинов, В.А. Кудинов, Ю.В. Великанова, А.В. Пашин, Т.Ф. Амиров, В.Д. Долгих, А.А. Пименов; зарегистр. 29.12.2022; опубл. 22.03.2023.
19. Михеев М.А., Михеева И.М. *Основы теплопередачи*. Москва: Бастет. 2010:343.
20. Кузнецов Н.В., Митор И.Е., Дубовский В.В. *Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод*. Москва: Эколит. 2020:296.
21. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. *Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии*. Москва: Альянс. 2019:576.

REFERENCES

1. Chisholm G., Zhao T., Cronin L. Hydrogen from water electrolysis. *Storing Energy (Second Edition). Elsevier*. 2022;559–591. *https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824510-1.00015-5*
2. Zhou Y., Li R., Zexuan Lv., Liu J., Zhou H., Xu C. Green hydrogen: A promising way to the carbon-free society. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2022;43:2–13. *https://doi.org/10.1016/j.cjche.2022.02.001*
3. Shih, A.J., Monteiro, M.C.O., Dattila, F. et al. Water electrolysis. *Nat Rev Methods Primers*. 2022;84(2). *https://doi.org/10.1038/s43586-022-00164-0*
4. Zhang H., Sun Z., Hu Y.H. Steam reforming of methane: Current states of catalyst design and process upgrading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;149:111330. *https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111330*
5. Oni A.O., Anaya K., Giwa T., Di Lullo G., Kumar A. Comparative assessment of blue hydrogen from steam methane reforming, autothermal reforming, and natural gas decomposition technologies for natural gas-producing regions. *Energy Conversion and Management*. 2022;254:115245. *https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115245*
6. Szablowski L., Wojcik M., Dybinski O. Review of steam methane reforming as a method of hydrogen production. *Energy*. 2025;316:134540. *https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134540*
7. Midilli A., Kucuk H., Topal M.E., Akbulut U., Dincer I. A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(50):25385–25412. *https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.088*
8. Kong W. et al. Biological treatment of refractory organic compounds in coal gasification wastewater: A review *Journal of Water Process Engineering*. 2024;60:105255. *https://doi.org/10.3390/pr11061765*
9. Burchart D. et al. Life cycle assessment of hydrogen production from coal gasification as an alternative transport fuel. *Energies*. 2022;16(1):383. *https://doi.org/10.3390/en16010383*
10. McConnachie M., Konarova M., Smart S. Literature review of the catalytic pyrolysis of methane for hydrogen and carbon production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(46):25660–25682. *https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.123*
11. Pan M., Jin C., Han B., Ye R., Zhang R., Feng G. A theoretical insight about co-pyrolysis reaction of natural gas and coal. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2023;63:220–225. *https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.05.007*

12. Okeke I.J., Saville B.A., MacLean H.L. Low carbon hydrogen production in Canada via natural gas pyrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(34):12581–12599. *https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.169*
13. Moghaddam A. L. et al. Methane pyrolysis for hydrogen production: navigating the path to a net zero future. *Energy & Environmental Science*. 2025;18(6);2747–2790. *https://doi.org/10.1039/D4EE06191H*
14. Scheiblehner D. et al. Hydrogen production by methane pyrolysis in molten binary copper alloys. *International journal of hydrogen energy*. 2023;48(16):6233–6243. *https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.115*
15. Dinh V.N., Leahy P., McKeogh E., Murphy J., Cummins V. Development of a viability assessment model for hydrogen production from dedicated offshore wind farms. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(48):24620–24631. *https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.232*
16. Bharathi R.R., Sarathi R., Vinu R. Selective production of hydrogen and solid carbon via methane pyrolysis using a swirl-induced point-plane non-thermal plasma reactor. *Energy Fuels*. 2022;36(2):826–836. *https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c03383*
17. Uhlenbruck N., Neele B. et al. Methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor: a model approach combining bubble dynamics with byproduct and soot formation. *Energy Technology*. 2022;10(11):2200654. *https://doi.org/10.1002/ente.202200654*
18. Kudinov I.V., Kudinov V.A., Velikanova Yu.V., Pashin A.V., Amirov T.F., Dolgikh V.D., Pimenov A.A. A device for producing hydrogen by thermal decomposition of hydrocarbons in a gas-heated reactor. Utility model patent. Pat. RU 217185U1. registered. 29.12.2022; published 22.03.2023. (In Russ.).
19. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Basics of Heat Transfer*. Moscow: Bastet. 2010:343. (In Russ.).
20. Kuznetsov N.V., Mitor I.E., Dubovskii V.V. *Thermal Calculation of Boiler Units. Normative Method.* Moscow: Ehkolit. 2020:296. (In Russ.).
21. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Examples and tasks for the course on processes and apparatuses in chemical engineering*. Moscow: Alliance. 2019:576. (In Russ.).

Сведения об авторах:

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

***Сергей Владимирович Зайцев**, ассистент кафедры теоретических основ теплотехники и гидромеханики,* Самарский государственный технический университет
***E-mail**:* mr.zaitzev@mail.ru
***ORCID**:* 0009-0000-4380-1201
***SPIN-код**:* 1589-9724

***Евгений Валерьевич Керосиров**, ассистент кафедры физики,* Самарский государственный технический университет
***E-mail**:* kerosirovv@yandex.ru
***ORCID**:* 0009-0004-3950-2750
***SPIN-код**:* 7135-8747

***Виктор Дмитриевич Долгих**, ассистент кафедры физики,* Самарский государственный технический университет
***E-mail**:* fizikasgtu@yandex.ru
***ORCID**:* 0000-0003-1505-3810
***SPIN-код**:* 9351-5388

Information about the authors:

***Vasilii A. Kudinov**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering and Hydromechanics,* Samara State Technical University
***E-mail**:* totig@samgtu.ru
***ORCID**:* 0000-0002-3071-5168
***SPIN-код**:* 1534-6882

***Sergei V. Zaitsev**, Assistant Professor at the Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering and Hydromechanics,* Samara State Technical University
***E-mail**:* mr.zaitzev@mail.ru
***ORCID**:* 0009-0000-4380-1201
***SPIN-код**:* 1589-9724

***Evgenii V. Kerosirov**, Assistant Professor, Department of Physics,* Samara State Technical University
***E-mail**:* kerosirovv@yandex.ru
***ORCID**:* 0009-0004-3950-2750
***SPIN-код**:* 7135-8747

***Viktor D. Dolgikh**, Assistant Professor, Department of Physics,* Samara State Technical University
***E-mail**:* fizikasgtu@yandex.ru
***ORCID**:* 0000-0003-1505-3810
***SPIN-код**:* 9351-5388

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 01.10.2025
После доработки 05.02.2026
Принята к публикации 12.02.2026

Received 01.10.2025
Revised 05.02.2026
Accepted 12.02.2026

Оригинальная статья

УДК 669.09

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-37-46

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЫЛИ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ПРОЦЕСС МАГНИТНОЙ СЕПАРАЦИИ

© 2026 г. С. О. Сафонов, С. В. Фейлер

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

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования влияния гранулометрического состава и влажности пыли электросталеплавильного производства на эффективность процесса магнитной сепарации. При исследовании применяли методы гранулометрического, рентгенофазового и химического анализа, а также экспериментальные испытания на магнитном сепараторе ЭРГА БСМ-СМВИ/Т4028, направленные на определение оптимальных характеристик пыли электросталеплавильного производства для повышения качества концентрата и слабомагнитных хвостов. Проведены серии экспериментов по изучению влияния фракционного состава и влажности материала на показатели обогащения. При использовании пыли фракцией менее 0,25 мм достигается максимальная эффективность сепарации. Установлено, что при минимальной влажности повышается содержание железа в концентрате на 15 %, а при повышенной – снижается массовый выход. Применение магнитной сепарации пыли электросталеплавильного производства с фракцией менее 0,25 мм и влажностью менее 2 % позволяет получать концентрат с повышенным содержанием железа и пониженным содержанием цинка, а также образуются слабомагнитные хвосты с максимальным содержанием цинка. Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов для совершенствования технологий переработки металлургических отходов. Исследования показали, что при оптимальных условиях доля цинка в хвостах возрастает до 60 %, что делает их пригодными для последующего извлечения ценных компонентов. Это позволяет разработать замкнутый цикл переработки отходов, интегрируя магнитную сепарацию в комплексную ресурсосберегающую технологию. Таким образом, установленные в ходе экспериментальных магнитных сепараций оптимальные параметры влажности и дисперсности пыли электросталеплавильного производства дают конкретные инженерные решения для настройки сепарационного оборудования и открывают перспективу для создания малоотходных производственных схем в металлургии.

Ключевые слова: магнитная сепарация, пыль электросталеплавильного производства, концентрат, хвосты, фракционный состав, фазовый состав, химический состав, влажность

Для цитирования: Сафонов С.О., Фейлер С.В. Исследование влияния характеристик пыли электросталеплавильного производства на процесс магнитной сепарации. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):37–46. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-37-46*

Original article

STUDY OF THE INFLUENCE OF DUST CHARACTERISTICS FROM ELECTRIC STEEL MELTING ON THE MAGNETIC SEPARATION PROCESS

© 2026 S. O. Safonov, S. V. Feiler

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

Abstract. The results of an experimental study of the effect of the granulometric composition and humidity of electric steelmaking dust on the efficiency of the magnetic separation process are presented. The study used methods of granulometric, X-ray phase and chemical analysis, as well as experimental tests on an ERG magnetic separator

BSM-SMVI/T4028, aimed at determining the optimal characteristics of electric steelmaking dust to improve the quality of concentrate and weakly magnetic tailings. A series of experiments have been conducted to study the effect of the fractional composition and moisture content of the material on the enrichment parameters. When using dust with a fraction of less than 0.25 mm, maximum separation efficiency is achieved. It was found that at minimum humidity, the iron content in the concentrate increases by 15 %, and at high humidity, the mass yield decreases. The use of magnetic separation of electric steelmaking dust with a fraction of less than 0.25 mm and a humidity of less than 2 % makes it possible to obtain a concentrate with a high iron content and a low zinc content, as well as to obtain weakly magnetic tailings with a maximum zinc content. The practical significance of the work lies in the possibility of applying the results obtained to improve technologies for processing metallurgical waste. Studies have shown that under optimal conditions, the proportion of zinc in the tailings increases to 60 %, which makes them suitable for the subsequent extraction of valuable components. This makes it possible to develop a closed waste recycling cycle by integrating magnetic separation into a comprehensive resource-saving technology. Thus, the optimal humidity and dust dispersion parameters of the electric steelmaking plant established during experimental magnetic separations provide specific engineering solutions for setting up separation equipment and open up the prospect for creating low-waste production schemes in metallurgy.

Keywords: magnetic separation, electric steelmaking dust, concentrate, tailings, fractional composition, phase composition, chemical composition, humidity

For citation: Safonov S.O., Feiler S.V. Study of the influence of dust characteristics from electric steel melting on the magnetic separation process. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):37–46. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-37-46*

Введение

В настоящее время в металлургической промышленности образуется до 30 кг пыли на тонну жидкого металла в процессе выплавке в дуговых сталеплавильных печах. В зависимости от вида сталеплавильного процесса и особенностей ведения плавки образуется пыль с повышенным содержание оксидов железа и цинка. В настоящее время до 5 % пыли перерабатывается пирометаллургическими или гидрометаллургическими способами, а остальная масса уходит на складирование в отвал [1 – 3]. Для того, чтобы снизить экологическую нагрузку и повысить эффективность металлургических процессов, необходимо разработать технологию, позволяющую повысить долю вовлечения отходов в производство [4 – 6].

Проблема утилизации пыли в сталеплавильном производстве приобретает все более актуальный характер в связи с растущими требованиями к экологической безопасности и необходимостью оптимизации производственных процессов. Разработка эффективных технологий переработки пыли способна существенно снизить нагрузку на окружающую среду и повысить экономическую эффективность металлургических предприятий [7; 8].

Современные подходы к переработке пыли включают не только традиционные методы, но и инновационные технологии, позволяющие более эффективно извлекать ценные компоненты. Внедрение таких технологий требует проведения комплексных исследований свойств пыли и разработки оптимальных режимов переработки [9; 10].

Поиск новых решений в области переработки пыли также обусловлен необходимостью соблюдения все более строгих экологических норм и снижения производственных затрат. Разработка передовых технологий переработки может открыть новые возможности для вторичного использования отходов производства и повысить технико-экономические показатели предприятия [11 – 13].

Методика исследований

Объектом экспериментального исследования служила проба (рис. 1) техногенного сырья (пыли электросталеплавильного производства), отобранная с территории отвала АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01 – 2017 [14; 15]. Отбор точечных проб осуществляли методом конверта с последующим объединением в усредненную лабораторную пробу массой 15 кг. Сокращение материала проводили квартованием. Пробоподготовка включала сушку навесок при температуре 105 ± 5 °С до постоянной массы в сушильном шкафу SNOL 58/350. Гранулометрический состав исходной пыли определяли сухим ситовым методом с использованием набора стандартных сит (диаметр ячейки 3,00; 1,00; 0,50; 0,25; 0,10; 0,05 мм). Рассев проводили в течение 20 мин при амплитуде колебаний 2 мм (рис. 2). Для контроля сходимости результатов каждую фракцию взвешивали на аналитических весах M-ER 122ACF-3000.05 с погрешностью не более 0,01 г; потери при просеве не превышали 0,5 % от исходной навески.

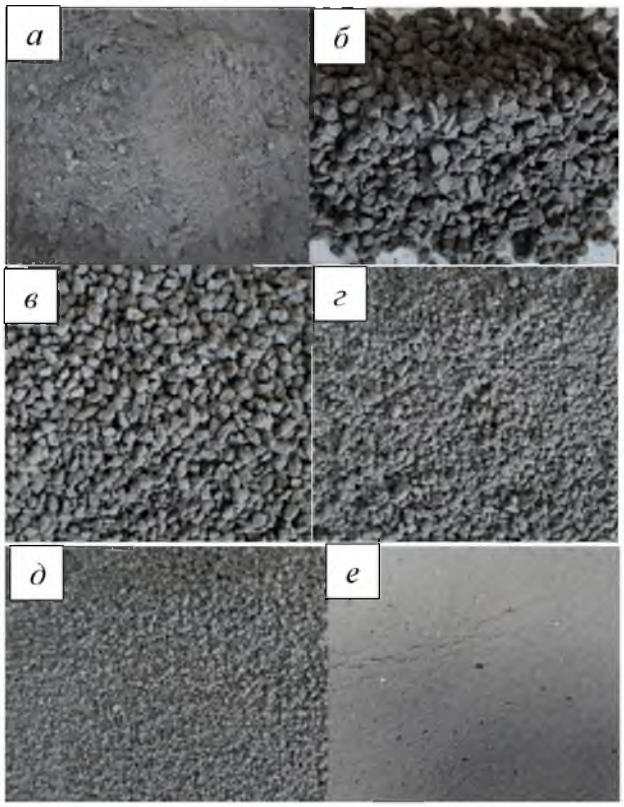


Рис. 1. Пыль электросталеплавильного производства:
а – исходный материал; *б – е* – фракция 3, 2, 1, 0,25 и менее 0,25 мм
Fig. 1. Dust from electric steelmaking:
а – starting material; *б – е* – fraction 3, 2, 1, 0.25 and less than 0.25 mm

Фазовый состав исходного материала и продуктов сепарации исследовали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре ShimadzuXRD-6000 в излучении CuKα (λ = 1,5406 Å) с никелевым фильтром [16 – 18]. Дифрактометр работал по схеме фокусировки Брэгга – Брентано (θ – 2θ). Напряжение на рентгеновской трубке составляло 40 кВ, ток – 30 мА.

Съемку дифрактограмм проводили в интервале углов 2θ от 10 до 80°; режим сканирования – непрерывный с шагом 0,02 и скоростью сканирования 2 град/мин. Щели Соллера и приемную щель подбирали согласно стандартной конфигурации прибора для обеспечения оптимального соотношения интенсивности и разрешения пиков. Количественный рентгенофлуоресцентный

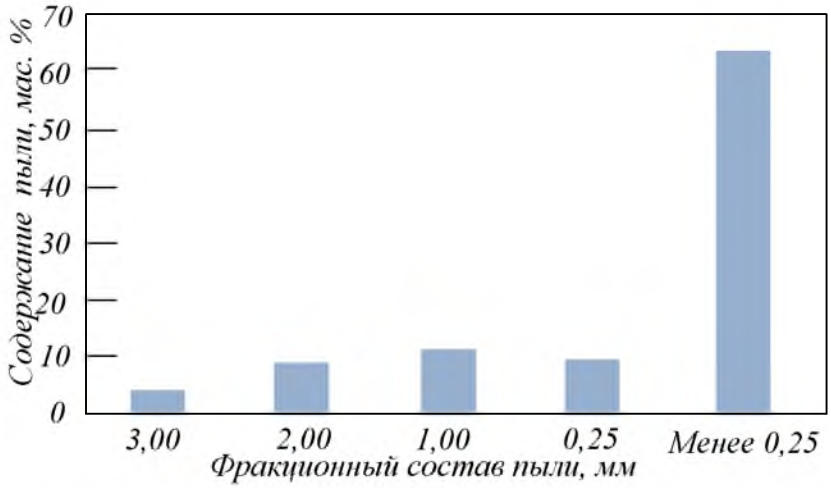


Рис. 2. Гранулометрический состав отвальной пыли электросталеплавильного производства
Fig. 2. Granulometric composition of waste dust from electric steelmaking

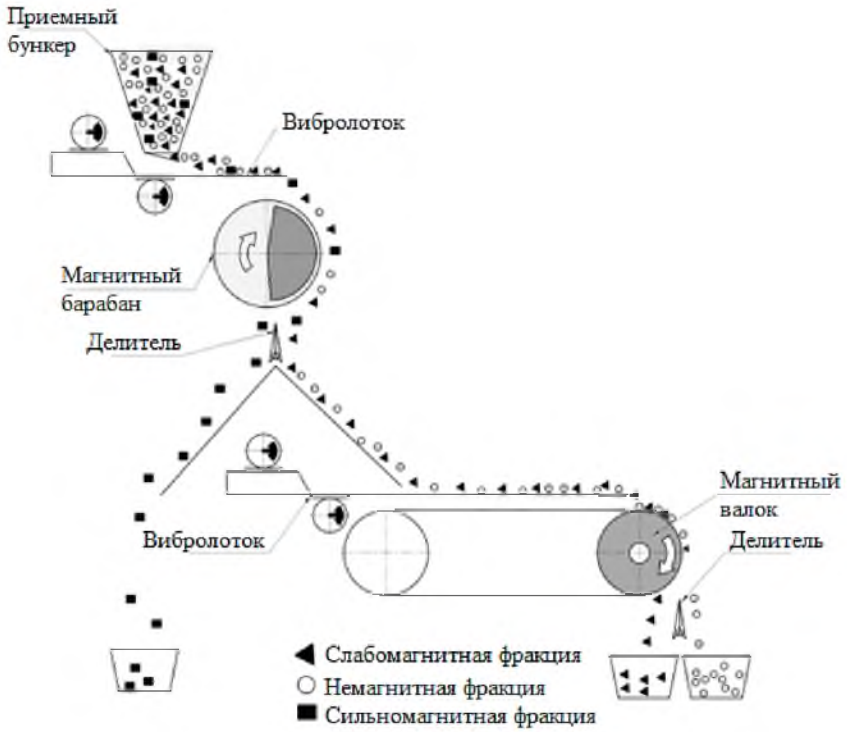


Рис. 3. Схема магнитной сепарации
Fig. 3. Magnetic separation diagram

анализ элементного состава выполняли на волнодисперсионном спектрометре Shimadzu XRF-1800. Для построения градуировочных зависимостей использовали государственные стандартные образцы состава горных пород и руд черных металлов. Предел обнаружения железа и цинка составлял 0,01 мас. %, относительная погрешность определения не превышала 3 %.

Магнитную сепарацию осуществляли на валковом сепараторе с постоянными магнитами ЭРГА БСМ-СМВИ/Т4028 (рис. 3). Индукция магнитного поля в рабочей зоне первого барабана составляла 0,16 Тл при зазоре между валком и подковой 3 мм, а в рабочей зоне второго барабана 1,7 Тл. Экспериментальная работа включала две серии опытов, реализованных по полнофакторному плану [19].

В первой серии варьировали класс крупности питания. Исходную пыль предварительно рассеивали на следующие фракции: более 0,50; 0,50 – 0,25; 0,25 – 0,10; менее 0,1 мм. Масса каждой навески составляла 100 г. Скорость вращения (150 об/мин) магнитного валка поддерживали постоянной. Положение делительного ножа фиксировали в крайнем левом положении, что соответствовало максимальной отсечке слабомагнитных сростков и обеспечивало выделение наиболее сильномагнитной фракции.

Во второй серии исследований оценивали влияние влажности на показатели сепарации. Навески исходной пыли естественного гранулометрического состава (0,005 – 3,000 мм) увлажняли дистиллированной водой до 0, 2, 4, 6, 8 %. Подготовленный материал выдерживали в герметичных контейнерах в течение 30 мин для равномерного распределения влаги, после чего подвергали сепарации в описанном выше режиме.

Результаты и их обсуждение

В настоящей работе исследовали влияние двух ключевых технологических параметров (гранулометрического состава и влажности) на эффективность магнитной сепарации пыли электросталеплавильного производства, а также на фазово-химическое перераспределение компонентов в продуктах обогащения. Интерпретация полученных зависимостей базируется на комплексном применении рентгенофазового, рентгенофлуоресцентного и гранулометрического методов анализа.

Рентгенофазовый анализ исходной отвальной пыли показал, что ее минералогический состав представлен преимущественно оксидными и оксидсодержащими фазами. Доминирующими кристаллическими компонентами являются магнетит (Fe_3O_4), гематит (α-Fe_2O_3), феррит цинка ($ZnFe_2O_4$), кварц (α-SiO_2) и кальцит ($CaCO_3$). Присутствие феррита цинка, обладающего структурой шпинели и слабомагнитными свойствами, принципиально важно, поскольку именно эта фаза является основным носителем цинка и затрудняет прямое пирометаллургическое использование

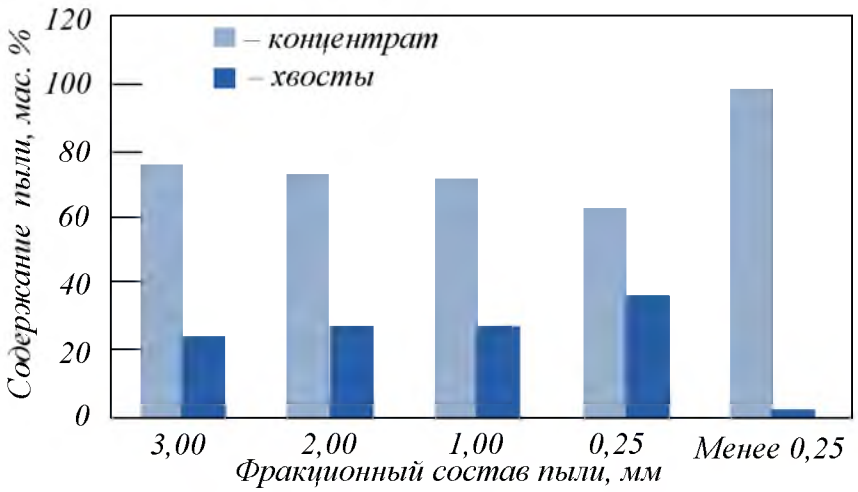


Рис. 4. Изменение степени извлечения материала в концентрат в зависимости от фракционного состава
Fig. 4. Change in the degree of material extraction into concentrate depending on the fractional composition

пыли без предварительного обогащения. Рентгеноаморфная составляющая, фиксируемая в виде диффузного гало в области малых углов 2θ, вероятно, представлена рентгеноаморфными силикатами и техногенным углеродом.

Химический анализ подтвердил данные РФА: массовая доля общего железа в исходной пыли изменялась в пределах 42 – 44 %; содержание цинка составляло 49 – 50 %; оксида кремния – 6 – 8 %; оксида кальция – 7 – 9 %. Столь высокое содержание цинка превышает предельно допустимые концентрации для доменной шихты (норматив более 0,1 – 0,3 % в зависимости от типа передела), что делает обесцинкование обязательным этапом подготовки сырья.

В первой серии экспериментов установлена ярко выраженная селективность разделения в зависимости от крупности частиц. Анализ данных (рис. 4) свидетельствует, что статистически значимое изменение химического состава продуктов обогащения относительно исходного питания наблюдается исключительно для класса крупности менее 0,25 мм. Для фракций более 0,50 и 0,50 – 0,25 мм прирост содержания железа в концентрате не превышал 7 – 9 %, а снижение доли цинка носило флуктуационный характер (в пределах 2 – 4 %), что сопоставимо с погрешностью эксперимента.

Для тонкодисперсной фракции (менее 0,25 мм) получены следующие результаты: массовая доля железа в концентрате увеличилась с 43,184 до 52,900 %, что соответствует относительному приросту 22,5 %; содержание цинка снизилось с 49,813 до 39,200 % (относительное снижение 21,3 %); выход концентрата составил 41,2 % от массы исходного питания рассматриваемой фракции.

Наблюдаемый эффект объясняется характером вкрапленности минеральных фаз. Феррит цинка и силикаты образуют, как правило, тонкие сростки с магнетитом или находятся в виде самостоятельных включений размером 10 – 50 мкм. При крупности питания более 0,25 мм значительная часть сростков не раскрыта, вследствие чего слабомагнитный феррит цинка механически увлекается в магнитный продукт или, напротив, магнетит теряется с хвостами. Только при измельчении до класса менее 0,25 мм достигается степень раскрытия зерен, достаточная для эффективной магнитной дифференциации.

Вторая серия экспериментов выявила немонотонный характер зависимости показателей сепарации от влажности. Во всем исследованном диапазоне (0 – 8 %) оптимальной является влажность 2 %. При увеличении влажности до 2 % относительно абсолютно сухого состояния зафиксировано следующее: повышение содержания железа в концентрате с 43 до 56 % (+30,2 %); снижение содержания цинка с 49,80 до 37,87 % (–24 %).

Дальнейшее увлажнение материала (4 – 8 %) приводило к монотонному ухудшению показателей: падению массовой доли железа в концентрате и росту содержания цинка, а также снижению выхода концентрата на 1 – 5 % относительно оптимального режима (рис. 5).

Выявленная закономерность имеет физико-химическое обоснование. При малом (до 2 %) увлажнении происходит адсорбционное взаимодействие воды с поверхностью частиц, что приводит к нейтрализации избыточных электростатических зарядов. Пыль электросталеплавильного производства характеризуется высокой дисперсностью и, как следствие, склонна к агрегации под действием сил Ван-дер-Ваальса и кулоновского взаимодействия. Частичная агрегация сухой пыли снижает эффективность разделения, так как магнитные частицы «захватывают» в конгломераты немагнитные компоненты. Введение

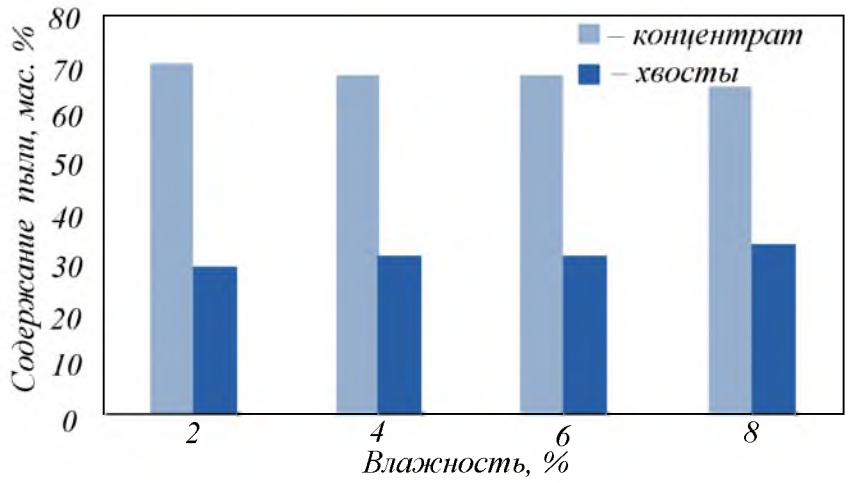


Рис. 5. Изменение степени извлечения материала в концентрат в зависимости от влажности
Fig. 5. Change in the degree of material extraction into concentrate depending on humidity

2 % воды снимает электростатику, но еще не формирует капиллярных мостиков, удерживающих частицы. Превышение порога в 3 – 4 % сопровождается образованием пленочной и капиллярной влаги, что вызывает слипание частиц и резкое падение сыпучести, а следовательно, и качества сепарации.

Рентгенофазовый анализ продуктов обогащения, полученных при оптимальных параметрах (фракция более 0,25 мм; влажность 2 %), позволил верифицировать механизм разделения. На дифрактограмме концентрата (рис. 6) доминируют рефлексы магнетита и гематита. Интенсивность пиков, соответствующих ферриту цинка, снижена в 2,3 – 2,7 раза по сравнению с исходной пылью.

В слабомагнитной фракции (хвосты *I*) зафиксировано максимальное относительное содержание $ZnFe_2O_4$: интенсивность его основных рефлексов в 3,1 раза превышает таковую в исходной пробе. Помимо феррита цинка слабомагнитные хвосты содержат остаточный магнетит (в тонких сростках, не раскрытых при рассматриваемой крупности), а также кальцит и незначительное количество кварца.

Немагнитная фракция (хвосты *II*) представлена преимущественно кварц-кальцитовой ассоциацией с примесью оксида цинка. Содержание железа не превышает 12 – 14 мас. %, цинка – около 10 – 15 мас. %. Утилизация рассматриваемого продукта возможна в качестве сырья для цинкового производства (вельцевание) или как инертный наполнитель после дополнительного обогащения.

Таким образом, рентгеноструктурные данные однозначно подтверждают принципиальную возможность селективного разделения оксидов железа и феррита цинка на рассматриваемом типе оборудования. Важно подчеркнуть, что цинк не переходит в магнитный продукт в виде самостоятельной фазы; его остаточное (38 %) содержание в концентрате обусловлено исключительно механическим захватом тонкодисперсных частиц $ZnFe_2O_4$ и наличием нераскрытых сростков (рис. 7).

Сопоставление полученных данных с результатами других исследователей [20; 21] позволяет утверждать, что эффективность магнитного обогащения пыли электросталеплавильного производства определяется комбинацией двух факторов: степенью раскрытия минеральных сростков и агрегатным состоянием поверхности частиц. Достигнутые в настоящей работе показатели (повышение содержания железа до 56 %; снижение цинка до 38 %) соответствуют лучшим мировым практикам для аналогичного сырья и превышают результаты применения традиционных схем сухой магнитной сепарации без предварительной подготовки.

Принципиально важным представляется тот факт, что продуктами переработки являются два коммерчески ценных продукта:

1. Железосодержащий концентрат (52 – 56 % Fe) с высоким содержанием цинка. Рассматриваемый продукт не может быть напрямую направлен в доменную плавку, однако он является идеальным сырьем для пирометаллургического передела в печах кипящего слоя или для переработки по технологии прямого восстановления железа с одновременным извлечением цинка в возгоны.

2. Слабомагнитный цинксодержащий продукт (40 – 50 % Zn; 15 – 20 % Fe). Рассматриваемый продукт является готовым сырьем для вельцевания – процесса, широко применяемого для извлечения цинка из пылей и шламов.

Разделение потоков позволяет дозировать концентрат и цинксодержащие хвосты в шихтовые материалы с различной экономической и

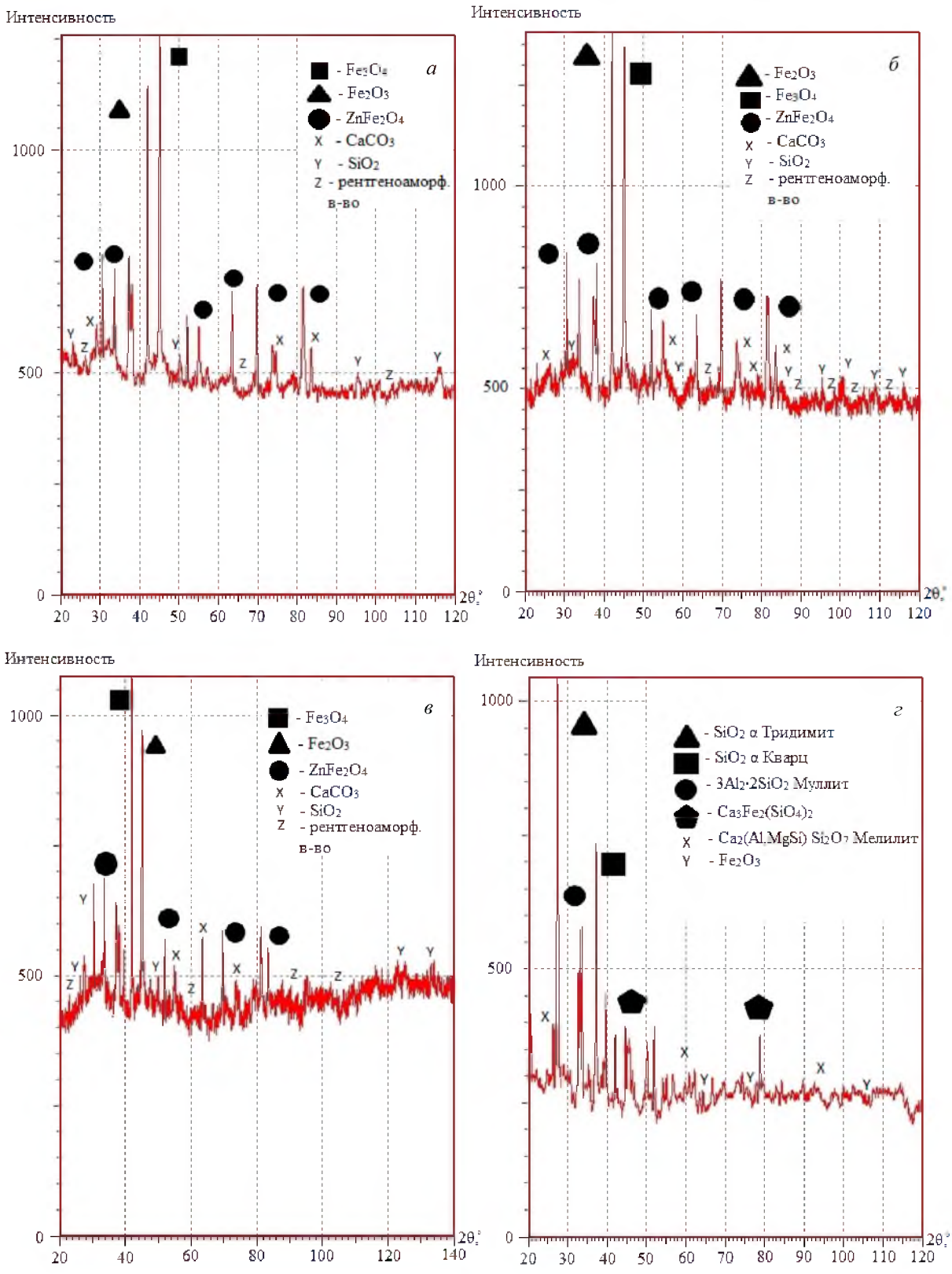


Рис. 6. Дифрактограммы продуктов магнитной сепарации:
а – пыль ЭСПГ; *б* – концентрат; *в* и *г* – слабомагнитные и немагнитные хвосты
Fig. 6. Diffraction pattern of magnetic separation products
а – EEP dust; *б* – concentrate; *в* and *г* – weakly magnetic and non-magnetic tails

технологической оценкой. Концентрат, содержащий значительное количество цинка, требует обязательной дезинтеграции; цинксодержащие хвосты могут направляться на специализированные установки с улавливанием возгонов оксидов ZnO.

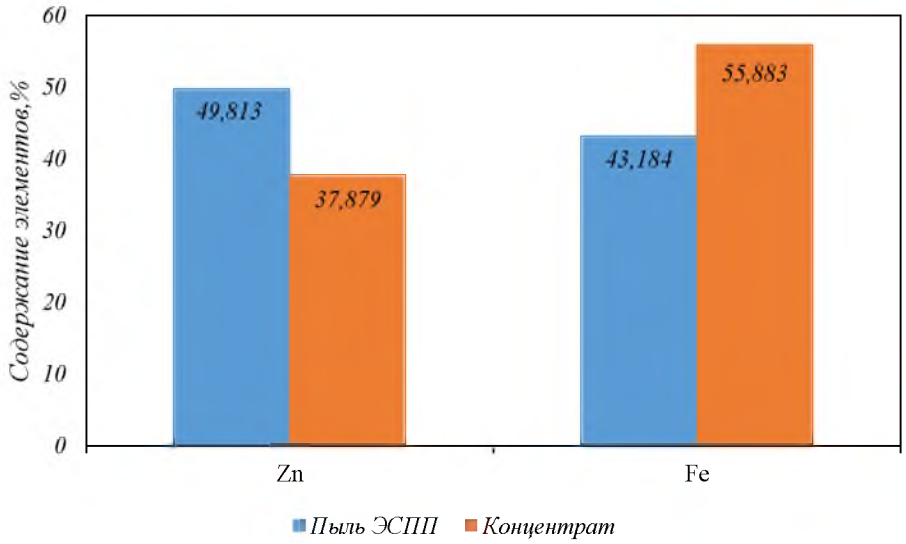


Рис. 7. Изменение химического состава пыли электросталеплавильного производства до магнитной сепарации и после
Fig. 7. Changes in the chemical composition of electric steelmaking dust before and after magnetic separation

Дальнейшие исследования целесообразно направить на изучение кинетики раскрытия сростков при дополнительном измельчении концентрата до крупности менее 0,1 мм, а также на поиск реагентных режимов, предотвращающих обратное налипание тонких классов в процессе сухой сепарации. Кроме того, представляет практический интерес оценка возможности комбинирования магнитной сепарации с флотационным обогащением хвостов для извлечения оставшегося цинка и получения более чистых продуктов.

Выводы

При использовании пыли электросталеплавильного производства фракцией менее 0,25 мм можно достичь максимально эффективного результата при магнитной сепарации как по выходу концентрата, так и по его качеству. Влажность пыли электросталеплавильного производства влияет на показатели магнитной сепарации, при ее возрастании снижается массовый выход концентрата, а при ее минимальных значениях повышается содержание железа в концентрате.

Проведении магнитной сепарации пыли электросталеплавильного производства с влажностью 2 % и фракцией менее 0,25 мм позволяет получать концентрат с повышенным содержанием железа и пониженным содержанием цинка. Дифрактограмма продуктов магнитной сепарации показывает, что в слабомагнитных хвостах преобладает содержание феррита цинка и снижается содержание оксидов железа. Немагнитные хвосты представлены силикатными соединениями.

Магнитная сепарация пыли электросталеплавильного производства позволяет получать концентрат и слабомагнитные хвосты сепарации, которые необходимы для дальнейшей пирометаллургической переработки. Концентрат отличается повышенным содержанием железа, а слабомагнитные хвосты повышенным содержанием цинка. В зависимости от химического состава эти продукты в дальнейшем будут подвергаться пирометаллургической переработке с различной долей дозирования в шихтовые материалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко С.А., Сафонов С.О., Шевченко А.А., Казанков С.А., Лопатина А.О. Разработка технологий термического обогащения пыли газоочистки электросталеплавильного производства. В кн.: *Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации». Материалы XII Инновационного конвента*. 2024:386–389.
2. Ibraev I.K., Bludova D.L., Ibraeva O.T., Mamyanchikov S.V. Energy-saving technology for processing high-moisture iron-containing sludge. *Ferrous Metallurgy Bulletin of Scientific Technical and Economic Information*. 2022;78(4):345–351. *https://doi.org/10.32339/0135-5910-2022-4-345-351*.
3. Abdel-Khalek N.A., Selim K.A., Yassin K.E., Hamdy A., Heikal M.A. Upgrading of low grade Egyptian kaolin ore using magnetic separation. *Journal of Basic and Environmental Sciences*. 2017;4(3):247–252.
4. Ciesla A. Practical aspects of high gradient magnetic separation using superconducting magnets. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2003;37:169–181.

5. Cinar M., Durgut E. Mineral beneficiation of nepheline syenite with combination of dry magnetic separation and flotation methods. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2019; 55(5):1227–1238.
6. Jenkins R., Snyder R.L. *Introduction to X-Ray Powder Diffractometry*. New York: Wiley-Interscience. 1996:403.
7. Rachappa S., Prakash Y. Iron ore recovery from low grade by using advance methods. *Procedia Earth Planetary Science*. 2015;11:195–197.
8. Roy S., Das A. Nature of low-grade Indian iron ores and the prospects of their enrichment through gravity separation. *Mining, Metallurgy &Exploration*. 2009;26:141–150.
9. Nanda D., Mandre N. Studies on Characterization and Beneficiation of Typical Low-Grade Goethitic Iron Ore Jharkhand, India. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2018;71:2985–2992.
10. Dash N., Rath S. S., Angadi S. I. Thermally assisted magnetic separation and characterization studies of a low-grade hematite ore. *Powder Technology*. 2019;346:70–77.
11. Zhu X., Han Yu., Liu H., Li Ya. Magnetite oxidation mechanism of the air-cooling stage for limonite ore magnetization roasting. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2022;45(2):85–90. *https//doi.org/10.1080/08827508.2022.2121920*
12. Wu Y. Rapid and direct magnetization of goethite ore roasted by biomass fuel. *Separation and Purification Technology*. 2012;94:34–38.
13. Шибаева Д.Н., Компанченко А.А. Оценка обогатимости железных руд яковлевского месторождения курской магнитной аномалии методами крупнокусковой сепарации. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023;6:117–129. *https//doi.org/10.15372/FTPRPI20230611*
14. Целюк Д.И., Жукова В.Е., Ожогина Е.Г., Якушина О.А., Целюк И.Н. Минералого-технологические особенности хвостов мокрой магнитной сепарации железных руд и перспективы извлечения из них железа. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2013;6(4):412–424.
15. Кусков В.Б., Львов В.В. Обогащение и переработка железных руд различного генезиса. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018;S56:44–53.
16. Абдыкирова Г.Ж., Сыдыков А.Е., Тойланбай Г.А., Шажалиев М.Т. Определение возможности получения марганцевого и железного концентратов из техногенного сырья. В кн.: *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Материалы XX Международной научно-технической конференции*. 2015:94–95.
17. Лавриненко А.А., Лусинян О.Г., Кузнецова И.Н., Оленников В.Г. Получение медного концентрата при обогащении железных руд. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2023;29(1):5–15. *https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-5-15*
18. Швалёв Ю.Б., Ежов А.М. Электромагнитная сепарация железной руды Бакчарского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017;6:362–369.
19. Левицкий И.А., Павлюкевич Ю.Г., Папко Л.Ф., Баранцева С.Е., Климош Ю.А. Утилизация отходов обогащения железных руд. В кн.: *Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления. Материалы международной научно-технической конференции. Белорусский государственный технологический университет*. 2004:280–283.
20. Осипова Н.В., Самойлова В.Т. Модель системы регулирования содержания железа в концентрате процесса магнитной сепарации руды. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017;9:139–143. *https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-9-0-139-143*

REFERENCES

1. Shevchenko S.A., Safonov S.O., Shevchenko A.A., Kazankov S.A., Lopatina A.O. Development of technologies for thermal enrichment of dust from gas cleaning in electric steelmaking. In: *Innovative Convention «Kuzbass: Education, Science, Innovation». Proceedings of the 12th Innovative Convention*. 2024:386–389. (In Russ.).
2. Ibraev I.K., Bludova D.L., Ibraeva O.T., Mamyanchikov S.V. Energysaving technology for processing high-moisture iron-containing sludge. *Ferrous Metallurgy Bulletin of Scientific Technical and Economic Information*. 2022;78(4):345–351. *https://doi.org/10.32339/0135-5910-2022-4-345-351*
3. Abdel-Khalek N.A., Selim K.A., Yassin K.E., Hamdy A., Heikal M.A. Upgrading of low grade Egyptian kaolin ore using magnetic separation. *Journal of Basic and Environmental Sciences*. 2017;4(3):247–252.
4. Ciesla A. Practical aspects of high gradient magnetic separation using superconducting magnets. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2003;37:169–181.
5. Cinar M., Durgut E. Mineral beneficiation of nepheline syenite with combination of dry magnetic separation and flotation methods. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2019;55(5):1227–1238.
6. Jenkins R., Snyder R.L. *Introduction to X-Ray Powder Diffractometry*. New York: Wiley-Interscience. 1996:403.
7. Rachappa S., Prakash Y. Iron ore recovery from low grade by using advance methods. *Procedia Earth Planetary Science*. 2015;11:195–197.

8. Roy S., Das A. Nature of low-grade Indian iron ores and the prospects of their enrichment through gravity separation. *Mining, Metallurgy &Exploration*. 2009;26:141–150.
9. Nanda D., Mandre N. Studies on Characterization and Beneficiation of Typical Low-Grade Goethitic Iron Ore Jharkhand, India. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2018;71:2985–2992.
10. Dash N., Rath S. S., Angadi S. I. Thermally assisted magnetic separation and characterization studies of a low-grade hematite ore. *Powder Technology*. 2019;346:70–77.
11. Zhu X., Han Yu., Liu H., Li Ya. Magnetite oxidation mechanism of the air-cooling stage for limonite ore magnetization roasting. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2022;45(2):85–90. *https//doi.org/10.1080/08827508.2022.2121920*
12. Wu Y. Rapid and direct magnetization of goethite ore roasted by biomass fuel. *Separation and Purification Technology*. 2012;94:34–38.
13. Shibaeva D.N., Kompanchenko A.A. Evaluation of the enrichment capacity of iron ores from the Yakovlevskoye deposit of the Kursk magnetic anomaly using large-piece separation methods. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2023;6:117–129. (In Russ.). *https//doi.org/10.15372/FTPRPI20230611*
14. Tselyuk D.I., Zhukova V.E., Ozhogina E.G., Yakushina O.A., Tselyuk I.N. Mineralogical and technological features of tailings from wet magnetic separation of iron ores and prospects for extracting iron from them. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2013;6(4):412–424. (In Russ.).
15. Kuskov V.B., L'vov V.V. Enrichment and processing of iron ores of various origins. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2018;S56:44–53. (In Russ.).
16. Abdykirova G.ZH., Sydykov A.E., Toilanbai G.A., Shazhaliev M.T. Determining the possibility of obtaining manganese and iron concentrates from man-made raw materials. In: *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya. Materialy XX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. 2015:94–95. (In Russ.).
17. Lavrinenko A.A., Lusinyan O.G., Kuznetsova I.N., Olennikov V.G. Obtaining copper concentrate during beneficiation of iron ores. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya*. 2023; 29(1):5–15. (In Russ.). *https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-1-5-15*
18. Shvalev Yu.B., Ezhov A.M. Electromagnetic separation of iron ore from the Bakchar deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2017;6:362–369. (In Russ.).
19. Levitskii I.A., Pavlyukevich Yu.G., Papko L.F., Barantseva S.E., Klimosh Yu.A. Recycling of iron ore beneficiation waste. In: *Novye tekhnologii retsiklinga otkhodov proizvodstva i potrebleniya. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Belorusskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet*. 2004:280–283. (In Russ.).
20. Osipova N.V., Samoilova V.T. Model of a system for regulating the iron content in concentrate during magnetic separation of ore. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2017;9:139–143. (In Russ.). *https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-9-0-139-143*

Сведения об авторах:

Сергей Олегович Сафонов, *старший преподаватель кафедры теплоэнергетики и экологии,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: sergey.safonov.1950@mail.ru
ORCID: 0009-0005-3479-7761
SPIN-код: 1111-5697

Сергей Владимирович Фейлер, *к.т.н., доцент, заведующий кафедрой металлургии черных металлов и химической технологии,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: feiler_sv@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-8615-5411
SPIN-код: 5452-0396

Information about the authors:

Sergei O. Safonov, *Senior Lecturer of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology,* Siberian State Industrial University
E-mail: sergey.safonov.1950@mail.ru
ORCID: 0009-0005-3479-7761
SPIN-код: 1111-5697

Sergei V. Feiler, *Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering,* Siberian State Industrial University
E-mail: feiler_sv@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-8615-5411
SPIN-код: 5452-0396

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

Поступила в редакцию 26.11.2025
После доработки 17.12.2025
Принята к публикации 12.02.2026

Received 26.11.2025
Revised 17.12.2025
Accepted 12.02.2026

Оригинальная статья

УДК 621.762.2:669.295:538.911:538.951:621.521

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-47-58

УПРАВЛЕНИЕ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

© 2026 г. К. С. Осипович, А. В. Чумаевский, Ю. В. Кушнарев, А. О. Панфилов, Е. А. Колубаев

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

Аннотация. Формирование образцов на основе титанового сплава ВТ6 методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии сопряжено с образованием крупнозернистой столбчатой структуры, состоящей из первичной β-фазы. Этому сопутствует быстрое затвердевание и высокий температурный градиент. Для предотвращения образования крупных столбчатых зерен в образцах на основе сплава ВТ6 был предложен и реализован метод ультразвукового воздействия в проволочной электронно-лучевого аддитивной 3D-печати. Проведен комплексный анализ результатов получения образцов на основе титанового сплава ВТ6 для определения наиболее оптимального подхода с точки зрения бездефектности и достижения подходящей структуры. Влияние ультразвукового воздействия и погонной энергии на зеренную структуру изучали с помощью металлографических исследований. Проведена оценка размеров структурных характеристик в образцах с ультразвуковым воздействием и без него. Структура образцов на основе титанового сплава ВТ6 характеризуется двухфазным состоянием: плотноупакованной гексагональной α-фазы и объемно-центрированной кубической β-фазы. Наиболее выраженный эффект воздействия наблюдался в уменьшении ширины первичных β-зерен и снижение их среднего размера с 5,2 до 3,1 мм, в то время как длина зерен существенно не изменилась. Ключевым фактором, влияющим на зеренную структуру, является эффект акустической кавитации, возникающий в ванне расплава под ультразвуковым воздействием. По сравнению с образцами без ультразвукового воздействия предел прочности при растяжении, предел текучести и относительное удлинение в образцах на основе титанового сплава ВТ6, напечатанного при подводе к подложке ультразвукового преобразователя, увеличились на 50, 20 МПа и 4 %. Выявлено, что образцы без ультразвукового воздействия, ориентированные горизонтально относительно выращивания, показывают характеристики механических свойств выше, чем образцы с ультразвуковым воздействием, ориентированные вертикально относительно выращивания. Дальнейшее развитие изученной технологии ультразвукового воздействия может позволить настраивать микроструктуру и текстурные характеристики объемных деталей, полученных методом аддитивного производства.

Ключевые слова: проволочная электронно-лучевая аддитивная технология, ультразвуковое воздействие, погонная энергия, сплав ВТ6, зеренная структура, эпитаксиальный рост

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-20142 (https://rscf.ru/project/25-19-20142/) и гранта в форме субсидии, выделяемого Департаментом по научно-технологическому развитию и инновационной деятельности Томской области (соглашение № 02/5/2025).

Для цитирования: Осипович К.С., Чумаевский А.В., Кушнарев Ю.В., Панфилов А.О., Колубаев Е.А. Управление зеренной структурой титановых сплавов, получаемых методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии при использовании ультразвукового воздействия. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):47–58. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-47-58*

Original article

GRAIN STRUCTURE CONTROL OF TITANIUM ALLOYS PRODUCED BY WIRE-FEED ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING USING ULTRASONIC INDUCTION

© 2026 K. S. Osipovich, A. V. Chumaevskii, Yu. V. Kushnarev, A. O. Panfilov, E. A. Kolubaev

Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4 Akademichesky ave., Tomsk, 634055, Russian Federation)

Abstract. The formation of samples based on Ti – 6Al – 4V titanium alloy by wire-feed electron beam additive manufacturing is associated with the formation of a coarse-grained columnar structure consisting of a primary β-phase. This is accompanied by rapid solidification and a high temperature gradient. To prevent the formation of large columnar grains in samples based on Ti – 6Al – 4V alloy, a method of ultrasonic treatment in wire-feed electron beam additive 3D printing was proposed and implemented. A comprehensive analysis of the results of obtaining samples based on Ti – 6Al – 4V titanium alloy was carried out to determine the most optimal approach in terms of defect-free performance and achieving a suitable structure. The effect of ultrasonic treatment and linear energy on the grain structure was studied using metallographic studies. The size of the structural characteristics in the samples with and without ultrasound has been evaluated. The structure of the samples based on Ti – 6Al – 4V titanium alloy is characterized by a two-phase state: a tightly packed hexagonal α-phase and a volume-centered cubic β-phase. It was noticed that large primary β-grains became narrower, and the average grain size decreased from 5.2 to 3.1 mm, the effect on grain length was insignificant. The key factor affecting the grain structure is the acoustic cavitation effect that occurs in the melt bath under ultrasonic action. Compared with samples without ultrasonic treatment, the tensile strength, yield strength and elongation in samples based on Ti – 6Al – 4V titanium alloy printed when an ultrasonic transducer was applied to the substrate increased by 50, 20 MPa and 4 %. It was revealed that samples without ultrasonic treatment, oriented horizontally relative to cultivation, show higher mechanical properties characteristics than samples with ultrasonic treatment, oriented vertically relative to cultivation. Further development of the studied ultrasonic treatment technology may make it possible to adjust the microstructure and textural characteristics of volumetric parts obtained by additive manufacturing.

Keywords: wire-feed electron beam additive manufacturing, ultrasonic treatment, linear energy, Ti – 6Al – 4V, grain structure, epitaxial growth

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation (Project no. 25-19-20142; https://rscf.ru/project/25-19-20142/) and a subsidy grant provided by the Department of Scientific, Technological Development and Innovation of Tomsk Region (Agreement no. 02/5/2025).

For citation: Osipovich K.S., Chumaevskii A.V., Kushnarev Yu.V., Panfilov A.O., Kolubaev E.A. Grain structure control of titanium alloys produced by wire-feed electron beam additive technology using ultrasonic irradiation. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):47–58. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-47-58*

Введение

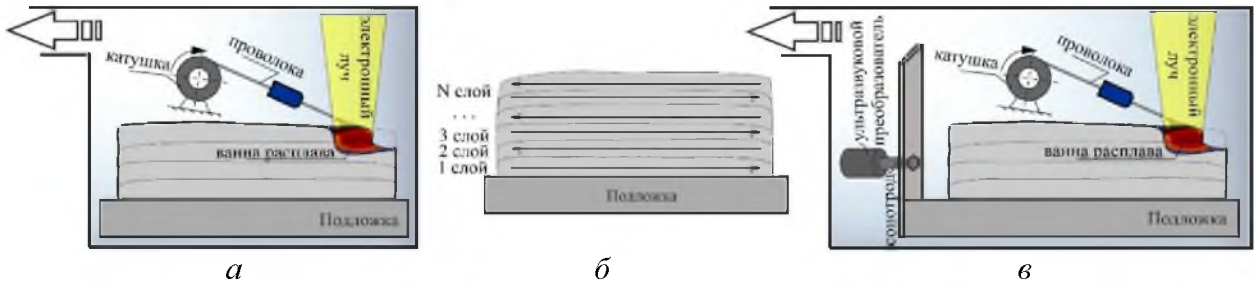
Титановые сплавы высоко ценятся за свои выдающиеся механические и эксплуатационные свойства, в том числе исключительную удельную прочность, пластичность, устойчивость к коррозии и превосходную биосовместимость. Эти качества делают их незаменимыми во многих областях (аэрокосмическая промышленность, биомедицинская инженерия и судостроение) [1]. В нефтегазовой отрасли все чаще используются титановые сплавы, способные выдерживать сложные условия глубоководных и сверхглубоководных месторождений, характеризующиеся экстремальным давлением, высокими температурами и агрессивными средами [2]. Наиболее актуальными сплавами являются двухфазные (α + β), которые характеризуется определенным составом легирующих элементов: α-стабилизатор (Al) и β-стабилизатор (V). Сплав ВТ6 широко применяется в аэрокосмической промышленности, в частности, для изготовления таких конструктивных элементов как балки каркаса самолета, лопатки компрессора и турбины, элементы шасси [3]. Это обусловлено его превосходной устойчивостью к высоким температурам, исключительной стойкостью к ползучести, высокой коррозионной стойкостью и хорошими сварочными характеристиками [4]. Традиционные методы производства сплава

Ti – 6Al – 4V, включая литье, ковку и прокатку, как правило, требуют высоких температур или значительного давления, что впоследствии приводит к необходимости механической обработки для достижения желаемой геометрии детали [5]. При применении традиционных методов производства (плавка и формовка) изделий из титановых сплавов сталкиваются с принципиальными ограничениями. Высокая химическая активность металла, его низкая теплопроводность и пластичность при комнатной температуре создают неблагоприятные условия для формирования бездефектной структуры, что выражается в появлении усадочных раковин и трещин. Следовательно, получаемые в результате компоненты часто имеют пониженный модуль упругости и недостаточную жесткость, что требует дополнительной обработки, которая неизбежно приводит к значительным потерям материала и увеличению производственных затрат [6].

Преимущества аддитивных технологий вызвали значительный интерес при изготовлении деталей на основе титанового сплава Ti – 6Al – 4V [7; 8]. Аддитивные технологии (3D-печать) представляют собой метод производства, при котором используются материалы для создания объекта из слоев [8]. Однако высокая скорость нагрева и охлаждения, связанная с повышенными значениями погонной энергии, приводит к значительным температурным градиентам. Такие условия часто приводят к образованию столбчатых зерен и высоких внутренних напряжений, что существенно влияет на механические свойства деталей [9 – 12]. Преимущественный рост дендритов, повторяющий геометрию ванны расплава, также создает сильную кристаллографическую текстуру, параллельную направлению построения [13]. Эти столбчатые, ориентированные в определенном направлении зерна вызывают механическую анизотропию, которая вносит неопределенность в эксплуатационные характеристики деталей, полученных методом аддитивного производства [14]. Для решения проблемы столбчатых кристаллов в сплаве Ti – 6Al – 4V и улучшения механических свойств его компонентов было предложено множество методов улучшения микроструктуры и механических характеристик рассматриваемого материала, а также других металлов, полученных с помощью аддитивных технологий. Эти методы включают в себя модификацию стратегий печати [15; 16], применение методов постобработки [17], использование металлургических методов с добавлением зародышеобразующих веществ [18; 19], а также воздействие внешних энергетических полей [20 – 23].

Ультразвуковое воздействие во время затвердевания – это альтернативный метод модификации микроструктуры, который не требует изменения состава исходного материала. УФ-технология широко применяется при сварке [23; 24] и литье [2; 26] металлических материалов. Кроме того, за последние два десятилетия эта методология стала применяться в области аддитивных технологий [27 – 30]. Результаты показывают, что воздействие высокоинтенсивного ультразвука увеличивает скорость зарождения кристаллов и способствует образованию мелких изометрических кристаллов, что приводит к значительному улучшению механических свойств по сравнению с образцами без УФ-облучения. В некоторых исследованиях ультразвуковые волны подавали в ванну расплава через подложку [30 – 32], то есть ультразвуковые волны воздействовали непосредственно на жидкую ванну расплава. УФ-излучение играет ключевую роль в затвердевании расплава из-за эффектов ультразвуковой кавитации и акустического потока [33; 34]. Основной механизм, с помощью которого кавитация вызывает модификацию микроструктуры, заключается в росте и имплозивном схлопывании изначально небольшой полости в ванне расплава, которая испускает интенсивные ударные волны с высокими температурами и давлением [35]. Эти ударные волны могут разрушать растущие вершины дендритов и служить новыми точками зарождения для равноосного роста. Кроме того, давление может вызывать локальное переохлаждение в ванне расплава, что способствует гетерогенному зарождению. Акустическое течение, при котором профиль потока в ванне расплава изменяется из-за поглощения акустической энергии, может изменять микроструктуру за счет уменьшения локальных температурных градиентов, распределения частиц зарождения по всей ванне расплава и переплавления дендритов, которые затем отламываются и служат новыми частицами зарождения [35].

Электронно-лучевое аддитивное производство с проволочной подачей (ЭЛАП) – одна из наиболее перспективных технологий, направленных на изготовление промышленных крупногабаритных заготовок, которые не являются сложными или хрупкими [36]. Хотя большинство методов введения ультразвуковых волн в расплавленную ванну через подложку более применимы к порошковым материалам, исследований в области аддитивного производства с использованием металлической проволоки крайне мало. Целью настоящей работы является выявлении влияния ультразвукового воздействия при проволочной



а *б* *в*

Рис. 1. Схема процесса печати методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии без ультразвукового воздействия (образцы ЭЛАП) (*а*), стратегия сканирования (*б*) и порядка подведения ультразвукового преобразователя к подложке (образцы ЭЛАП + у/з) (*в*)

Fig. 1. Schematic diagram of the printing process using wire-feed electron beam additive technology without ultrasonic treatment (EBAM samples) (*а*), scanning strategy (*б*) and the order of bringing the ultrasonic transducer to the substrate (EBAM+UT samples) (*в*)

электронно-лучевой 3D-печати титановыми сплавами на зеренную структуру.

Материалы и методы исследования

3D-печать экспериментальных образцов на основе титанового сплава ВТ6 методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии осуществляли на лабораторной экспериментальной установке Института физики прочности и материаловедения СО РАН. Процесс 3D-печати происходит с помощью электронного луча, генерируемого электронной пушкой через магнитную фокусирующую систему, которая формирует развертку в форме «спираль от центра» диаметром 4 мм на поверхности в области печати, образуя ванну расплава. Проволока диаметром 1,6 мм подается через податчик филамента, в результате на подложке формируется образец, состоящий из послойно нанесенного материала (рис. 1, *а*). Стратегия сканирования заключалась в прямом и обратном проходе вдоль направления нанесения материала оси *OX* (рис. 1, *б*). Точка подвода ультразвукового воздействия была локализована на подложке, в качестве которой использовали пластинку титанового сплава ВТ1-0 толщиной 2 мм (рис. 1, *в*).

С применением такого подхода и технологических параметров (табл. 1) были получены вертикальные стенки с ультразвуковым воздействием и без него.

Для визуализации качества выращенных титановых образцов использовали цифровую камеру Pentax K-3 с фокусным расстоянием объектива 100 мм. Образцы размером 30 × 30 мм для структурных исследований вырезали с помощью электроэрозионного станка DK7750 в продольном сечении относительно наплавления слоя (рис. 2). Перед структурными исследованиями проводили шлифовку образцов и полировку алмазной пастой с последующим травлением поверхностей образцов в растворе 12 мл HF + 2 мл HNO_3 + 6 мл HCl + 100 мл H_2O. Микроструктурный анализ выполняли на металлографическом микроскопе Альтами МЕТ-1С. Для оценки прочностных характеристик были испытаны на растяжение образцы в форме двойных лопаток с линейными размерами рабочей части 2,5 × 2,1 × 12,0 мм двух типов: вертикальные и горизонтальные. Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине УТС 110М-100 1-У со скоростью 1 мм/мин при комнатной температуре методом одноосного статического растяжения.

Таблица 1

Технологические параметры процесса 3D-печати экспериментальных образцов на основе титанового сплава ВТ6

Table 1. **Technological parameters of the 3D printing process of experimental samples based on titanium alloy Ti – 6Al – 4V**

Образец	Ускоряющее напряжение, кВ	Ток печати, мА	Тип развертки	Скорость печати, мм/мин	Скорость подачи проволоки, мм/мин	Частота, кГц	Мощность, Вт	Ток, мА
ЭЛАП	30	60	спираль, диаметр 4,0 мм	300	1200	–	–	–
ЭЛАП + у/з		70		400	1400	22,6	620	9

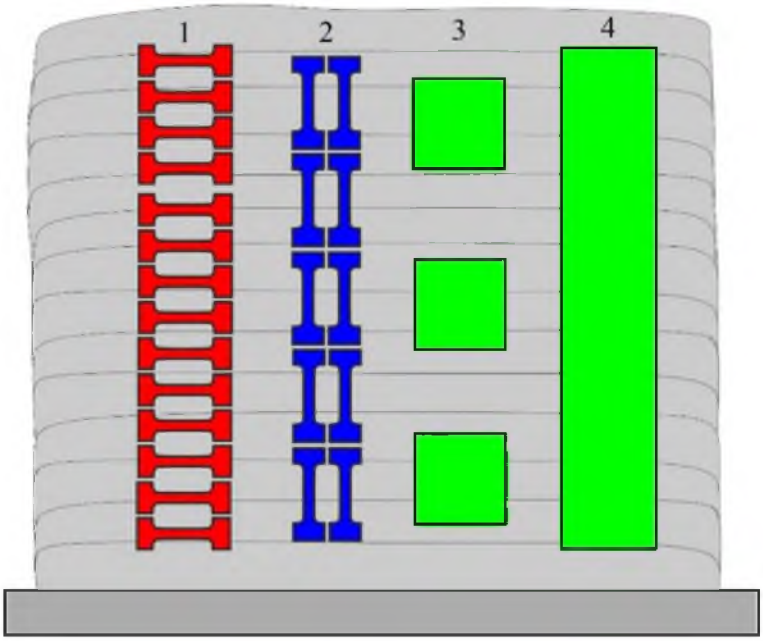


Рис. 2. Схема резки образцов из выращенной вертикальной стенки, изготовленной методом электронно-лучевой проволочной 3D-печати:
1 и *2* – образцы для механических испытаний, ориентированные горизонтально и вертикально относительно выращивания;
3, *4* – образцы для металлографических исследований
Fig. 2. Scheme of cutting samples from a vertical wall manufactured by wire-feed electron beam 3D printing:
1 and *2* – samples for mechanical testing, oriented horizontally and vertically relative to growth;
3, *4* – samples for metallographic studies

Результаты и их обсуждение

Для титановых образцов характерно отсутствие крупных макродефектов (трещины и несплавления), кроме локальных краевых искажений поверхности. Боковая поверхность стенки при печати методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии имеет плоскую поверхность (рис. 3). Однако использование одного источника ультразвука в качестве метода обработки не приводит к полному превращению столбчатых зерен в равноосные.

Структура сильно варьируется по высоте в зависимости от количества нанесенных слоев. Структура характеризуется крупными, вытянутыми в направлении выращивания зернами, проходящими через большое количество слоев нанесенного материала. Средняя длина зерен в образцах без и с ультразвуковым воздействием составляет 5,2 и 8,5 мм. Средняя толщина зерен в образцах без и с ультразвуковым воздействием составляет 3,1 и 7,2 мм. Несмотря на то, что процесс роста

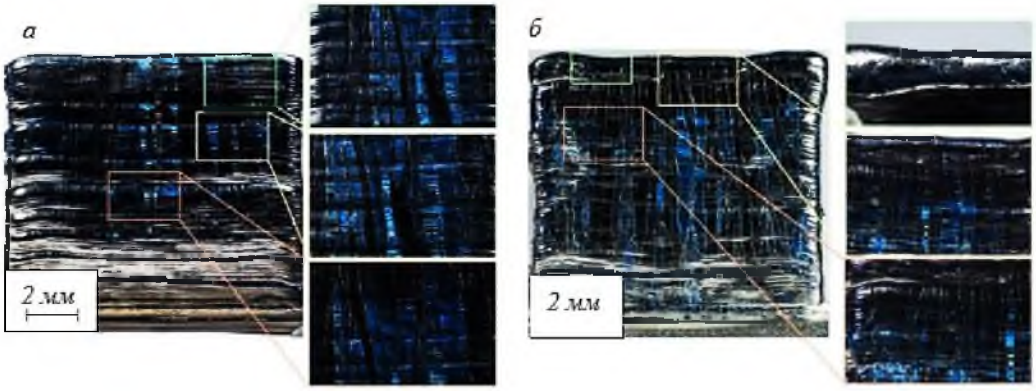


Рис. 3. Внешний вид вертикальных стенок на основе титанового сплава ВТ6, изготовленных методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии без (образцы ЭЛАП) (*а*) и с подводом ультразвукового преобразователя к подложке (образцы ЭЛАП + у/з) (*б*)
Fig. 3. External appearance of vertical walls based on Ti – 6Al – 4V titanium alloy, manufactured using wire-feed electron beam additive technology without ultrasonic treatment (EBAM samples) (*a*) and with the supply of an ultrasonic transducer to the substrate (EBAM + UT samples) (*б*)

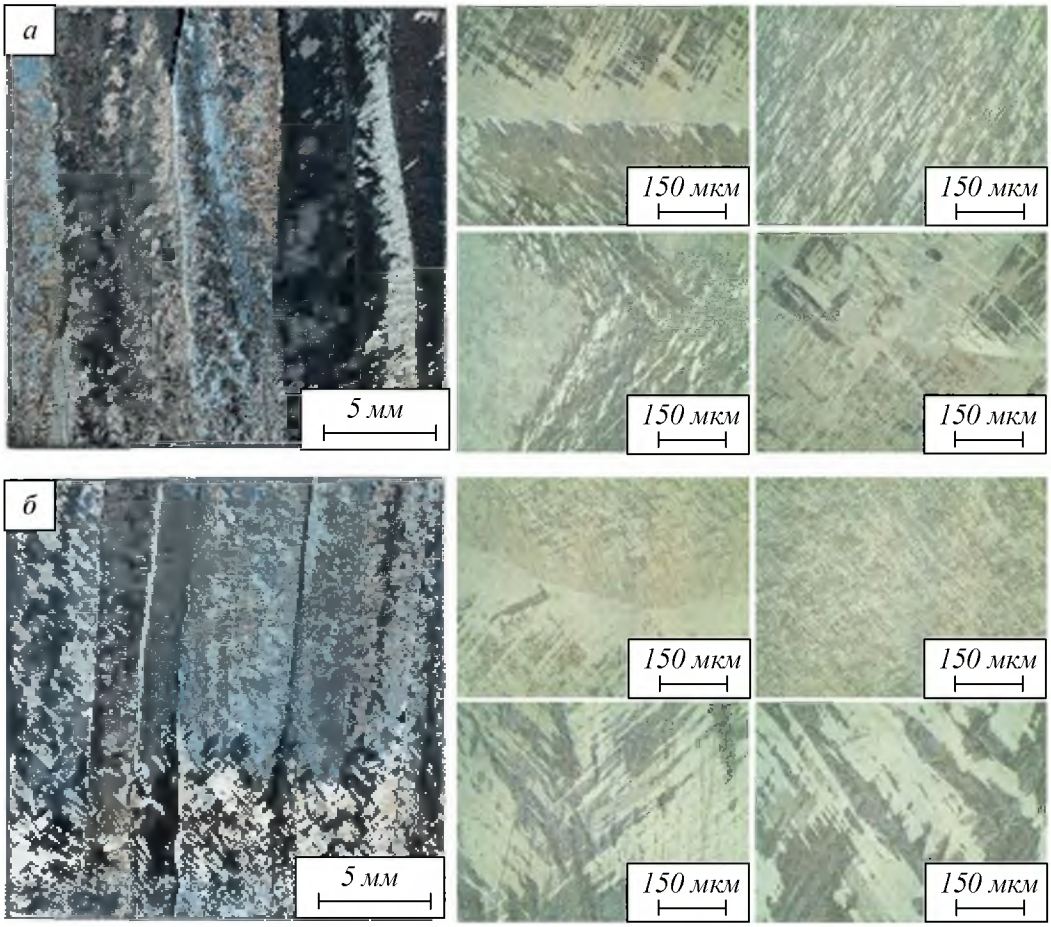


Рис. 4. Металлографические изображения образцов на основе титанового сплава ВТ6, изготовленных методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии без (образцы ЭЛАП) (*а*) и с подводом ультразвукового преобразователя к подложке (образцы ЭЛАП + у/з) (*б*)

Fig. 4. Metallographic images of samples based on Ti – 6Al – 4V titanium alloy, manufactured by wire-feed electron beam additive technology without ultrasonic treatment (EBAM samples) (*a*) and with the ultrasonic transducer applied to the substrate (EBAM + UT samples) (*б*)

вертикальной стенки происходил непрерывно, однородного роста крупных зерен по всей высоте не наблюдали. При нанесении первых слоев титана на подложку формируются равноосные зерна за счет миграции большеугловых границ. Во время вторичной рекристаллизации растут благоприятно ориентированные зерна, за счет этого в материале формируется кристаллографическая текстура. После завершения вторичной рекристаллизации образуются аномально крупные вытянутые зерна. Скорость фронта кристаллизации и температурный градиент являются наиболее важными параметрами, влияющими на структуру затвердевания (рис. 3, *а*). При изготовлении экспериментальных образцов на основе титанового сплава ВТ6 с ультразвуковым воздействием наблюдается отличительная особенность при формировании последнего слоя вертикальной стенки (рис. 3, *б*).

Внутри исходных зерен β-фазы находятся пластины α-фазы (рис. 4). Последняя представлена для обоих образцов мартенситом корзиночного переплетения. Образование такого типа структуры связано с зарождением кристаллитов одновременно из нескольких мест при высокой скорости охлаждения. В дальнейшем зарожденные кристаллиты пластин α-фазы встречаются, образуя тонкую сетку мартенситных пластин. Кроме этого, вблизи границы зерен β-фазы пластины α-фазы растут параллельно друг другу, создавая колонии.

Преобладание вытянутых зерен может приводить к анизотропии механических свойств титановых образцов. Среднее значение относительного удлинения $\Delta\varepsilon$ горизонтальных и вертикальных образцов без ультразвукового воздействия составляет 8 ± 2 и 11 ± 2 % (рис. 5). Предел прочности образцов $\Delta\sigma_B$ без ультразвукового воздействия сохраняется в пределах 784 – 815 МПа, предел текучести $\Delta\sigma_{0,2}$ составляет 653 ± 7 и 638 ± 7 МПа.

В соответствии с законом Холла-Петча, высокие значения прочности соответствуют более мелким размерам зерен для образцов с подведением ультразвукового преобразователя к подложке во время изготовления. При деформации

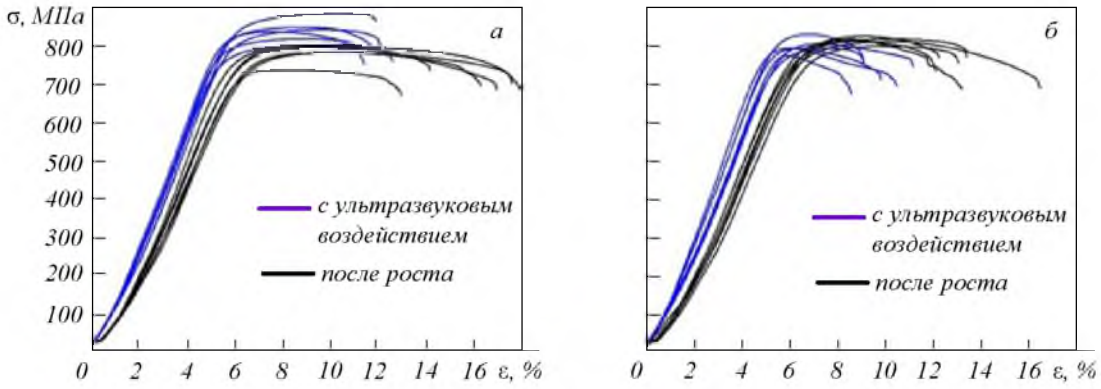


Рис. 5. Кривые напряжение – деформация экспериментальных образцов титанового сплава ВТ6, изготовленных методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии:
а – вертикальное направление относительно выращивания; б – горизонтальное направление относительно выращивания
Fig. 5. Stress-strain curves of experimental samples of Ti – 6Al – 4V titanium alloy manufactured by wire-feed electron beam additive technology:
а – vertical direction relative to growth; *б* – horizontal direction relative to growth

образца в направлении печати барьерный эффект, предположительно, незначителен при сближении дислокаций, тогда как при деформации в направлении роста он оказывает существенное влияние на процессы деформации и разрушения в вертикальных столбчатых зернах. Относительное удлинение горизонтальных и вертикальных образцов с ультразвуковым воздействием составляет 5 ± 2 и 7 ± 2 %. Ультразвуковое воздействие снижает пластичность, вероятно, за счет изменения плотности границ раздела вблизи исходных β-фаз. Предел прочности образцов $\Delta\sigma_B$ с ультразвуковым воздействием сохраняется в пределах 799 – 840 МПа, предел текучести $\Delta\sigma_{0,2}$ составляет 689 – 703 МПа (табл. 2).

Выводы

Применение ультразвукового воздействия в процессе проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии титанового сплава ВТ6 позволяет влиять на формирование зеренной структуры. Реализованный метод способствует измельчению первичных β-зерен, их средний размер сократился с 5,2 до 3,1 мм, при этом ширина зерен уменьшилась заметно, тогда как длина осталась практически неизменной. Ключевым механизмом, обеспечивающим рассматриваемый эффект, является акустическая кавитация в ванне расплава, инициируемая ультразвуковыми колебаниями, что способствует гомогенному зарождению и подавлению направленного столбчатого роста зерен. Вместе с тем, выявлено анизотропное поведение механических характеристик, зависящее от ориентации образцов относительно направления выращивания: горизонтальные образцы продемонстрировали более высокие свойства, чем вертикальные, что указывает на важность учета геометрии и положения детали при проектировании технологического процесса.

Таблица 2

Средние значения механических свойств изготовленных титановых образцов

Table 2. **Average values of mechanical properties of manufactured titanium samples**

Образец	Направление образца относительно выращивания	$\Delta\sigma_{0,2}$, МПа	$\Delta\sigma_B$, МПа	$\Delta\varepsilon$, %
ЭЛАП	горизонтальные	653 ± 7	815 ± 7	8 ± 2
	вертикальные	638 ± 7	784 ± 7	11 ± 2
ЭЛАП + у/з	горизонтальные	689 ± 7	799 ± 7	5 ± 2
	вертикальные	703 ± 7	840 ± 7	7 ± 2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kotlyarov V.I., Yuzhakova E.A., Beshkarev V.T., Ivanov V.V., Kozlov R.Y. Set of measures for improving the quality of powders based on titanium for additive technology. *Metallurgist*. 2017;61:72–77. *https://doi.org/10.1007/s11015-017-0456-2*
2. Tayon W.A., Domack M.S., Hoffman E.K., Hales S.J. Texture Evolution within the Thermomechanically Affected Zone of an Al – Li Alloy 2195 Friction Stir Weld. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013;44:4906–4913. *https://doi.org/10.1007/s11661-013-1802-z*
3. Zhang L., Chen J., Wang Q., Liu Z., Zhang D., Sun J. Microstructure and mechanical properties of Ti – 6Al – 4V alloy fabricated by electron beam freeform fabrication with ultrasonic assistance. *Materials Chemistry and Physics*. 2023;306:127924. *https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.030*
4. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Москва: ВИЛС-МАТИ. 2009:520.
5. Wu B., Chao Z., Shao D., Li P., Knott J., Pan Z., Li H. Enhanced corrosion performance in Ti – 6Al – 4V alloy produced via wire-arc directed energy deposition with magnetic arc oscillation. *Additive Manufacturing*. 2023;66:103465. *https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103465*
6. Yuan T., Kou S., Luo Z. Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool. *Acta Materialia*. 2016;106:144–154. *https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.016*
7. Okunkova A.A., Shekhtman S.R., Metel A.S., Suhova N.A., Fedorov S.V., Volosova M.A., Grigoriev S.N. On defect minimization caused by oxide phase formation in laser powder bed fusion. *Metals*. 2022;5:760. *https://doi.org/10.3390/met12050760*
8. Kazantseva N., Krakhmalev P., Thuvander M., Yadroitsev I., Vinogradova N., Ezhov I. Martensitic Transformations in Ti – 6Al – 4V (ELI) Alloy Manufactured by 3D Printing. *Materials Characterization*. 2018;146:101–112. *https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.09.042*
9. Gu D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*. 2012;57(3):133–164. *https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014*
10. Abele E., Schraml M., Schiller P., Pfefferkorn F. Deposition of Ti – 6Al – 4V using laser and wire, part I: Microstructural properties of single beads. *Surface and Coatings Technology*. 2011;206(6):1133–1141. *https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.07.095*
11. Dehoff R.R., Kirka M.M., Sames W.J., Bilheux H., Tremsin A.S., Lowe L.E., Babu S.S. Site specific control of crystallographic grain orientation through electron beam additive manufacturing. *Acta Materialia*. 2015;91:144–156. *https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000734*
12. Yang J., Yu H., Yin J., Gao M., Wang Z., Zeng X. Formation and control of martensite in Ti – 6Al – 4V alloy produced by selective laser melting. *Materials & Design*. 2016;108:308–318. *https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.117*
13. Ding L., Sun Z., Liang X., Li J., Xu G., Zhishuai C. Investigation on Ti – 6Al – 4V Microstructure Evolution in Selective Laser Melting. *Metals*. 2019;9:1270. *https://doi.org/10.3390/met9121270*
14. Zhang Y., Wang X.-K., Jia Y.-F., Dong B., Wang Z.-M., Yan J.-J., Zhang X.-C., Tu S.-T. Fatigue Life Prediction and Feature Contribution Analysis of Surface-Strengthened Ti – 6Al – 4V Using a Preprocessing Neural Network. *International Journal of Fatigue*. 2025;56:4991–5005. *https://doi.org/10.1007/s11661-025-07952-9*
15. Panin A., Martynov S., Kazachenok M., Kazantseva L., Bakulin A., Kulkova S., Perevalova O., Sklyarova E. Effects of water cooling on the microstructure of electron beam additive-manufacted Ti – 6Al – 4V. *Metals*. 2021;11:111742. *https://doi.org/10.3390/met11111742*
16. Biswas S., Alavi S.H., Sedai B., Blum F.D., Harimkar S.P. Effect of ultrasonic vibration-assisted laser surface melting and texturing of Ti – 6Al – 4V ELI alloy on surface properties. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35:295–302. *https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.057*
17. Суминов И.В., Хилфи Диаа Х.Ч. Аддитивные технологии в современной промышленности: применение и перспективы на примере титановых сплавов. *Кузнечно-штамповочное производство. обработка материалов давлением*. 2024;3:36–43.
18. Kandi R., Sahoo S.K., Sahoo A.K. Ultrasonic vibration-assisted turning of Titanium alloy Ti – 6Al – 4V: numerical and experimental investigations. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020;42:399. *https://doi.org/10.1007/s40430-020-02481-5*
19. Zykova A.P., Nikolaeva A.V., Vorontsov A.V., Chumaevskii A.V., Nikonov S.Y., Moskvichev E.N., Gurianov D.A., Savchenko N.L., Kolubaev E.A., Tarasov S.Y. Effect of Copper Content on Grain Structure Evolution in Additively Manufactured Ti – 6Al – 4V Alloy. *Physical Mesomechanics*. 2023;26:107–125. *https://doi.org/10.1134/S1029959923020017*

20. Wang Y., Shi Y., Yang K., Wang H. Microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured Ti – 6Al – 4V with interlayer rolling. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020;51:47–56. *https://doi.org/10.1007/s00170-011-3299-1*

21. Panin A.V., Kazachenok M.S., Dmitriev A.I., Nikonov A.Yu., Perevalova O.B., Kazantseva L.A., Sinyakova E.A., Martynov S.A. The effect of ultrasonic impact treatment on deformation and fracture of electron beam additive manufactured Ti – 6Al – 4V under uniaxial tension. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;832:142458. *https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142458*

22. Popov Jr.V., Katz-Demyanetz A., Kovalevsky A., Biletskiy R., Strokin E., Garkun A., Effect of the hatching strategies on mechanical properties and microstructure of sebm manufactured Ti – 6Al – 4V specimens. *Letters on materials*. 2018;8:468–472. *https://doi.org/10.22226/2410-3535-2018-4-468-472*

23. Kartavykh A.V., Asnis E.A., Piskun N.V., Statkevich I.I., Gorshenkov M.V., Tcherdyntsev V.V. anthanum Hexaboride as Advanced Structural Refiner/Getter in TiAl-Based Refractory Intermetallics. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;588:122–126. *https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.11.017*

24. Biswas S., Alavi S.H., Sedai B., Blum F.D., Harimkar S.P. Ultrasonic vibration assisted laser metal deposition of Ti – 6Al – 4V: heat transfer and microstructure formation. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35:295–302. *https://doi.org/1016/j.jmst.2018.09.057*

25. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H., van Duin S., Larkin N. Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2016;39:32–42. *https://doi.org/1016/j.rcim.2015.12.004*

26. Wang F., Williams S., Colegrove P., Antonysamy A.A. Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti – 6Al – 4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013;44:968–977. *https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6*

27. Kabir S., Ansary S.R., Kaushik H.C., Zhao B., Kono D., Cong W. Ultrasonic vibration-assisted laser directed energy deposition: effects on material movement in vertical and horizontal direction. *Progress in Additive Manufacturing*. 2026. *https://doi.org/10.1007/s40964-025-01487-6*

28. Gu D., Wang H., Dai D., Chang F., Meiners W., Hagedorn Y.-C., Wissenbach K., Kelbassa I., Poprawe R. Densification behavior, microstructure evolution, and wear property of TiC nanoparticle reinforced AlSi10Mg bulk-form nanocomposites prepared by selective laser melting. *Journal of Laser Applications*. 2015;27:17003. *https://doi.org/10.2351/1.4870877*

29. Peng F.C., Guo C., Fengchun J., Yuan D., Yin H., Sun Q., Zhang H., Dong T., Guo D., Konovalov S. Microstructure evolution and mechanical properties of wire-arc additively manufactured Ti – 6Al – 4V under different heat inputs. *Materials Science and Engineering: A*. 2025;925:147934. *https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147934*

30. Deschamps A., Marioara C.D., Clouet E., Marquis E.A., Dorin B., Hutchinson C.R. Precipitation kinetics in metallic alloys: Experiments and modelling. *Progress in Materials Science*. 2021;122:100820. *https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100820*

31. Mohammadhosseini A., Fraser D., Masood S.H., Jahedi M. Microstructure and mechanical properties of Ti – 6Al – 4V manufactured by electron beam melting process. *Materials Research Innovations*. 2019;17:106–112. *https://doi.org/10.1179/1432891713Z.000000000302*

32. Chen C., Fan C., Cai X., Lin S., Yang C. Ultrasonic irradiation induced the microstructure refinement and textureevolution of Ti – 6Al – 4V TIG weld seam. *Science and technology of welding and joining*. 2018. *https://doi.org/10.1080/13621718.2019.1604476*

33. Gu D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*. 2012;57:133–164. *https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014*

34. Gu D., Hagedorn Y.-C., Meiners W., Meng G., Batista A.C., Wissenbach K., Poprawe R. Nanocrystalline TiC reinforced Ti matrix bulk-form nanocomposites by Selective Laser Melting (SLM): Densification, growth mechanism and wear behavior. *Composites Science and Technology*. 2011;71:1612–1620. *https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.07.010*

35. Yuan D., Shao S., Guo C., Jiang F., Wang J. Grain refining of Ti – 6Al – 4V alloy fabricated by laser and wire additive manufacturing assisted with ultrasonic vibration. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;73:105472. *https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105472*

36. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevsky A.V., Astafurova E.G. Micro-, meso- and macrostructural design of bulk metallic and polymetallic materials by wire-feed electron-beam additive manufacturing. *Physical mesomechanics*. 2022;25:479–491. *https://doi.org/10.1134/S1029959922060017*

REFERENCES

1. Kotlyarov V.I., Yuzhakova E.A., Beshkarev V.T., Ivanov V.V., Kozlov R.Y. Set of measures for improving the quality of powders based on titanium

for additive technology. *Metallurgist*. 2017;61:72–77. *https://doi.org/10.1007/s11015-017-0456-2*

2. Tayon W.A., Domack M.S., Hoffman E.K., Hales S.J. Texture Evolution within the Thermomechanically Affected Zone of an Al – Li Alloy 2195 Friction Stir Weld. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013;44:4906–4913. *https://doi.org/10.1007/s11661-013-1802-z*
3. Zhang L., Chen J., Wang Q., Liu Z., Zhang D., Sun J. Microstructure and mechanical properties of Ti – 6Al – 4V alloy fabricated by electron beam freeform fabrication with ultrasonic assistance. *Materials Chemistry and Physics*. 2023;306:127924. *https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.030*
4. Il'in A.A., Kolachev B.A., Pol'kin I.S. *Titanium alloys. Composition, structure, properties*. Moscow: VILS-MATI. 2009:520. (In Russ.).
5. Wu B., Chao Z., Shao D., Li P., Knott J., Pan Z., Li H. Enhanced corrosion performance in Ti – 6Al – 4V alloy produced via wire-arc directed energy deposition with magnetic arc oscillation. *Additive Manufacturing*. 2023;66:103465. *https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103465*
6. Yuan T., Kou S., Luo Z. Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool. *Acta Materialia*. 2016;106:144–154. *https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.01.016*
7. Okunkova A.A., Shekhtman S.R., Metel A.S., Suhova N.A., Fedorov S.V., Volosova M.A., Grigoriev S.N. On defect minimization caused by oxide phase formation in laser powder bed fusion. *Metals*. 2022;5:760. *https://doi.org/10.3390/met12050760*
8. Kazantseva N., Krakhmalev P., Thuvander M., Yadroitsev I., Vinogradova N., Ezhov I. Martensitic Transformations in Ti – 6Al – 4V (ELI) Alloy Manufactured by 3D Printing. *Materials Characterization*. 2018;146:101–112. *https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.09.042*
9. Gu D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*. 2012;57(3):133–164. *https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014*
10. Abele E., Schraml M., Schiller P., Pfefferkorn F. Deposition of Ti – 6Al – 4V using laser and wire, part I: Microstructural properties of single beads. *Surface and Coatings Technology*. 2011;206(6):1133–1141. *https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.07.095*
11. Dehoff R.R., Kirka M.M., Sames W.J., Bilheux H., Tremsin A.S., Lowe L.E., Babu S.S. Site specific control of crystallographic grain orientation through electron beam additive manufacturing. *Acta Materialia*. 2015;91:144–156. *https://doi.org/10.1179/1743284714Y.0000000734*
12. Yang J., Yu H., Yin J., Gao M., Wang Z., Zeng X. Formation and control of martensite in Ti – 6Al – 4V alloy produced by selective laser melting. *Materials & Design*. 2016;108:308–318. *https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.117*
13. Ding L., Sun Z., Liang X., Li J., Xu G., Zhishuai C. Investigation on Ti – 6Al – 4V Microstructure Evolution in Selective Laser Melting. *Metals*. 2019;9:1270. *https://doi.org/10.3390/met9121270*
14. Zhang Y., Wang X.-K., Jia Y.-F., Dong B., Wang Z.-M., Yan J.-J., Zhang X.-C., Tu S.-T. Fatigue Life Prediction and Feature Contribution Analysis of Surface-Strengthened Ti – 6Al – 4V Using a Preprocessing Neural Network. *International Journal of Fatigue*. 2025;56:4991–5005. *https://doi.org/10.1007/s11661-025-07952-9*
15. Panin A., Martynov S., Kazachenok M., Kazantseva L., Bakulin A., Kulkova S., Perevalova O., Sklyarova E. Effects of water cooling on the microstructure of electron beam additive-manufacted Ti – 6Al – 4V. *Metals*. 2021;11:111742. *https://doi.org/10.3390/met11111742*
16. Biswas S., Alavi S.H., Sedai B., Blum F.D., Harimkar S.P. Effect of ultrasonic vibration-assisted laser surface melting and texturing of Ti – 6Al – 4V ELI alloy on surface properties. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35:295–302. *https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.09.057*
17. Suminov I.V., Khilfi Diaa Kh.Ch. Additive technologies in modern industry: application and prospects on the example of titanium alloys. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. obrabotka materialov davleniem*. 2024;3:36–43. (In Russ.).
18. Kandi R., Sahoo S.K., Sahoo A.K. Ultrasonic vibration-assisted turning of Titanium alloy Ti – 6Al – 4V: numerical and experimental investigations. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2020;42:399. *https://doi.org/10.1007/s40430-020-02481-5*
19. Zykova A.P., Nikolaeva A.V., Vorontsov A.V., Chumaevskii A.V., Nikonov S.Y., Moskvichev E.N., Gurianov D.A., Savchenko N.L., Kolubaev E.A., Tarasov S.Y. Effect of Copper Content on Grain Structure Evolution in Additively Manufactured Ti – 6Al – 4V Alloy. *Physical Mesomechanics*. 2023;26:107–125. *https://doi.org/10.1134/S1029959923020017*
20. Wang Y., Shi Y., Yang K., Wang H. Microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured Ti – 6Al – 4V with interlayer rolling. *Journal of Materials Science & Technology*. 2020;51:47–56. *https://doi.org/10.1007/s00170-011-3299-1*

21. Panin A.V., Kazachenok M.S., Dmitriev A.I., Nikonov A.Yu., Perevalova O.B., Kazantseva L.A., Sinyakova E.A., Martynov S.A. The effect of ultrasonic impact treatment on deformation and fracture of electron beam additive manufactured Ti – 6Al – 4V under uniaxial tension. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;832:142458. *https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142458*

22. Popov Jr.V., Katz-Demyanetz A., Kovalevsky A., Biletskiy R., Strokin E., Garkun A. Effect of the hatching strategies on mechanical properties and microstructure of sebm manufactured Ti – 6Al – 4V specimens. *Letters on materials*. 2018;8:468–472. *https://doi.org/10.22226/2410-3535-2018-4-468-472*

23. Kartavykh A.V., Asnis E.A., Piskun N.V., Statkevich I.I., Gorshenkov M.V., Tcherdyntsev V.V. anthanum Hexaboride as Advanced Structural Refiner/Getter in TiAl-Based Refractory Intermetallics. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;588:122–126. *https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.11.017*

24. Biswas S., Alavi S.H., Sedai B., Blum F.D., Harimkar S.P. Ultrasonic vibration assisted laser metal deposition of Ti – 6Al – 4V: heat transfer and microstructure formation. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35:295–302. *https://doi.org/1016/j.jmst.2018.09.057*

25. Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H., van Duin S., Larkin N. Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2016;39:32–42. *https://doi.org/1016/j.rcim.2015.12.004*

26. Wang F., Williams S., Colegrove P., Antonysamy A.A. Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti – 6Al – 4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2013;44:968–977. *https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6*

27. Kabir S., Ansary S.R., Kaushik H.C., Zhao B., Kono D., Cong W. Ultrasonic vibration-assisted laser directed energy deposition: effects on material movement in vertical and horizontal direction. *Progress in Additive Manufacturing*. 2026. *https://doi.org/10.1007/s40964-025-01487-6*

28. Gu D., Wang H., Dai D., Chang F., Meiners W., Hagedorn Y.-C., Wissenbach K., Kelbassa I., Poprawe R. Densification behavior, microstructure evolution, and wear property of TiC nanoparticle reinforced AlSi10Mg bulk-form nanocomposites prepared by selective laser melting. *Journal of Laser Applications*. 2015;27:17003. *https://doi.org/10.2351/1.4870877*

29. Peng F.C., Guo C., Fengchun J., Yuan D., Yin H., Sun Q., Zhang H., Dong T., Guo D., Konovalov S. Microstructure evolution and mechanical properties of wire-arc additively manufactured Ti – 6Al – 4V under different heat inputs. *Materials Science and Engineering: A*. 2025;925:147934. *https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147934*

30. Deschamps A., Marioara C.D., Clouet E., Marquis E.A., Dorin B., Hutchinson C.R. Precipitation kinetics in metallic alloys: Experiments and modelling. *Progress in Materials Science*. 2021;122:100820. *https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100820*

31. Mohammadhosseini A., Fraser D., Masood S.H., Jahedi M. Microstructure and mechanical properties of Ti – 6Al – 4V manufactured by electron beam melting process. *Materials Research Innovations*. 2019;17:106–112. *https://doi.org/10.1179/1432891713Z.000000000302*

32. Chen C., Fan C., Cai X., Lin S., Yang C. Ultrasonic irradiation induced the microstructure refinement and textureevolution of Ti – 6Al – 4V TIG weld seam. *Science and technology of welding and joining*. 2018. *https://doi.org/10.1080/13621718.2019.1604476*

33. Gu D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*. 2012;57:133–164. *https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014*

34. Gu D., Hagedorn Y.-C., Meiners W., Meng G., Batista A.C., Wissenbach K., Poprawe R. Nanocrystalline TiC reinforced Ti matrix bulk-form nanocomposites by Selective Laser Melting (SLM): Densification, growth mechanism and wear behavior. *Composites Science and Technology*. 2011;71:1612–1620. *https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.07.010*

35. Yuan D., Shao S., Guo C., Jiang F., Wang J. Grain refining of Ti – 6Al – 4V alloy fabricated by laser and wire additive manufacturing assisted with ultrasonic vibration. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021;73:105472. *https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105472*

36. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevsky A.V., Astafurova E.G. Micro-, meso- and macrostructural design of bulk metallic and polymetallic materials by wire-feed electron-beam additive manufacturing. *Physical mesomechanics*. 2022;25:479–491. *https://doi.org/10.1134/S1029959922060017*

Сведения об авторах:

***Ксения Сергеевна Осипович**, научный сотрудник лаборатории локальной металлургии аддитивных технологий,* Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

***E-mail**:* osipovich_k@ispms.ru

***ORCID**:* 0000-0001-9534-775X

***SPIN-код**:* 8071-6575

Андрей Валерьевич Чумаевский, *д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях,* Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: tch7av@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1983-4385

Юрий Владимирович Кушнарев, *инженер лаборатории локальной металлургии аддитивных технологий,* Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: yury.kushnaryov@mail.ru
ORCID: 0009-0002-5708-6098
SPIN-код: 5631-0218

Александр Олегович Панфилов, *младший научный сотрудник лаборатории структурного дизайна перспективных материалов,* Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: alexpl@ispms.ru
ORCID: 0000-0001-8648-0743
SPIN-код: 7100-8529

Евгений Александрович Колубаев, *д.т.н., заведующий лабораторией локальной металлургии в аддитивных технологиях,* Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: eak@ispms.tsc.ru
ORCID: 0000-0001-7288-3656
SPIN–код: 6575-1950

Information about the authors:
Kseniya Sergeevna Osipovich, *research fellow at the Laboratory of Local Metallurgy of Additive Technologies,* Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: osipovich_k@ispms.ru
ORCID: 0000-0001-9534-775X
SPIN-код: 8071-6575

Andrei Valer'evich Chumaevskii, *Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher at the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies,* Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: tch7av@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1983-4385

Yurii Vladimirovich Kushnarev, *Engineer of the Laboratory of Local Metallurgy of Additive Technologies,* Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: yury.kushnaryov@mail.ru
ORCID: 0009-0002-5708-6098
SPIN-код: 5631-0218

Aleksandr Olegovich Panfilov, *Junior Researcher at the Laboratory of Structural Design of Advanced Materials,* Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: alexpl@ispms.ru
ORCID: 0000-0001-8648-0743
SPIN-код: 7100-8529

Evgenii Aleksandrovich Kolubaev, *Doctor of Engineering Sciences, Head of the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies,* Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: eak@ispms.tsc.ru
ORCID: 0000-0001-7288-3656
SPIN-код: 6575-1950

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 11.12.2025
После доработки 28.01.2026
Принята к публикации 05.02.2026

Received 11.12.2025
Revised 28.01.2026
Accepted 05.02.2026

Краткое сообщение

УДК 621.7/544.463

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-59-62

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИЛИЦИДОВ НИОБИЯ

© 2026 г. Н. Е. Беляев[1], О. А. Шкода[2]

[1]**Новосибирский государственный технический университет** (Россия, 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20)

[2]**Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук** (Россия, 634055, Томск, пр. Академический 10/4)

Аннотация. Силициды ниобия представляют научный и прикладной интерес для высокотемпературных композиционных материалов благодаря термической стабильности и механической прочности. Механическая активация (МА) является эффективным методом как для подготовки порошков, так и для получения материалов механохимическим синтезом. Этот процесс включает комплекс взаимосвязанных физико-химических явлений: интенсивная пластическая деформация, накопление дефектов, измельчение, формирование слоистых агломератов с увеличенной межфазной поверхностью. Все это позволяет управлять и контролировать кинетику реакций и формировать фазовый состав порошковой смеси. Изучена возможность синтеза силицидов ниобия из техногенных отходов: ниобиевой стружки и кремниевых пластин. Исследованы подготовка сырья, измельчение и удельная поверхность активированных смесей при различном времени механической активации. Рентгенофазовый анализ подтвердил формирование силицидов ниобия. Эксперименты показали возможность и целесообразность использования отходов в качестве исходного сырья. Были подобраны условия механической активации для получения кристаллической порошковой смеси с суммарным содержанием силицидов ниобия, достигающим 38 мас. %. Полученные результаты закладывают основу для дальнейшей оптимизации МА с целью направленного синтеза материалов для нового поколения высокотемпературных композитов.

Ключевые слова: ниобий, кремний, силициды ниобия, механическая активация, механохимический синтез, технологическая обработка, техногенные отходы

Благодарности: авторы выражает признательность Томскому региональному центру коллективного пользования и Центру коллективного пользования «Структура, механические и физические свойства материалов» Новосибирского государственного технического университета.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ТНЦ СО РАН (проект № FWRF-2024-0009) и при поддержке проекта FSUN-2024-0005.

Для цитирования: Беляев Н.Е., Шкода О.А. Использование вторичного сырья для получения силицидов ниобия. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):59–62. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-59-62*

THE USE OF SECONDARY RAW MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF NIOBIUM SILICIDES

© 2026 N. E. Belyaev[1], O. A. Shkoda[2]

[1]**Novosibirsk State Technical University** (20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation)

[2]**TOM Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences** (10/4 Akademicheskiy Ave., Tomsk, 634055, Russian Federation)

Abstract. Niobium silicides are of scientific and applied interest for high-temperature composite materials due to their thermal stability and mechanical strength. Mechanical activation (MA) is an effective method both for the preparation of powders

and for the production of materials by mechanochemical synthesis. This process includes a complex of interrelated physico-chemical phenomena: intense plastic deformation, accumulation of defects, crushing, formation of layered agglomerates with an enlarged interfacial surface. All this allows you to control and control the kinetics of reactions and form the phase composition of the powder mixture. The possibility of synthesizing niobium silicides from technological waste: niobium chips and silicon wafers has been studied. The preparation of raw materials, grinding and specific surface area of activated mixtures at different times of mechanical activation are investigated. X-ray phase analysis confirmed the formation of niobium silicides. Experiments have shown the possibility and expediency of using waste as a feedstock. The conditions of mechanical activation were selected to obtain a crystalline powder mixture with a total content of niobium silicides reaching 38 % by weight. The results obtained lay the foundation for further optimization of the MA in order to synthesize materials for a new generation of high-temperature composites.

Keywords: niobium, silicon, niobium silicides, mechanical activation, mechanochemical synthesis, processing, man-made waste

Acknowledgements: The authors express gratitude to the Tomsk Regional Core Shared Research Facilities Centre of National Research Tomsk State University and the Center for Collective Use "Structure, Mechanical and Physical Properties of Materials" of NSTU.

Funding: The work was carried out within the framework of the state assignment of the TSC SB RAS (project No. FWRF-2024-0009) and with the support of project FSUN-2024-0005.

For citation: Belyaev N.E., Shkoda O.A. The use of secondary raw materials for the production of niobium silicides. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):59–62. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-59-62*

Введение

Силициды ниобия используются в машиностроении для создания высокотемпературных композиционных материалов благодаря высокой стойкости к окислению и термическим ударам, сохранением механических свойств при повышенных температурах, хорошей электропроводностью, химической совместимостью [1 – 5]. Механическая активация (МА) применяется как самостоятельный метод синтеза, так и как эффективный инструмент обработки и подготовки материалов. В связи с тем, что система Nb – Si является низкоэнергетической, необходимо провести самораспространяющийся высокотемпературный синтез невозможно без МА [6 – 10].

В настоящей работе использовали техногенные отходы в виде металлической стружки ниобия и пластин кремния, это позволяет решать экологические проблемы и снизить затраты на сырье. Целью настоящей работы является изучение возможности синтеза силицидов ниобия методом механохимической обработки с использованием доступных техногенных отходов (ниобиевой стружки и кремниевых пластин), подбор условия приготовления вторичного сырья и механической активации для получения кристаллической порошковой смеси, содержащей силициды ниобия.

Методы исследования

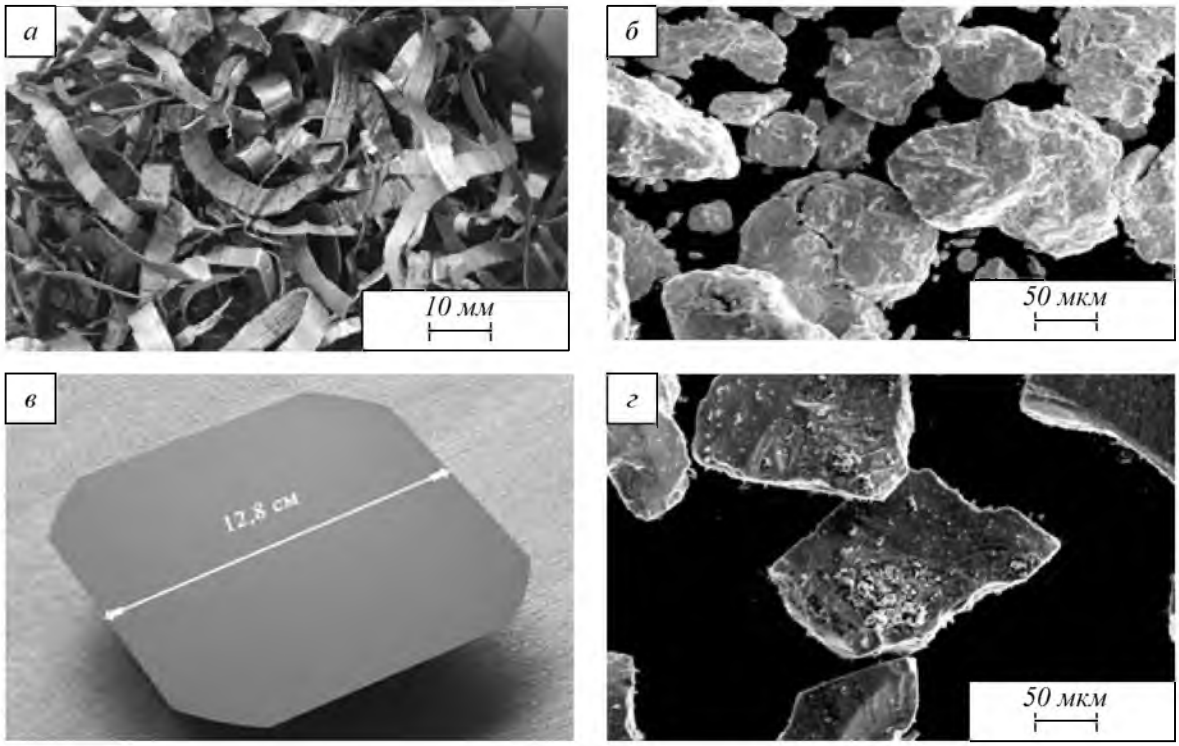
Механическую активацию кремния и ниобия проводили в планетарной мельнице Активатор 2SL. Соотношение массы шаров (диаметром 5 мм) к порошку (Nb_5Si_3) было 6,3 : 1. Время МА составляло 300, 600, 900 и 1800 с. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре XRD-6000 (базы PDF 4+, POWDER CELL 2.4).

Была разработана методика предварительной обработки исходного вторичного сырья (кремниевые пластины и ниобиевая стружка). Стружку ниобия измельчали гильотинными ножницами до размеров пластинок 5 × 5 × 2 мм. Далее их подвергали измельчению в шаровой мельнице Активатор 2SL в течение 10 мин. Полученный порошок просеивали через сито с ячейкой 150 мкм. Порошок кремния готовили из пластин технического кремния размерами 100 × 100 × 5 мм. Измельчение пластин проводили в дезинтеграторе Desi-11. Полученный материал просеивали через сито с ячейкой 150 мкм. Фракцию, оставшуюся на сите, в дальнейших экспериментах не использовали.

Основные результаты

Внешний вид исходного вторичного сырья и образцов после обработки представлены на рисунке.

В процессе МА удельная поверхность рассматриваемой смеси после 900 с МА достигла 1,25 м²/г, что показывает хорошую степень измельчения. После 1800 с она увеличилась до 1,36 м²/г, что свидетельствует об образовании слоистых агломератов. Поведение механоактивированной смеси, приготовленной из техногенных отходов, качественно не отличается от по ведения подобной смеси, изготовленной из исходных



Внешний вид металлической стружки технического ниобия (*а*), образцов после обработки в механоактиваторе в течение 10 мин и отделения фракции до 150 мкм (*б*), пластин технического кремния (*в*), материал после обработки пластин в лабораторном дезинтеграторе и отделения фракции до 150 мкм (*г*)

The appearance of technical niobium metal shavings (*а*), samples after treatment in a mechanical activator for 10 minutes and separation of a fraction up to 150 microns (*б*), technical silicon wafers (*в*), material after treatment of wafers in a laboratory disintegrator and separation of a fraction up to 150 microns (*г*)

промышленных порошков [2]. Рентгенофазовый анализ показал, что на протяжении всего времени МА порошковая смесь остается в кристаллическом состоянии, хотя часто при использовании механической активации происходит переход в аморфное [9] формирование соединения Nb_5Si_2 (6 мас. %) после 300 с МА. После 1800 с МА содержание силицидов (Nb_5Si_3 + $NbSi_2$) выросло до 38 мас. %.

Выводы

Исследование подтвердило целесообразность применения ниобиевых и кремниевых отходов в качестве сырья. Подобраны условия механической активации для получения кристаллической порошковой смеси с суммарным содержанием силицидов ниобия 38 мас. %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sankar M., Satya Prasad V.V., Baligidad R.G., Alam M.Z., Das D.K., Gokhale A.A. Microstructure, Oxidation Resistance and Tensile Properties of Silicide Coated Nb-alloy C-103. *Mater. Sci. Eng. A*. 2015;645:339–346. *https://doi.org/j.msea.2015.07.063*
2. Shkoda O.A., Tereckova O.G. SHS in the Nb – Si System: Influence of Mechanical Alloying. *J Self-Propag. High-Temp. Synth.* 2016;25(14). *https://doi.org/10.3103/S106138621601012X*
3. Knittel S., Mathieu S., Portebois L., Drawin S., Vilasi M. Development of silicide coatings to ensure the protection of Nb and silicide composites against high temperature oxidation. *Surface and Coatings Technology*. 2013;235:401–406. *https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.07.053*
4. Cardozo E.P., D'Oliveira A.S.C.M. Niobium silicide multilayers processed by in situ synthesis during deposition of powder mixtures. *J. of Materi Eng and Perform*. 2022;31:3998–4005. *https://doi.org/10.1007/s11665-021-06460-2*
5. Goncharov I.S., Hisamova L.V., Saubanova L.Yu., Polozov I.A., Wang Q.S. Synthesis of the In Situ Nb – Si Composites by Binder Jetting Additive Manufacturing Technology. *KEM*. 2019;822:311. *https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.822.311*
6. Ling X., Liu F., Zhang M., Liu Q. Shock synthesis of niobium silicide (Nb5Si3) via the flyer plate impact technique with high impact velocities. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;740:1032–1036. *https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.089*
7. Hafs A., Hafs T., Berdjane D. et al. Synthesis of Fe90Nb10 via wet mechanical milling method and

its structural, magnetic and thermal characterization. *Bull Mater Sci.* 2025;48(14). *https://doi.org/10.1007/s12034-024-03372-4*

8. Zhang Y.-H., Wu L.-R., Ma J., Cui G. Nanotechnology in solid state batteries, what's next? *Next Nanotechnology*. 2023;2:100011. *https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2023.100011*
9. Li B., Liu L., Ma X.M. Amorphization in the Nb – Si system by mechanical alloying. *Journal of allows and compounds*. 2002:161–163.
10. Trevino R., Maguregui E., Perez F., Shafirovich E. Mechanically activated SHS of Nb5Si3 and Nb5Si3/Nb composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;826:1–10. *https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154228*

REFERENCES

1. Sankar M., Satya Prasad V.V., Baligidad R.G., Alam M.Z., Das D.K., Gokhale A.A. Microstructure, Oxidation Resistance and Tensile Properties of Silicide Coated Nb-alloy C-103. *Mater. Sci. Eng. A*. 2015;645:339–346. *https://doi.org/j.msea.2015.07.063*
2. Shkoda O.A., Tereckova O.G. SHS in the Nb – Si System: Influence of Mechanical Alloying. *J Self-Propag. High-Temp. Synth.* 2016;25(14). *https://doi.org/10.3103/S106138621601012X*
3. Knittel S., Mathieu S., Portebois L., Drawin S., Vilasi M. Development of silicide coatings to ensure the protection of Nb and silicide composites against high temperature oxidation. *Surface and Coatings Technology*. 2013;235:401–406. *https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.07.053*
4. Cardozo E.P., D'Oliveira A.S.C.M. Niobium silicide multilayers processed by in situ synthesis during deposition of powder mixtures. *J. of Materi Eng and Perform*. 2022;31:3998–4005. *https://doi.org/10.1007/s11665-021-06460-2*
5. Goncharov I.S., Hisamova L.V., Saubanova L.Yu., Polozov I.A., Wang Q.S. Synthesis of the in situ Nb – Si composites by binder jetting additive manufacturing technology. *KEM*. 2019;822:311. *https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.822.311*
6. Ling X., Liu F., Zhang M., Liu Q. Shock synthesis of niobium silicide (Nb5Si3) via the flyer plate impact technique with high impact velocities. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;740:1032–1036. *https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.089*
7. Hafs A., Hafs T., Berdjane D. et al. Synthesis of Fe90Nb10 via wet mechanical milling method and

its structural, magnetic and thermal characterization. *Bull Mater Sci.* 2025;48(14). *https://doi.org/10.1007/s12034-024-03372-4*

8. Zhang Y.-H., Wu L.-R., Ma J., Cui G. Nanotechnology in solid state batteries, what's next? *Next Nanotechnology*. 2023;2:100011. *https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2023.100011*
9. Li B., Liu L., Ma X.M. Amorphization in the Nb – Si system by mechanical alloying. *Journal of allows and compounds*. 2002:161–163.
10. Trevino R., Maguregui E., Perez F., Shafirovich E. Mechanically activated SHS of Nb5Si3 and Nb5Si3/Nb composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;826:1–10. *https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154228*

Сведения об авторах

***Никита Евгеньевич Беляев**, аспирант,* Новосибирский государственный технический университет
***E-mail**:* N.E.Belyaev@yandex.ru
***ORCID**:* 0000-0002-7371-7905

***Ольга Александровна Шкода**, к.т.н., старший научный сотрудник отдела структурной макрокинетики,* Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук
***E-mail**:* O.Shkoda@dsm.tsc.ru
***ORCID**:* 0000-0002-6068-4817
***SPIN-код**:* 4753-7608

Information about the authors:

***Nikita E. Belyaev**, postgraduate student,* Novosibirsk State Technical University
***E-mail**:* N.E.Belyaev@yandex.ru
***ORCID**:* 0000-0002-7371-7905

***Olga A. Shkoda**, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, Department of Structural Macrokinetics,* Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
***E-mail**:* O.Shkoda@dsm.tsc.ru
***ORCID**:* 0000-0002-6068-4817
***SPIN-код**:* 4753-7608

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

Поступила в редакцию 11.12.2025
После доработки 02.02.2026
Принята к публикации 11.02.2026

Received 11.12.2025
Revised 02.02.2026
Accepted 11.02.2026

Оригинальная статья

УДК 620.22:621.763:621.791.92

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-63-72

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕРМИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ СПЛАВА МАРКИ ЭП648

© 2026 г. В. О. Негодяев[1], Д. В. Илларионов[1], С. С. Жаткин[2], К. В. Никитин[2]

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

[2]**Самарский государственный технический университет** (Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус)

Аннотация. Рассмотрена проблема восстановления посадочных поверхностей валов газотурбинных установок, в частности, применение технологии прямой лазерной наплавки (ПЛН) с использованием сплава ЭП648 (ХН50ВМТЮБ) для ремонта деталей из материала ЭП693 (ХН68ВМТЮК-ВД). Технология ПЛН в качестве метода восстановления валов имеет преимущество по сравнению с традиционными методами за счет высокого уровня автоматизации и меньших остаточных напряжений. Особое внимание уделено подбору оптимального режима наплавки сплава ЭП648, обеспечивающего минимальную разницу в термическом расширении материалов, что критически важно для надежности восстановленных деталей в условиях термического циклирования. Для исследования использовали заготовки, наплавленные по трем режимам из металлопорошковой композиции марки ЭП648 (ТУ 1-595-16-1260 – 2011), и один образец из прутка марки ЭП693 (ГОСТ 2590 – 2006). Измерение коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) проводили на механическом дилатометре при нагреве образцов от 25 до 400 °С. Приведены исследования влияния режимов прямой лазерной наплавки на коэффициент термического линейного расширения наплавляемого материала марки ЭП648 и сравнение данных коэффициентов с материалом прутка марки ЭП693. Подтверждено, что сплав ЭП648 является перспективным материалом для ПЛН валов из материала ЭП693, так как демонстрирует схожее термическое поведение при измерениях КТЛР. Определен оптимальный режим наплавки при погонной энергии 60 Дж/мм, обеспечивающий однородную структуру без дефектов и оптимальное значении КТЛР. Получены регрессионные зависимости, позволяющие прогнозировать изменение размеров вала за счет теплового расширения при эксплуатации и оптимизировать параметры процесса ремонта.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, вал, порошковая металлургия, прямая лазерная наплавка, коэффициент термического линейного расширения, погонная энергия, микроструктура; макроструктура

Для цитирования: Негодяев В.О., Илларионов Д.В., Жаткин С.С., Никитин К.В. Влияние режимов лазерной наплавки на коэффициент термического линейного расширения сплава марки ЭП648. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):63–72. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-63-72*

Original article

INFLUENCE OF LASER SURFACING MODES ON THE COEFFICIENT OF LINEAR THERMAL EXPANSION OF EP648 MATERIAL

© 2026 V. O. Negodyaev[1], D. V. Illarionov[1], S. S. Zhatkin[2], K. V. Nikitin[2]

[1]**PJC «United Engine Corporation – Kuznetsov»** (29 Zavodskoe Highway, Samara, 443022, Russian Federation)

[2]**Samara State Technical University** (244 Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation)

Abstract. The problem of restoring the shaft mounting surfaces of gas turbine installations is considered, in particular, the use of direct laser surfacing technology using EP648 alloy (KHN50VMTYUB) to repair parts made of EP693 material (KHN68VMTYUK VD). PLC technology as a shaft restoration method has an advantage over traditional methods due to a high level of automation and lower residual stresses. Special attention is paid to the selection of the optimal mode

of deposition of the EP648 alloy, which ensures a minimal difference in the thermal expansion of the materials, which is critically important for the reliability of the restored parts under thermal cycling conditions. For the study, blanks deposited in three modes from an EP648 metal powder composition (TU 1-595-16-1260 – 2011) and one preparation from an EP693 rod (GOST 2590 – 2006) were used. The coefficient of thermal linear expansion (KTLR) was measured on a mechanical dilatometer when the samples were heated from 25 to 400 °C. Studies of the effect of direct laser surfacing modes on the coefficient of thermal linear expansion of the deposited material of the EP648 brand and a comparison of these coefficients with the material of the EP693 brand rod are presented. It has been confirmed that EP648 alloy is a promising material for EP693 shaft bearings, as it demonstrates similar thermal behavior during KTLR measurements. The optimal surfacing mode has been determined at a running energy of 60 J/mm, which ensures a homogeneous structure without defects and an optimal KTLR value. Regression dependences have been obtained that make it possible to predict changes in shaft size due to thermal expansion during operation and optimize the parameters of the repair process.

Keywords: gas turbine engine; shaft; powder metallurgy; direct laser cladding; coefficient of linear thermal expansion; linear energy; microstructure; macrostructure

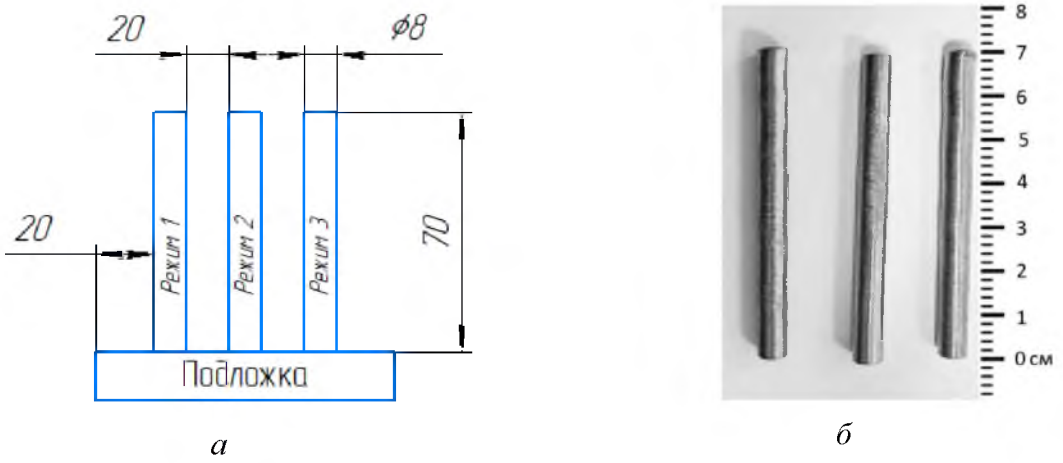
For citation: Negodyaev V.O., Illarionov D.V., Zhatkin S.S., Nikitin K.V. Influence of laser cladding modes on the coefficient of linear thermal expansion of EP648 material. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):63–72. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-63-72*

Введение

На предприятия двигателестроительной отрасли поступает большое количество газотурбинных установок для технического обслуживания, дефектовки и ремонта. Одним из характерных эксплуатационных дефектов является выработка от подшипников на валах, работающих при повышенных температурах [1]. Актуальность проблемы восстановления посадочных поверхностей валов обусловлена высокими требованиями к надежности газотурбинных двигателей (ГТД) и экономической целесообразностью продления ресурса дорогостоящих деталей. Для восстановления посадочных поверхностей валов есть несколько традиционных технологий, например, нанесение гальванических покрытий, плазменное напыление, наплавка под слоем флюса, прямая лазерная наплавка (ПЛН) и другие [2; 3]. Технология ПЛН по сравнению с традиционными методами обладает преимуществом при восстановлении деталей ГТД из-за меньших остаточных напряжений, высокой степени автоматизации, более высоких повторяемости результатов и точности [4 – 6]. Процесс прямой лазерной наплавки осуществляли за счет подачи МПК струей транспортирующего газа с помощью наплавочной головки непосредственно в ванну расплава, создаваемую сфокусированным лазерным лучом [7; 8].

Одним из самых важных вопросов при технологической подготовке производства перед восстановлением деталей является подбор металлопорошковой композиции для наплавки. Основными критериями при выборе наплавочного материала являются сварочно-технологические свойства, стоимость и механические характеристики нанесенного покрытия [9]. В настоящей работе рассматриваются два материала: ЭП648 (ХН50ВМТЮБ) в качестве наплавки и ЭП693 (ХН68ВМТЮК-ВД) как материал восстанавливаемого вала, работающего при температуре примерно 350 °С. Одним из самых важных свойств для выбора присадочного материала является коэффициент термического линейного расширения (КТЛР). Существенная разность в КТЛР у материала основания и наплавленного слоя может приводить к образованию холодных трещин как при нанесении материала, так и при последующей эксплуатации в условиях большого градиента термического циклирования [10]. Тепловое расширение металлов и сплавов является следствием асимметрии сил притяжения и отталкивания между атомами кристаллической решетки в процессе колебательных движений, совершаемых ими около положения равновесия. При повышении температуры, то есть увеличении энергии колебаний атомов, асимметрия сил притяжения и отталкивания смещается в сторону возрастания сил отталкивания, что приводит к увеличению смещения атомов относительно друг друга. Суммирование этих смещений по всей кристаллической решетке вызывает изменение объема и линейных размеров материала. Явление носит обратимый характер, а КТЛР зависит от химического состава, структуры, теплоемкости, температуры плавления и кипения, энергии химической связи и других факторов [11].

Целью настоящей работы является исследование влияния режимов ПЛН на КТЛР наплавляемого сплава ЭП648 и проведение сравнительного анализа со сплавом ЭП693.



а *б*

Рис. 1. Схема наплавки цилиндрических образцов (*а*) и внешний вид изготовленных образцов из МПК ЭП648 (*б*)
Fig. 1. Scheme of surfacing of cylindrical samples (*а*) and External appearance of manufactured samples from MPC EP648 (*б*)

Методы и принципы исследования

Для исследований КТЛР наплавляли заготовки в виде цилиндров высотой 70 мм и диаметром 8 мм из металлопорошковой композиции (МПК) марки ЭП648 (ТУ 78-265 – 2023) на подложку из стали марки Ст3 (рис. 1, *а*). Для сравнения КТЛР наплавленного материала с материалом вала была использована заготовка из прутка марки ЭП693 (ТУ 14-1-3759 – 84) в состоянии поставки, химический состав материалов приведен в табл. 1.

Из заготовок были изготовлены образцы для исследования КТЛР диаметром 7 мм и длиной 60 мм (рис. 1, *б*).

Наплавку проводили на роботизированном комплексе, включающем в себя робот-манипулятор и иттербиевый волоконный лазер. Режимы наплавки применяли в соответствии с рекомендациями работ [12] (табл. 2).

Измерение КТЛР материалов осуществляли на механическом дилатометре ДМ-1, собранном в лаборатории кафедры литейных и высокоэффективных технологий Самарского государственного технического университета [13]. Схема установки и основные ее элементы представлены на рис. 2.

Цилиндрический образец устанавливали между кварцевыми трубками *3* из плавленого кварца. При нагреве образца показания с устройства измерения *5* (цена деления 4,5 мкм) снимали через каждые 20 °С с выдержкой 5 мин. Показания температуры фиксировали с мультиметра *4*, который непосредственно подсоединен к термопаре *6*, контактирующей с исследуемым образцом. Полученные данные рассчитывали по следующим формулам:

$$\alpha = \frac{1}{l} \cdot \left(\frac{\Delta l}{\Delta T} \right);$$

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

где α – коэффициент термического линейного расширения; l – начальная длина образца; Δl – удлинение образца; T_1 и T_2 – текущая и начальная температуры образца.

Таблица 1

Химический состав МПК ЭП648 (ТУ 78-265 – 2023) и прутка ЭП693 (ТУ 14-1-3759 – 84)

Table 1. **Chemical composition of EP648 (TU 78-265-2023) and EP693 rod (TU 14-1-3759 – 84)**

Содержание элементов, %												
Ni	Cr	W	Al	Ti	Mo	Nb	Fe	C	S	P	Mn	Si
МПК ЭП648												
основа	32 – 35	4,3 – 5,3	0,5 – 1,1	0,5 – 1,1	2,3 – 3,3	0,5 – 1,1	≤4,0	≤0,1	≤0,01	≤0,015	≤0,5	≤0,4
Пруток ЭП693												
основа	17 – 20	5,0 – 7,0	1,6 – 2,3	1,1 – 1,6	3,0 – 5,0	≤0,1	≤5	≤0,1	≤0,015	≤0,015	≤0,4	≤0,5

Таблица 2

Режимы наплавки образцов

Table 2. **Specimen surfacing modes**

Параметр режима наплавки	Значение параметра для режима		
	1	*2*	*3*
Погонная энергия, Дж/мм	50	60	70
Шаг слоя, мм	0,4		
Ширина трека, мм	2,5		
Диаметр лазерного пятна, мм	2,6		
Расход порошка, г/мин	15,6		
Расход газа:			
в наплавочное сопло, л/мин	12,0		
на защитное стекло, л/мин	7,0		
транспортирующий газ, л/мин	5,0		

Измерения КТЛР на каждом образце проводили в течение 4 ч при температуре от 25 до 400 °С. Погрешность измерения составляет 0,1 – 1,0 °С. Максимальная температура эксперимента выбрана исходя из условий работы вала КВД и возможных критических условий эксплуатации. Для фиксирования показателя T_1 использовали термопару ТХА (тип К), рабочий элемент которой изготовлен из сплава хромель-алюмель, позволяющей проводить измерения в диапазоне температур от –200 до 1000 °С при чувствительности до 50 мкВ/°С.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 3 представлены данные изменения КТЛР образцов из МПК ЭП648 и прутка марки ЭП693 в диапазоне температур 25 – 400 °С. Замеры КТЛР позволили выявить существенные сходства в термическом поведении образцов из ЭП693 и ЭП648. Сравнительный анализ показал, что характер изменения КТЛР тесно связан с режимом наплавки.

Образец из прутка марки ЭП693 показывает наиболее низкие и стабильные КТЛР во всем интервале (25 – 400 °С). При температуре 100 °С коэффициент составил примерно $8 \cdot 10^{-6}$ °С$^{-1}$, при 400 °С – около $12 \cdot 10^{-6}$ °С$^{-1}$. Это объясняется равномерной структурой с однородным распределением фазы и карбидных частиц, что согласуется с данными по никелевым жаропрочным сплавам [14; 15]. В рассматриваемых образцах формируются относительно крупные, но равноосные зер-

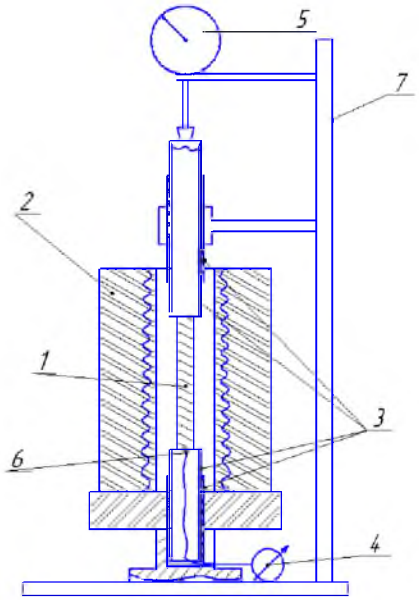


Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения КТЛР:
1 – образец; *2* – электрический нагреватель; *3* – кварцевые трубки; *4* – мультиметр;
5 – устройство измерения перемещения часового типа; *6* – термопара; *7* – штатив
Fig. 2. Experimental setup for measuring the CTLR:
1 – sample; *2* – electric heater; *3* – quartz tubes; *4* – multimeter; *5* – clock-type displacement measuring device;
6 – thermocouple; *7* – stand

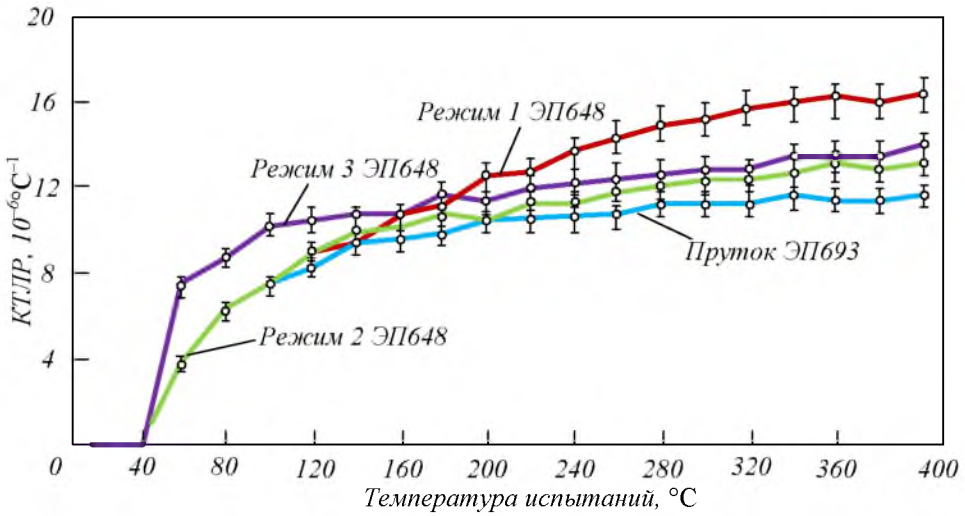


Рис. 3. Изменения КТЛР образцов в зависимости от температуры испытаний
Fig. 3. Changes in the coefficient of thermal expansion of samples depending on the test temperature

на, что способствует низкому уровню остаточных напряжений [16].

Образец, наплавленный по режиму *1* при погонной энергии 50 Дж/мм, характеризуется формированием структуры с низким уровнем тепловложений. При такой мощности энергия излучения оказывается недостаточной для обеспечения равномерного перераспределения жидкой фазы по всему объему наплавленного слоя. В результате в структуре образца наблюдается наличие выраженных дендритных ячеек, формирующихся в условиях ускоренной направленной кристаллизации. Однако решающим фактором при рассматриваемых режимах становятся не столько особенности дендритной морфологии (визуально близкой во всех образцах), сколько дефекты наплавки, напрямую влияющие на неравномерное увеличение КТЛР при повышении температуры.

Недостаточное тепловложение ограничивает процесс расплавления МПК и уменьшает время затвердевания ванны расплава, что способствует появлению микропористости [17]. В микроструктуре образца (рис. 4), наплавленного по режиму *1*, встречаются поры, которые нарушают однородность материала. На образце обнаружены микротрещины, возникающие вследствие термических напряжений и недостаточной пластичности материала при кристаллизации. Термические напряжения, формирующиеся в процессе охлаждения, концентрируются в областях с неоднородной структурой, приводя к образованию микротрещин [18]. В свою очередь низкая пластичность материала в зоне термического влияния способствует хрупкому разрушению при кристаллизационных деформациях [19].

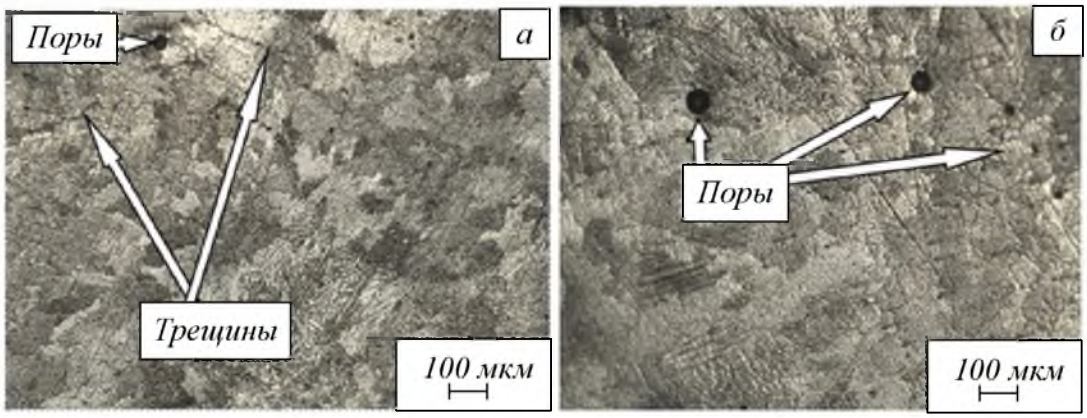


Рис. 4. Микроструктура образца из сплава ЭП648, наплавленного по режиму *1*:
а –трещины; *б* – поры
Fig. 4. Microstructure of a sample of EP648, deposited in mode *1*:
а –cracks; *б* – pores

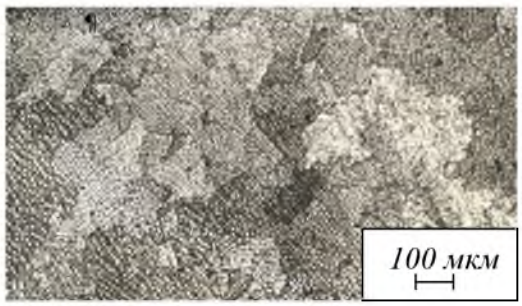


Рис. 5. Микроструктура образца из ЭП648, наплавленного по режиму *2*
Fig. 5. Microstructure of a sample of EP648, deposited in mode *2*

Поры и трещины становятся концентраторами напряжений и нарушают равномерность распределения напряженно-деформированного состояния при нагреве. Все это приводит к повышенной восприимчивости материала к термическим колебаниям и проявляется в завышенных КТЛР по сравнению с образцами из прутка марки ЭП693.

Образец, наплавленный по режиму *2* при погонной энергии 60 Дж/мм, показал наиболее близкие результаты к образцу из прутка. При температурах 300 – 400 °С КТЛР находился в диапазоне $(12 \div 13)\cdot 10^{-6}$ °С$^{-1}$, а характер изменения был равномерным по мере повышения температуры. При рассматриваемых условиях формируется однородная дендритная практически бездефектная структура материала (рис. 5).

Образец *3* наплавлен при погонной энергии 70 Дж/мм. Тепловложения при этом оказались чрезмерны. Перегрев материала в свою очередь приводит к образованию трещин (рис. 6) [20]. В процессе охлаждения формируются выраженные температурные градиенты, способствующие развитию сегрегации и повышенному уровню остаточных напряжений. Это приводит к более высоким КТЛР, который при температуре 400 °С достигает примерно $14\cdot 10^{-6}$ °С$^{-1}$ (рис. 3).

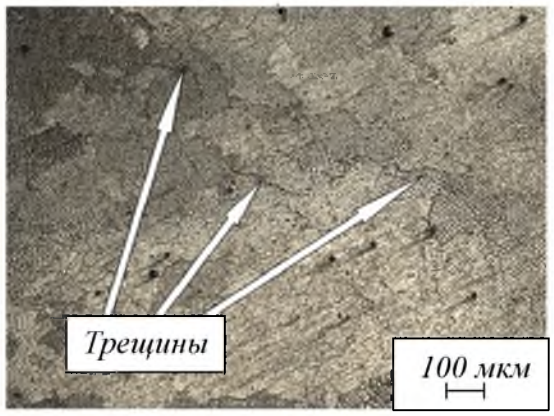


Рис.6. Микроструктура образца из ЭП648, наплавленного по режиму *3*
Fig. 6. Microstructure of a sample of EP648, deposited in mode *3*

Наибольшие различия в значениях КТЛР наплавленных образцов и прутка наблюдаются для режима *1*, для режимов *2* и *3* различия (особенно при высоких температурах) незначительны.

На основе экспериментальных данных в Mathcad были построены регрессионные зависимости КТЛР от температуры в указанном диапазоне полиномами вида:

$$\alpha(T) = \sum_{i=0}^{k} b_i T^i ,$$

где b – коэффициенты полинома; k – порядок полинома; T – температура нагрева.

Расчеты показали, что экспериментальные КТЛР хорошо описываются полиномом третьего порядка с коэффициентом корреляции расчетных и экспериментальных данных близким к единице:

$$\alpha(T) = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + b_3 T^3 ;$$

$$\alpha(T)_{\text{вала}} = -3{,}537\cdot 10^{-6} + 1{,}513\cdot 10^{-7}\cdot T - 5{,}253\cdot 10^{-10}\cdot T^2 + 6{,}097\cdot 10^{-13}\cdot T^3 ;$$

$$\alpha(T)^1_{\text{наплавки}} = -3{,}074\cdot 10^{-6} + 1{,}299\cdot 10^{-7}\cdot T - 3{,}148\cdot 10^{-10}\cdot T^2 + 2{,}812\cdot 10^{-13}\cdot T^3 ;$$

$$\alpha(T)^2_{\text{наплавки}} = -3{,}768\cdot 10^{-6} + 1{,}574\cdot 10^{-7}\cdot T - 5{,}369\cdot 10^{-10}\cdot T^2 + 6{,}293\cdot 10^{-13}\cdot T^3 ;$$

$$\alpha(T)^3_{\text{наплавки}} = -3{,}497\cdot 10^{-6} + 1{,}883\cdot 10^{-7}\cdot T - 7{,}310\cdot 10^{-10}\cdot T^2 + 9{,}329\cdot 10^{-13}\cdot T^3 .$$

где $\alpha(T)_{\text{вала}}$, $\alpha(T)^1_{\text{наплавки}}$, $\alpha(T)^2_{\text{наплавки}}$, $\alpha(T)^3_{\text{наплавки}}$ – коэффициенты теплового расширения материала вала (ЭП693), материала наплавки (ЭП648) по режимам *1 – 3*.

На основе построенных зависимостей проведена оценка удлинения окружности вала без и с наплавленным слоем по формуле, вытекающей из выражения для истинного значения КТЛР:

$$\alpha(T) = \frac{1}{L_0}\frac{dl}{dT},$$

При начальной длине окружности L_0 увеличение ее длины будет определяться по следующему выражению:

$$\Delta L = L_0 \int_{T_н}^{T_к} \alpha(T)\,dT, \qquad (6),$$

где $T_н$ = 25 °С и $T_к$ = 400 °С – начальная и конечная температуры при нагреве.

При диаметре вала D = 170 мм начальная длина окружности составила 534,07 мм. Увеличение диаметра вала рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta D = \frac{\Delta L}{\pi}.$$

Расчетное увеличении диаметра образцов при нагреве до температуры 400 °С составляет для прутка – 0,58 мм; для режимов наплавки *1 – 3* – 0,73; 0,63; 0,69 мм.

Наименьшие различия в увеличении размеров вала и наплавленного материала за счет теплового расширения наблюдается при наплавке по режиму *2* с погонной энергией 60 Дж/мм. Это позволяет предположить, что уровень напряжений, возникающий из-за различия в КТЛР материалов вала и наплавки, минимальным.

Выводы

Образцы, полученные методом ПЛН из сплава ЭП648, демонстрируют термическое поведение, аналогичное образцу из прутка марки ЭП693, что указывает на корректный выбор материала при восстановлении вала методом ПЛН. Установлено влияние погонной энергии лазерного пучка на изменение КТЛР наплавленного материала при нагреве от 25 до 400 °С. При погонной энергии 50 Дж/мм образец имеет существенно повышенные КТЛР (примерно $(16 \div 17)\cdot 10^{-6}$ °С$^{-1}$ при температуре 400 °С), что связано с наличием микропористости и трещин. Образец, наплавленный при погонной энергии 60 Дж/мм, демонстрирует наиболее сбалансированные результаты (примерно $(12 \div 13)\cdot 10^{-6}$ °С$^{-1}$ в диапазоне температур 300 – 400 °С) благодаря оптимальному соотношению глубины проплавления и скорости кристаллизации, что обеспечивает плотную и однородную структуру. При этом различия в КТЛР наплавленного ЭП648 и материала вала ЭП693 минимальны. При погонной энергии 70 Дж/мм образец *3* показывает повышенный рост КТЛР (примерно $14\cdot 10^{-6}$ °С$^{-1}$ при температуре 400 °С), что может быть связано с перегревом материала при рассматриваемом режиме наплавки и, как следствие, формированием крупных дендритов, а также появлением пор и микротрещин. Эти дефекты в свою очередь приводят к повышению КТЛР. На основе расчетных данных, полученных по регрессионным зависимостям КТЛР от температуры в виде полиномов третьего порядка, в указанном диапазоне температур установлено, что изменение размеров зон наплавки ЭП648 минимальны для режима лазерного воздействия с погонной энергией 60 Дж/мм. В этом случае уровень напряжений в зоне наплавки будет минимальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слепова А.Ш. Анализ факторов, влияющих на износ подшипников. *Наука, техника и образование*. 2017; 10(40):28–33.
2. Zhao Changlong, Yang Junbao, Li Ming, Zhao Qinxiang, Ma Hongnan, Jia Xiaoyu, Zhang Haifeng. Advances in Surface Laser Cladding Remanufacturing of Shaft Parts. *Manufacturing Technology*. 2023;23. *https://doi.org/10.21062/mft.2023.037.*
3. Молодык Н.В., Зенкин А.С. *Восстановление деталей машин*. Москва: Машиностроение. 2022:480
4. Saboori A, Aversa A, Marchese G, Biamino S, Lombardi M, Fino P. Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair. *Applied Sciences*. 2019;9(16). *https://doi.org/10.3390/app9163316*
5. Jiang, P.F. Zhang C.H., Zhang, S., Zhang J.B., Chen J., Liu Y. Microstructure evolution, wear behavior, and corrosion performance of alloy steel gradient material fabricated by direct laser deposition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):11702–11716. *https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.074*
6. Ribeiro K., Mariani F., Idogava H., Silva G., Silveira Z., Lima M., Coelho R. Evaluation of laser polishing as post-processing of Inconel 625 produced by Directed Energy Deposition. *Procedia Manufacturing*. 2021;53(3):368–374. *https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.040*
7. Piscopo G., Atzeni E., Biamino S., Iuliano L., Mazzucato F. Saboori A., Salmi A., Valente A. Analysis of single tracks of IN718 produced by laser powder directed energy deposition process. *Procedia CIRP*. 2022;112:340–345. *https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.006*
8. Vundru Ch., Singh R., Yan W., Karagadde Sh. Effect of spreading of the melt pool on the deposition characteristics in laser directed energy deposition. *Procedia Manufacturing*. 2021;53:407–416. *https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.043*
9. Иванов В.П., Кастрюк А.П., Вигерина Т.В. Выбор материала для восстановления валов наплавкой с учетом его физико-механических свойств. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. 2014;11:85–90.
10. Силенский М.И., Латыпов Р.А. Выбор жаропрочного сплава для реновации гребешков лопаток турбин высокого давления лазерной наплавкой. Современные проблемы и

направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов. В кн.: *Сборник научных статей 4-й Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика А.А. Байкова, Курск, 15 сентября 2023 г.* Курск: Юго-Западный государственный университет. 2023:140–146.

11. Иванов В.П., Вигерина Т.В. Коэффициент термического расширения и внутренние напряжения материала покрытий из порошковых материалов. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. 2007;2:62–66.
12. Негодяев В.О., Селеменев Р.Ю., Жаткин С.С., Никитин К.В., Долинский В.А. Исследование наследственного влияния структуры исходной металлопорошковой композиции и параметров лазерной наплавки на качество наплавленных слоев сплава марки ЭП648. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;3(53):63–72. *https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-63-72*
13. Климов В.Г. Структура и свойства восстановленных лазерной наплавкой лопаток газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов: автореф. дис. канд. техн. наук. Самара, 2019:17.
14. Геллер Ю.А. *Жаропрочные никелевые сплавы*. Москва: Наука. 2008:368.
15. Pollock T.M., Tin S. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties. *Journal Propulsion and Power*. 2006;22(2):361–374. *https://doi.org/10.2514/1.18239*
16. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Латышев В.Б., Чабина Е.Б. Жаропрочные деформируемые сплавы для горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД). В кн.: *75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды 1932 – 2007*. Москва: «ВИАМ». 2008:59–65.
17. Baranov D.A., Zatkin S.S., Parkin A.A. Analysis of Defected at Laser Welding of Heat-Resistant Alloy KhN45VMTYuBR. *Materials engineering and Technologies for Production and Processing*. 2021:108–114. *https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.108*
18. Henderson M. B., Arrell D., Heobel M. Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications. *Science Technology of Welding and Joining*. 2004; 9(1):13–21. *https://doi.org/10.1179/136217104225017099*
19. Sashank S. Sravan, Rajakumar S., Karthikeyan R., Nagaraju D. S. Weldability, mechanical properties and microstructure of nickel based super alloys: A review. *2nd International Conference on Design and Manufacturing Aspects for Sustainable Energy (ICMED 2020)*. 2020;184(2):1–3 *https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018401040*
20. Rottwinkel Boris, Noelke Christian, Kaierle Stefan, Wesling Volker. Crack Repair of Single Crystal Turbine Blades Using Laser Cladding Technology. *Procedia CIRP*. 2014;22. *https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.151.*

REFERENCES

1. Slepova A.Sh. Analysis of factors affecting bearing wear. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*. 2017; 10(40):28–33. (In Russ.).
2. Zhao Changlong, Yang Junbao, Li Ming, Zhao Qinxiang, Ma Hongnan, Jia Xiaoyu, Zhang Haifeng. Advances in Surface Laser Cladding Remanufacturing of Shaft Parts. *Manufacturing Technology*. 2023;23. *https://doi.org/10.21062/mft.2023.037.*
3. Molodyk N.V., Zenkin A.S. *Machine parts restoration*. Moscow: Mashinostroenie. 2022:480.(In Russ.).
4. Saboori A, Aversa A, Marchese G, Biamino S, Lombardi M, Fino P. Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair. *Applied Sciences*. 2019;9(16). *https://doi.org/10.3390/app9163316*
5. Jiang, P.F. Zhang C.H., Zhang, S., Zhang J.B., Chen J., Liu Y. Microstructure evolution, wear behavior, and corrosion performance of alloy steel gradient material fabricated by direct laser deposition. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):11702–11716. *https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.074*
6. Ribeiro K., Mariani F., Idogava H., Silva G., Silveira Z., Lima M., Coelho R. Evaluation of laser polishing as post-processing of Inconel 625 produced by Directed Energy Deposition. *Procedia Manufacturing*. 2021;53(3):368–374. *https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.040*
7. Piscopo G., Atzeni E., Biamino S., Iuliano L., Mazzucato F. Saboori A., Salmi A., Valente A. Analysis of single tracks of IN718 produced by laser powder directed energy deposition process. *Procedia CIRP*. 2022;112:340–345. *https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.006*
8. Vundru Ch., Singh R., Yan W., Karagadde Sh. Effect of spreading of the melt pool on the deposition characteristics in laser directed energy deposition. *Procedia Manufacturing*. 2021;53:407–416. *https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.043*

9. Ivanov V.P., Kastryuk A.P., Vigerina T.V. Selection of material for shaft restoration by surfacing, taking into account its physical and mechanical properties. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V Promyshlennost'. Prikladnye nauki*. 2014; 11:85–90. (In Russ.).
10. Silenskii M.I., Latypov R.A. Selecting a heat-resistant alloy for laser cladding renovation of high-pressure turbine blade ridges. Current challenges and development trends in metallurgy and heat treatment of metals and alloys. *Collection of scientific articles from the 4th International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Academician A.A. Baikov, Kursk, September 15, 2023*. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet. 2023:140–146.(In Russ.).
11. Ivanov V.P., Vigerina T.V. Thermal expansion coefficient and internal stresses of powder coating material. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki*. 2007;2. (In Russ.).
12. Negodyaev V.O., Selemenev R.Yu., Zhatkin S.S., Nikitin K.V., Dolinskii V.A. A study of the hereditary influence of the structure of the initial metal-powder composition and laser surfacing parameters on the quality of deposited layers of EP648 alloy. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2025; 3(53):63–72. (In Russ.). *https://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-63-72*
13. Klimov V.G. The structure and properties of the blades of gas turbine engines made of heat-resistant alloys restored by laser surfacing: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Samara, 2019:17. (In Russ.).
14. Geller Yu.A. Heat-resistant nickel alloys. Moscow: Nauka. 2008:368. (In Russ.).
15. Pollock T.M., Tin S. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties. *Journal Propulsion and Power*. 2006;22(2):361–374. *https://doi.org/10.2514/1.18239*
16. Lomberg B.S., Ovsepyan S.V., Latyshev V.B., Chabina E.B. Heat-resistant wrought alloys for the hot tract of gas turbine engines (GTE). *In the book: 75 years. Aviation materials. Selected works 1932-2007.* Moscow: «VIAM». 2008:59–65. (In Russ.). *https://doi.org/10.1007/s11015-013-9779-9*
17. Baranov D.A., Zhatkin S.S., Parkin A.A. Analysis of the results obtained during laser welding of heat-resistant alloy KhN45MVTYuBR. In: *Forum on Defects and Diffusion (Materials Development and Technology for Manufacturing and Processing*, VII, Switzerland, August 17, 2021.). 2021:108–114. (In Russ.). *https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.108*
18. Henderson M. B., Arrell D., Heobel M. Nickel based superalloy welding practices for industrial gas turbine applications // Science Technology of Welding and Joining. 2004; 9(1):13–21. *https://doi.org/10.1179/136217104225017099*
19. Sashank S. Sravan, Rajakumar S., Karthikeyan R., Nagaraju D. S. Weldability, mechanical properties and microstructure of nickel based super alloys: A review. *2nd International Conference on Design and Manufacturing Aspects for Sustainable Energy (ICMED 2020)*. 2020; 184(2): 1–3. *https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018401040*
20. Rottwinkel Boris, Noelke Christian, Kaierle Stefan, Wesling Volker. Crack Repair of Single Crystal Turbine Blades Using Laser Cladding Technology. *Procedia CIRP*. 2014;22. *https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.151.*

Сведения об авторах:

***Вадим Олегович Негодяев**, аспирант кафедры литейных и высокоэффективных технологий,* Самарский государственный технический университет, *начальник бюро сварки и пайки, ПАО «ОДК-Кузнецов»*
***E-mail**:* vadim031198@gmail.com
***ORCID**:* 0009-0007-6537-0079
***SPIN-код**:* 7814-4770

***Дмитрий Владимирович Илларионов**, магистр кафедры литейных и высокоэффективных технологий,* Самарский государственный технический университет, *инженер-технолог, ПАО «ОДК-Кузнецов»*
***E-mail**:* ya@illarionov-1.ru
***ORCID**:* 0009-0005-9941-6501

***Сергей Сергеевич Жаткин**, к.т.н., профессор кафедры литейных и высокоэффективных технологий,* Самарский государственный технический университет
***E-mail**:* sergejat@mail.ru
***ORCID**:* 0000-0001-5625-848X
***SPIN-код**:* 9405-6857

***Константин Владимирович Никитин**, д.т.н., профессор кафедры литейных и высокоэффективных технологий, декан факультета машиностроения, металлургии и транспорта,* Самарский государственный технический университет
***E-mail**:* kvn-6411@mail.ru
***ORCID**:* 0000-0001-7061-0144
***SPIN-код**:* 8126-2109

Information about the authors:

***Vadim O. Negodyaev**, Postgraduate student of the Department of Foundry and High-Efficiency Technologies,* Samara State Technical University, *Head of the Welding and Soldering Bureau,* PJSC UEC-Kuznetsov

E-mail: vadim031198@gmail.com
ORCID: 0009-0007-6537-0079

Dmitry V. Illarionov, *Master's student of the Department of Foundry and High-Efficiency Technologies, Samara State Technical University, Process Engineer,* PJSC UEC-Kuznetsov
E-mail: ya@illarionov-1.ru
ORCID: 0009-0005-9941-6501

Sergey S. Zhatkin, *Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Foundry and High-Performance Technologies,* Samara State Technical University
E-mail: sergejat@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5625-848X
SPIN-код: 9405-6857

Konstantin V. Nikitin, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Foundry and High-Efficiency Technologies, Dean of the Faculty of Mechanical Engineering, Metallurgy and Transport,* Samara State Technical University
E-mail: kvn-6411@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7061-0144
SPIN-код: 8126-2109

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

Поступила в редакцию 13.12.2025
После доработки 23.01.2026
Принята к публикации 26.01.2026

Received 13.12.2025
Revised 23.01.2026
Accepted 26.01.2026

Оригинальная статья

УДК: 544.778.4:662.66

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-73-83

ЗАВИСИМОСТЬ ЗОЛЬНОСТИ УГЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ МЕТАМОРФИЗМА ОТ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

© 2026 г. Р. Ю. Ковалев, А. П. Никитин, А. Н. Заостровский

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

Аннотация. Дефицит традиционных коксующихся углей обуславливает необходимость вовлечения в состав коксовых шихт низко метаморфизованных углей марок ДГ, Г и Ж, технологические свойства которых существенно зависят от гранулометрического состава. В связи с этим исследование распределения зольности и выхода летучих веществ по фракциям различной дисперсности приобретает как фундаментальное, так и прикладное значение. Методом седиментации в жидкой среде из исходных угольных порошков выделены узкие фракции с преобладающим размером частиц от 0,5 до 5,0 мкм. Контроль гранулометрического состава осуществляли методом сканирующей электронной микроскопии; зольность и выход летучих веществ определяли по стандартным методикам технического анализа. Установлено, что характер зависимости зольности от размера частиц определяется маркой угля. Для образцов ДГ и Г при уменьшении размера частиц менее 1 мкм наблюдается резкое увеличение зольности, обусловленное накоплением высокозольных минеральных компонентов в тонких классах. В отличие от них, у угля марки Ж зольность наиболее тонких фракций снижается, приближаясь к показателям исходного угля, что указывает на иной характер распределения минеральной массы. Показано, что седиментационное разделение позволяет снизить зольность высокозольного угля марки Г на 7 – 8 % за счет удаления тонких высокозольных фракций. Обоснована перспективность использования ультрадисперсной фракции угля марки Ж с размером частиц около 1 мкм в качестве компонента коксовой шихты, что позволяет регулировать ее состав без ухудшения зольности.

Ключевые слова: уголь, седиментация, технический анализ, выход летучих веществ, зольность углей

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН (временный номер регистрации проекта № 1023032300042-4-1.4.3).

Благодарность. Исследования проводились на оборудовании ЦКП ФИЦ УУХ СО РАН.

Для цитирования: Ковалев Р.Ю., Никитин А.П., Заостровский А.Н. Зависимость зольности углей различной степени метаморфизма от гранулометрического состава. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):73–83. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-73-83*

Original article

DEPENDENCE OF THE ASH CONTENT OF COALS OF VARIOUS DEGREE OF METAMORPHISM ON THE GRANULOMETRIC COMPOSITION

© 2026 R. Yu. Kovalev, A. P. Nikitin, A. N. Zaostrovsky

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

Abstract. The shortage of traditional coking coals necessitates the inclusion of low-metamorphosed coals of grades DG, G and Zh in the composition of coke charges, the technological properties of which significantly depend on the granulometric composition. In this regard, the study of the distribution of ash content and the yield of volatile substances by fractions of various dispersities acquires both fundamental and applied importance. By the method

of sedimentation in a liquid medium, narrow fractions with a predominant particle size from 0.5 to 5.0 microns were isolated from the initial coal grains. The granulometric composition was monitored by scanning electron microscopy; the ash content and yield of volatile substances were determined using standard technical analysis methods. It has been established that the nature of the dependence of ash content on particle size is determined by the brand of coal. For DH and G samples, with a decrease in particle size of less than 1 microns, there is a sharp increase in ash content due to the accumulation of high-ash mineral components in fine grades. In contrast, the ash content of the thinnest fractions of W grade coal decreases, approaching the indicators of the initial coal, which indicates a different nature of the distribution of mineral mass. It is shown that sedimentation separation reduces the ash content of high-ash grade G coal by 7 – 8 % due to the removal of fine high–ash fractions. The prospects of using an ultrafine fraction of W grade coal with a particle size of about 1 microns as a component of the coke charge are substantiated, which makes it possible to regulate its composition without deterioration of ash content.

Keywords: coal, sedimentation, technical analysis, volatile matter yield, ash content of coal

Funding. The work was carried out as part of the implementation of the state assignment of the ICCMS FRC CCC SB RAS (temporary registration number of the project No. 1023032300042-4-1.4.3).

Acknowledgements. The research was carried out on the equipment of the CCUof the FRC CCC SB RAS.

For citation: Kovalev R.Yu., Nikitin A.P., Zaostrovsky A.N. Dependence of the ash content of coals of varying degrees of metamorphism on the granulometric composition. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):73–83. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-73-83*

Введение

Дефицит традиционного коксующегося сырья обуславливает необходимость включения в шихту коксования углей низкой и средней степени метаморфизма (марок ДГ, Г, Ж) [1; 2]. Ключевым фактором, влияющим на качество конечного продукта, является гранулометрический состав шихты. Исследования показывают неоднозначный эффект мелких фракций: с одной стороны, исключение класса 0 – 5 мм может повысить горячую прочность кокса (CSR) [3], с другой – увеличение содержания частиц 0 – 3 мм в шихте из углей марок Г, Ж, К до 85 % позволяет улучшить показатели дробимости $M_{25} > 90$ % и истираемости $M_{10} < 7$ % [1; 4]. Отсев наиболее мелкой фракции (менее 0,5 мм) даже на 4 % для шихт из углей марок ДГ и Д способствует росту величины M_{25} на 3 % и снижению параметра M_{10} на 2 % [5]. В связи с этим представляет интерес оценка перспектив использования ультрадисперсных фракций (менее 0,1 мм) неспекающихся углей марок ДГ и Г.

Однако применение тонких классов осложняется проблемой повышенной зольности. Многочисленные исследования, использующие как сухое [6; 8], так и мокрое [7; 9] разделение, демонстрируют закономерный рост зольности с уменьшением размера частиц. При измельчении угля до класса менее 0,05 мм зольность увеличивается на 2 % [6], а для фракций 0 – 0,5 мм, представляющих собой отходы обогащения, может достигать 71,9 % [7]. Аналогичная тенденция наблюдается для угля марки Г, где зольность возрастает с 8,6 для класса 0,5 – 1,0 мм до 31,2 % для частиц менее 0,05 мм [8]. Мокрое диспергирование углей марок Д и Г приводит к росту зольности с 15 до 80 % при переходе от класса 3 к 0 – 0,05 мм [9]. Более высокая зольность фракции после сухого размола более 6 мм по сравнению с классом менее 3 мм для шихт [10] указывает на необходимость детального изучения влияния размерного состава различных марок угля.

Процессы разделения тесно связаны с физико-химическими свойствами поверхности угольных частиц. Установлено, что в фракциях менее 0,04 мм преобладают частицы размером 18,9 – 23,78 мкм в зависимости от марки угля [11]. Эффективность разделения (расслоение в жидкой среде) существенно зависит от размера: доля оседающих частиц возрастает с 15 % для класса 20 – 40 мм до 75 % для класса 120 – 180 мм [12]. Важнейшую роль играет смачиваемость, определяющая ход процессов флотации, агломерации и сепарации [13]. Гидрофобность угля может снижаться для ультрадисперсных частиц из-за роста удельной поверхности [14]. С помощью модели жидкости Гершеля-Балкли в сочетании с параметром вязкости была выведена формула прогнозирования вязкости угольных суспензий, полученных путем растворения в воде угольных частиц различных размеров [15]. Установлено, что при различном соотношении крупных и мелких частиц угля в пульпе при определенной концентрации (58 %) существует минимальное значение вязкости угольной суспензии, при этом расчетное значение и максимальное отклонение от измеренного значения составляют 5,23 % [15]. В работе [16]

представлены результаты экспериментов по установлению влияния размера частиц на характеристики течения пылевидного угля. В качестве экспериментальных материалов использовали серию образцов пылевидного угля со средним размером частиц в диапазоне 18 – 224 мкм, энергия базовой текучести отражало взаимодействие частиц друг с другом в жидком потоке. Показано, что энергия базовой текучести увеличивается с повышением максимального размера частиц [16]. В работе [17] показано, что насыпная плотность и предел текучести водоугольной суспензии уменьшались с повышением максимального размера угольных частиц. В работе [18] установлено, что метод с использованием псевдоожиженного слоя с плотной воздушной средой не подходит для обогащения угля размером менее 1 – 13 мм, поскольку эффективность разделения резко снижается при размере частиц угля менее 13 мм, процесс становится неэкономичным. В работе [19] показано, что кумулятивная функция распределения частиц углей повышается при увеличении размера угольных частиц и от скорости удара.

Особый интерес представляет влияние размера частиц на нагрев углей, при котором более мелкие частицы с большей вероятностью образовывали частицы угольного остатка большего размера, чем они сами, а более крупные частицы угля имели большую склонность к фрагментации [20]. Однако для исследованных в настоящей работе размеров от 0,5 до 2,8 мм установлено, что поведение при пиролизе и газификации существенно не меняется в зависимости от размера частиц [20].

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью поиска компромисса между положительным влиянием мелких фракций на прочностные характеристики кокса и негативным на его зольность, а также потребностью в эффективных методах получения и сепарации ультрадисперсных классов угля.

Проведено исследование зависимости состава от размера частиц для углей марок ДГ, Г и Ж. Фракции различной дисперсности получали сухим (размол) и мокрым (седиментация) способами с последующим анализом зольности и выхода летучих веществ. Целью настоящей работы является установление закономерности изменения технического состава углей в зависимости от дисперсности их частиц и оценка перспективности метода седиментации для получения низкозольных тонких классов, пригодных для использования в коксовой шихте.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали угли марок ДГ (Соколовское месторождение, ООО УК «Сибкоул»), Г (Ленинское месторождение, шахта «Заречная») и Ж (Никитинское месторождение, шахта им. С.Д. Тихова).

Первичное измельчение образцов проводили в шаровой мельнице Fritsch Pulverisette-6 с последующим фракционированием на виброситах для получения порошков с максимальным размером частиц 100 мкм. Такую фракцию подвергали доизмельчению аналогичным методом до максимального размера частиц 63 мкм. Полученные порошки характеризовались широким распределением частиц по размерам.

Для выделения узких фракций с более однородным гранулометрическим составом применяли методику седиментации в жидкой среде. Процедура включала следующие этапы:

1. Образец угля массой 10 г диспергировали в 100 мл дистиллированной воды. Для улучшения смачивания угля водой в систему вводили технический спирт (1 мл для углей марок ДГ и Г) или ацетон (0,5 мл для угля марки Ж). Суспензию обрабатывали в ультразвуковой ванне Сапфир в течение 20 мин.

2. Суспензию отстаивали в течение заданного времени (1 или 2 ч), в течение которого происходило осаждение крупных частиц под действием силы тяжести.

3. Верхний полупрозрачный слой, содержащий мелкие частицы, аккуратно отбирали пипеткой, переносили в чашки Петри и высушивали до постоянной массы при температуре 110 °С в течение 2 ч с последующей выдержкой на воздухе в течение 8 ч.

4. Процедуру (повторное диспергирование осадка, отстаивание и отбор верхнего слоя) повторяли до полного осветления жидкости для максимизации выхода целевой фракции. Ввиду малого выхода узких фракций (0,3 – 1,0 г на цикл, табл. 1, где d – размер частиц угля) циклы седиментации повторяли для накопления достаточной для анализа навески.

Размеры частиц в исходных порошках и выделенных узких фракциях контролировали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JEOL JSM-6390 LV в ЦКП Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН. Для каждой фракции строили гистограммы распределения частиц по размерам, на основании которых определяли максимум распределения (d_{md}) и максимальный наблюдаемый размер частиц (d_{max}). В качестве основного раз-

Таблица 1

Выходы узких фракций после седиментации различных марок углей

Table 1. **Outputs of narrow fractions after sedimentation of various coal grades**

Марка угля	Время седиментации, ч	Выход узкой фракции, г (%)
ДГ ($d \leq 100$ мкм)	2	0,3 (3)
Г ($d \leq 100$ мкм)	2	0,5 (5)
Ж ($d \leq 100$ мкм)	2	1,0 (10)

Таблица 2

Гранулометрические характеристики узких фракций угля марки Ж

Table 2. **Granulometric characteristics of narrow fractions of Zh-grade coal**

Исходная фракция	Время седиментации, ч	d_{md}, мкм	d_{max}, мкм
$d \leq 100$ мкм	1	2,3	6
$d \leq 63$ мкм	2	0,5	5

мерного параметра (d_i), используемого в дальнейшем для анализа, был принят максимум распределения d_{md}. Репрезентативные данные по фракциям угля марки Ж приведены в табл. 2.

Для всех полученных фракций определяли стандартные показатели качества: зольность (A^d) по ГОСТ Р 55661 – 2013; влажность (W^a) по ГОСТ Р 52911 – 2020; выход летучих веществ (V^{daf}) по ГОСТ Р 55660 – 2013.

Результаты и обсуждение

Применение метода седиментации позволило эффективно уменьшить максимальный размер частиц во всех исследуемых порошках. Увеличение времени отстаивания с 60 до 120 мин приводило к закономерному снижению класса крупности получаемых фракций (табл. 3).

Наиболее выраженный эффект наблюдался для угля марки ДГ, где класс крупности уменьшился на порядок. Для углей марок Г и Ж (особенно для исходной фракции 0 – 63 мкм) увеличение времени седиментации свыше 60 мин не приводило к существенному дальнейшему уменьшению размера частиц (например, для угля марки Ж класс оставался 0 – 5 мкм). Это может быть обусловлено агрегацией мелких гидрофобных частиц в водной среде или их адгезией к более крупным, что особенно характерно для угля марки Ж.

Данные СЭМ-анализа и построенные гистограммы распределения (рис. 1) количественно подтверждают эту тенденцию. Анализ зависимостей логарифма характерного (d_i) и максимального (d_{max}) размеров от времени седиментации (рис. 2) показывает их линейное уменьшение. При этом значимое снижение параметра d_i к 120-ой минуте отмечается для углей марок ДГ и Г, а существенное уменьшение параметра d_{max} – только для угля марки ДГ, что дополнительно свидетельствует о различном поведении частиц разных марок в процессе седиментации.

Ключевым результатом работы является установление неоднозначной зависимости зольности от размера частиц, которая существенно отличается для разных марок угля (рис. 3).

Для углей марок ДГ и Г наблюдается четкая тенденция к росту зольности при уменьшении размера частиц менее 1 мкм ($\ln(d_i) < 0$), что объясняется концентрированием минеральных примесей в наиболее тонких фракциях [9]. Примечательно, что для угля марки Г размол исходной фракции d_i примерно от 100 до 63 мкм уже приводило к скачкообразному росту зольности с 29 до 38 %.

Таблица 3

Классы исходных углей и после седиментации

Table 3. **Classes of source coals and after sedimentation**

Марка угля	Класс исходного угля, мкм	Длительность седиментации, мин	Класс после седиментации угля, мкм
ДГ	0 – 100	60	0 – 5
		120	0 – 0,5
	0 – 63	60	0 – 3
Г	0 – 100	60	0 – 8
		120	0 – 4
	0 – 63	60	0 – 5
		120	0 – 4,5
Ж	0 – 100	60	0 – 6
		120	0 – 5
	0 – 63	60	0 – 5

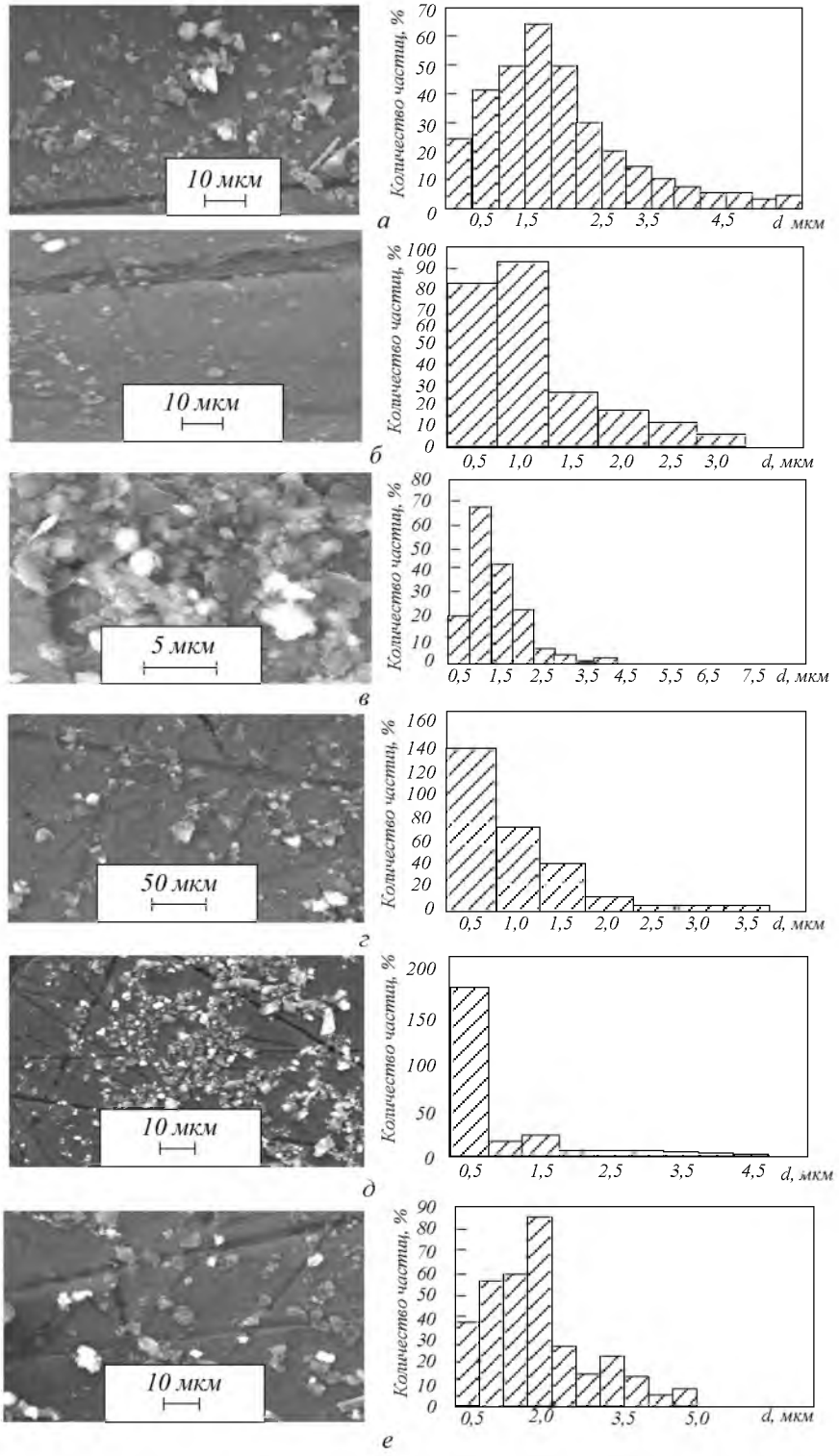


Рис. 1. Микрофотографии частиц угля и гистограммы распределения по размерам частиц:
а – угль марки ДГ (исходная фракция с размером частиц менее 100 мкм), седиментация 60 мин; *б* – угль марки ДГ (исходная фракция с размером частиц менее 63 мкм), седиментация 60 мин; *в* – угль марки Г (исходная фракция с размером частиц менее 100 мкм), седиментация 60 мин; *г* – угль марки Г (исходная фракция с размером частиц менее 100 мкм), седиментация 120 мин; *д* – угль марки Г (исходная фракция с размером частиц мене менее 63 мкм), седиментация 120 мин;
е – угль марки Ж (исходная фракция с размером частиц мене 100 мкм), седиментация 120 мин

Fig. 1. Micrography of coal particles and histograms of particle size distribution:
а – DG grade coal (initial fraction with particle size less than 100 microns), sedimentation 60 min; *б* – DG grade coal (initial fraction with particle size less than 63 microns), sedimentation 60 min; *в* – G grade coal (initial fraction with particle size less than 100 microns), sedimentation 60 min; *г* – grade G coal (initial fraction with a particle size of less than 100 microns), sedimentation 120 min; *д* – grade G coal (initial fraction with a particle size of less than 63 microns), sedimentation 120 min;
е – grade Zh coal (initial fraction with a particle size of less than 100 microns), sedimentation 120 min

Для угля марки Ж зависимость носит немонотонный характер. При уменьшении размера частиц от 63,0 до 2,5 мкм зольность возрастает на 2 %, однако при дальнейшем измельчении до частиц размером менее 1 мкм происходит ее снижение относительно исходной фракции 100 мкм.

Более детальный анализ (рис. 4) показывает, что эта закономерность также зависит от исходной дисперсности порошка.

Для угля марки Г ($d_i \approx 100$ мкм) зольность стабильна (примерно 27 %) вплоть до 1 мкм, после чего резко возрастает до 43 %. Для фракции 63 мкм наблюдается снижение зольности с 36 до 30 % в диапазоне 63 – 1 мкм с последующим ростом до 50 % при величине d_i менее 1 мкм.

Для угля марки Ж ($d_i \approx 100$ мкм) отмечается слабый рост зольности с 8 до 10 % в интервале 100,0 – 2,5 мкм и ее снижение на 2 % для частиц менее 2 мкм. При этом для фракции $d_i \approx 63$ мкм зольность практически не зависит от размера частиц.

Процесс седиментации является не только методом классификации, но и эффективным способом обогащения для высокозольных углей (табл. 4).

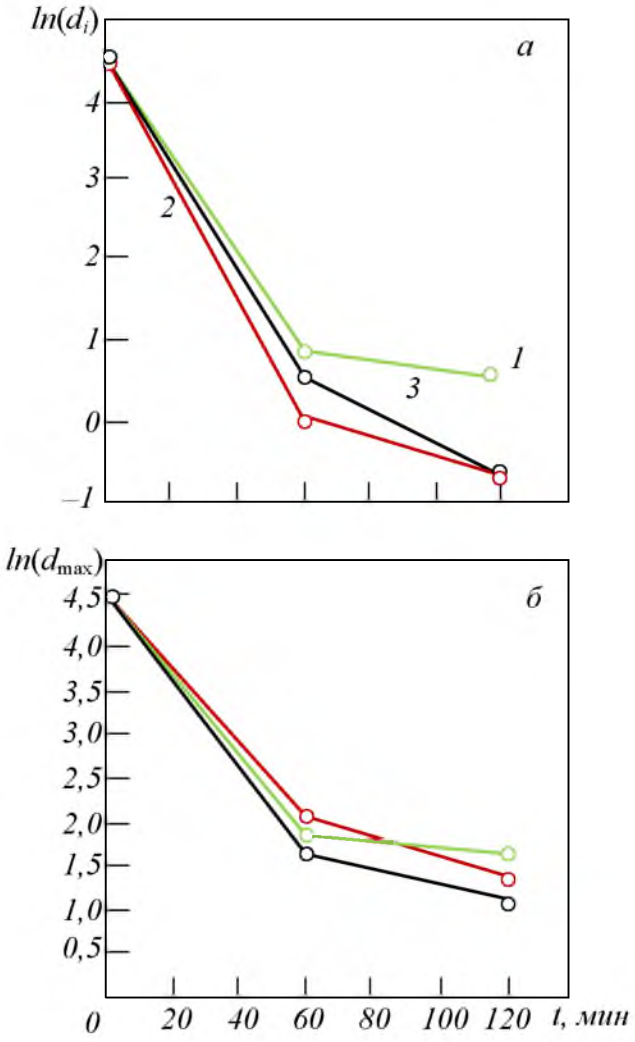


Рис. 2. Зависимость $\ln(d_i)$ (*а*) и $\ln(d_{max})$ (*б*) от длительности седиментации для угля марок ДГ (*1*), Ж (*2*), Г (*3*)
Fig. 2. Dependence of $\ln(d_i)$ (*a*) and $\ln(d_{max})$ (*б*) on sedimentation duration for DG (*1*), Zh (*2*), G (*3*) coal grades

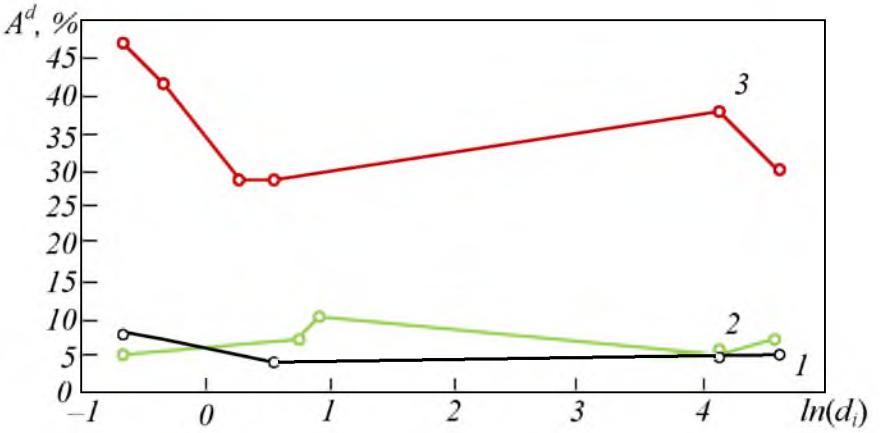


Рис. 3 Зависимость зольности от величины $\ln(d_i)$ для угля марок ДГ (*1*), Ж (*2*), Г (*3*)
Fig. 3. Dependence of ash content on the logarithm of the $\ln(d_i)$ for DG (*1*), Zh (*2*), G (*3*) coal grades

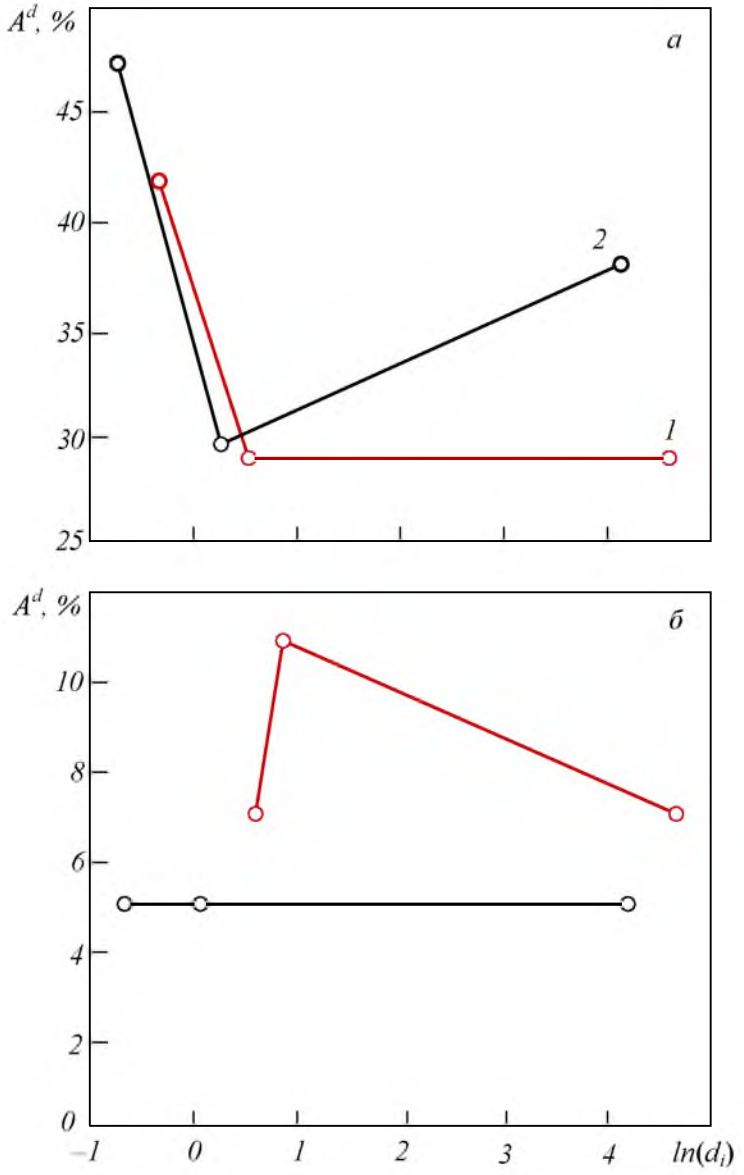


Рис. 4. Зависимость зольности угля марок Г (*а*) и Ж (*б*) от величины $\ln(d_i)$:
1 – $d_i \approx 100$ мкм; *2* – $d_i \approx 63$ мкм
Fig. 4. Dependence of the ash content of coal grades G (*a*) and Zh (*б*) on order $\ln(d_i)$:
1 – $d_i \approx 100$ microns; *2* – $d_i \approx 63$ microns

Таблица 4

Характеристики остатков седиментации угля марки Г

Table 4. **Characteristics of sedimentation residues of grade G coal**

Материал	W^a, %	A^d, %	V^{daf}, %
Исходный, $d_i \approx 100$ мкм	3,0	29,0	35,1
Остаток после 1 ч седиментации	2,0	22,0	44,5
Остаток после 2 ч седиментации	2,0	21,0	43,8
Исходный, $d_i \approx 63$ мкм	3,0	38,4	38,0
Остаток после 2 ч седиментации	2,0	33,7	44,4

Седиментация позволила снизить зольность угля марки Г на 7 – 8 % для фракции $d_i \approx 100$ мкм и примерно на 5 % для фракции $d_i \approx 63$ мкм. Параллельно наблюдался рост выхода летучих веществ (V^{daf}) с 35,1 до 44,0 – 47,0 % для фракции $d_i \approx 100$ мкм, что свидетельствует о концентрировании органической массы угля в оседающих частицах. Для углей марок ДГ и Ж выход летучих веществ оставался постоянным (примерно 40 и 32 %) и не зависел от степени дисперсности. Влажность всех исследуемых углей также не демонстрировала значимых изменений.

Полученные результаты имеют важное прикладное значение для составления коксовых шихт. Немонотонный характер изменения зольности для угля марки Ж, в частности ее снижение для ультрадисперсных частиц ($d_i \approx 1$ мкм), указывает на перспективность использования рассматриваемой фракции в качестве добавки. Это позволяет решить две задачи: утилизировать мелкие классы и одновременно управлять зольностью шихты. Кроме того, подтверждена эффективность седиментации как простого гидромеханического метода снижения зольности труднообогатимого угля марки Г, что открывает путь к улучшению качества сырья для коксования.

Выводы

Метод седиментации является эффективным инструментом для получения узких фракций из углей марок ДГ, Г и Ж. Увеличение времени седиментации закономерно снижает характерный размер (d_i) частиц, достигая максимумов распределения порядка 0,5 – 1,0 мкм.

Влияние дисперсности на зольность существенно зависит от марки угля. Для углей марок ДГ и Г наблюдается четкая тенденция к значительному росту зольности при уменьшении размера частиц менее 1 мкм, что связано с концентрированием минеральных примесей в тончайших фракциях. Для угля марки Ж зависимость носит немонотонный характер: при уменьшении размера от 63,0 до 2,5 мкм зольность незначительно возрастает, однако для ультрадисперсных частиц ($d_i < 1$ мкм) ее значение сопоставимо с исходным уровнем (примерно 8 %) и даже имеет тенденцию к снижению. Это указывает на принципиально иное распределение минеральной составляющей в угле марки Ж.

Седиментация продемонстрировала потенциал как метод обогащения для высокозольных углей. В частности, для угля марки Г удалось снизить зольность на 7 – 8 % с одновременным ростом выхода летучих веществ, что свидетельствует о концентрировании органической массы.

На основе выявленных закономерностей определена перспектива практического применения: ультрадисперсная фракция угля марки Ж с размером частиц около 1 мкм может быть рекомендована в качестве добавки в коксовую шихту. Это позволяет не только утилизировать мелкие классы, но и управлять зольностью шихты без ее ухудшения. Метод седиментации является перспективным для предварительного снижения зольности труднообогатимых углей (например, марки Г).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зинченко С.А., Давидзон А.Р., Казаков В.В., Мирошниченко Д.В., Сорокотяга К.Н., Борохович Д, Канунников И., Круш И. Совершенствование технологической схемы подготовки углей в условиях ПАО «ЯКХЗ». *Углехимический журнал*. 2013;6:20–28.
2. Miroshnichenko I.V., Miroshnichenko D.V., Shulga I.V., Balaeva Y.S., Pereima V.V. Calorific Value of Coke. 1. Prediction. *Coke and Chemistry*. 2019;62(4):143–149 *https://doi.org/10.3103/S1068364X19040057.2*
3. Karunova E.V., Kalko O.A., Sorokina I.V. Influence of the Granulometric Composition of Coking Batch on Coke Quality. *Coke and Chemistry*. 2025;68(2):91–95. *https://doi.org/10.3103/S1068364X25600216*
4. Кривонос В.В., Данилов А.Б., Вердибоженко Г.С., Лозинский О.Б., Дроздник И.Д., Кафтан Ю.С., Бидоленко Н.Б., Сорокотяга К.Н. Оптимизация схемы подготовки и уровня измельчения групп углей и шихты в углеподготовительном цехе № 1 ПАО «Алечеевкокс». *Углехимический журнал*. 2013;1-2:15–22.
5. Пастернак А.А., Скрипченко Н.П., Косминский А.В., Дроздник И.Д., Мирошниченко Д.В., Сорокотяга К.Н. Совершенствование схемы подготовки углей в УПЦ-2 ПАО

«АКХЗ». *Углехимический журнал*. 2013;5:14–22.
6. Fedorova N.I., Manina T.S., Ismagilov Z.R., Avid B. Composition and technological properties of coal from the Tavantolgoi deposit in Mongolia. *Solid Fuel Chemistry*. 2015;49(3):129–134. *https://doi.org/10.3103/S0361521915030064*
7. Черкасова Т.Г., Баранцев Д.А. Распределение химических элементов в гранулометрических фракциях отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская». *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2023;4(23):26–40. *https://doi.org/10.26730/2618-7434-2023-4-26-40*
8. Efimova O.S., Fedorova N.I., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Chemical and Granulometric Composition of Coal Dust of a Mine Degassing Plant. *Chemistry for Sustainable Develoment*. 2018;26(6):597–601. *https://doi.org/10.15372/CSD20180605*
9. Мурко В.И., Заостровский А.Н. Выбор углей для приготовления водоугольных суспензий и закономерности формирования их структурно-реологических характеристик. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2001;5(24):49–54.
10. Stepanov Y.V., Popova N.K., Shestoperova A.V., Gilyazetdinov R.R., Tsarev N.V. Effectiveness of selective crushing for coking batch. *Coke and Chemistry*.2010;53(7):247–249. *https://doi.org/10.3103/S1068364X10070021*
11. Zhuravleva E.V., Zhuravleva N.V., Mikhailova E.S., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Study of the Granulometric and Morphological Composition of Coal Powders. *Chemistry for Sustainable Development*. 2021;29(5):525–535. *https://doi.org/10.15372/CSD2021330*
12. Zhou R., He T., Liu Y., Mai P., Han G. Study on Coal Particle Properties and Critical Velocity Model in Coalbed Methane Horizontal Wells. *Processes*. 2025;13:1550. *https://doi.org/10.3390/pr13051550*
13. Crawford R.J., Mainwaring D.E. The influence of surfactant adsorption on the surface characterisation of Australian coals. *Fuel*. 2001;80:313–320. *https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00110-1*
14. Xia W., G. Xie G. Changes in the hydrophobicity of anthracite coals before and after high temperature heating process. *Powder Technology*. 2014;264:31–35. *https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.016*
15. Zhao L., Jian C., Cai R., He P. Study of rheological parameters due to coal particle size change in pipeline transported coal slurry. *Scientific Reports*. 2024;14:29333. *https://doi.org/10.1038/s41598-024-79696-2*
16. Lu H., Guo X., Liu Y., Gong *X*. Effect of Particle Size on Flow Mode and Flow Characteristics of Pulverized Coal. *KONA Powder and Particle Journal*. 2015;32:143–153. *https://doi.org/10.14356/kona.2015002*
17. Liu Y., Guo X., Lu H., Gong X. An Investigation of the Effect of Particle Size on the Flow Behavior of Pulverized Coal. Procedia Engineering. 2015;102:698–713. *https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.170*
18. Mohanta S., Meikap B. C. Influence of medium particle size on the separation performance of an air dense medium fluidized bed separator for coal cleaning. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*.2015;115:761–766. *https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/V115N8A13*
19. Yang D., Li J., Du C., Zheng K., Liu S. Particle size distribution of coal and gangue after impact-crush separation. *Journal of Central South University*. 2017;24:1252–1262. *https://doi.org/10.1007/s11771-017-3529-2*
20. Hanson S., Patrick J.W., Walker A. The effect of coal particle size on pyrolysis and steam gasification. *Fuel*. 2002;81(5):531–537. *https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00153-3*

REFERENCES

1. Zinchenko S.A., Davidzon A.R., Kazakov V.V., Miroshnichenko D.V., Sorokotyaga K.N., Borokhovich D, Kanunnikov I., Krush I. Improvement of the technological scheme for coal preparation at PJSC «YaKHZ». *Uglekhimicheskii zhurnal*. 2013;6:20–28. (In Russ.).
2. Miroshnichenko I.V., Miroshnichenko D.V., Shulga I.V., Balaeva Y.S., Pereima V.V. Calorific Value of Coke. 1. Prediction. *Coke and Chemistry*. 2019;62(4):143–149. *https://doi.org/10.3103/S1068364X19040057.2*
3. Karunova E.V., Kalko O.A., Sorokina I.V. Influence of the Granulometric Composition of Coking Batch on Coke Quality. *Coke and Chemistry*. 2025;68(2):91–95. *https://doi.org/10.3103/S1068364X25600216*
4. Krivonos V.V., Danilov A.B., Verdibozhenko G.S., Lozinskii O.B., Drozdnik I.D., Kaftan Yu.S., Bidolenko N.B., Sorokotyaga K.N. Optimization of the Preparation Scheme and Grinding Level of Coal Groups and Blend in Coal Preparation Plant No. 1 at PJSC «Alecheevkoks». *Uglekhimicheskii zhurnal*. 2013;1-2:15–22.

5. Pasternak A.A., Skripchenko N.P., Kosminskii A.V., Drozdnik I.D., Miroshnichenko D.V., Sorokotyaga K.N. Sovershenstvovanie skhemy podgotovki uglei v UPTS-2 PAO «AKKHZ». Uglekhimicheskii zhurnal. 2013;5:14–22.
6. Fedorova N.I., Manina T.S., Ismagilov Z.R., Avid B. Composition and technological properties of coal from the Tavantolgoi deposit in Mongolia. *Solid Fuel Chemistry*. 2015;49(3):129–134. *https://doi.org/10.3103/S0361521915030064*
7. Черкасова Т.Г., Баранцев Д.А. Распределение химических элементов в гранулометрических фракциях отходов углеобогащения АО ЦОФ «Березовская». *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2023;4(23):26–40. *https://doi.org/10.26730/2618-7434-2023-4-26-40*
8. Efimova O.S., Fedorova N.I., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Chemical and Granulometric Composition of Coal Dust of a Mine Degassing Plant. *Chemistry for Sustainable Develoment*. 2018;26(6):597–601. *https://doi.org/10.15372/CSD20180605*
9. Мурко В.И., Заостровский А.Н. Выбор углей для приготовления водоугольных суспензий и закономерности формирования их структурно-реологических характеристик. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2001;5(24):49–54.
10. Stepanov Y.V., Popova N.K., Shestoperova A.V., Gilyazetdinov R.R., Tsarev N.V. Effectiveness of selective crushing for coking batch. *Coke and Chemistry*.2010;53(7):247–249. *https://doi.org/10.3103/S1068364X10070021*
11. Zhuravleva E.V., Zhuravleva N.V., Mikhailova E.S., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Study of the Granulometric and Morphological Composition of Coal Powders. *Chemistry for Sustainable Development*. 2021;29(5):525–535. *https://doi.org/10.15372/CSD2021330*
12. Zhou R., He T., Liu Y., Mai P., Han G. Study on Coal Particle Properties and Critical Velocity Model in Coalbed Methane Horizontal Wells. *Processes*. 2025;13:1550. *https://doi.org/10.3390/pr13051550*
13. Crawford R.J., Mainwaring D.E. The influence of surfactant adsorption on the surface characterisation of Australian coals. *Fuel*. 2001;80:313–320. *https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00110-1*
14. Xia W., G. Xie G. Changes in the hydrophobicity of anthracite coals before and after high temperature heating process. *Powder Technology*. 2014;264:31–35. *https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.016*
15. Zhao L., Jian C., Cai R., He P. Study of rheological parameters due to coal particle size change in pipeline transported coal slurry. *Scientific Reports*. 2024;14:29333. *https://doi.org/10.1038/s41598-024-79696-2*
16. Lu H., Guo X., Liu Y., Gong *X*. Effect of Particle Size on Flow Mode and Flow Characteristics of Pulverized Coal. *KONA Powder and Particle Journal*. 2015;32:143–153. *https://doi.org/10.14356/kona.2015002*
17. Liu Y., Guo X., Lu H., Gong X. An Investigation of the Effect of Particle Size on the Flow Behavior of Pulverized Coal. Procedia Engineering. 2015;102:698–713. *https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.170*
18. Mohanta S., Meikap B. C. Influence of medium particle size on the separation performance of an air dense medium fluidized bed separator for coal cleaning. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*.2015;115:761–766. *https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/V115N8A13*
19. Yang D., Li J., Du C., Zheng K., Liu S. Particle size distribution of coal and gangue after impact-crush separation. *Journal of Central South University*. 2017;24:1252–1262. *https://doi.org/10.1007/s11771-017-3529-2*
20. Hanson S., Patrick J.W., Walker A. The effect of coal particle size on pyrolysis and steam gasification. *Fuel*. 2002;81(5):531–537. *https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00153-3*

Сведения об авторах:

***Родион Юрьевич Ковалев**, к.ф.-м.н., научный сотрудник,* Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
***E-mail**:* kovaleviuhm@yandex.ru
***ORCID**:* 0009-0001-7776-7440
***SPIN-код**:* 8244-8479

***Андрей Павлович Никитин**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник,* Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
***E-mail**:* nikitinandreyp@yandex.ru
***ORCID**:* 0000-0003-2187-2281
***SPIN-код**:* 2980-7637

***Анатолий Николаевич Заостровский**, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник,* Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
***E-mail**:* catalys01@rambler.ru
***ORCID**:* 0000-0003-1761-7093
***SPIN-код**:* 9749-0681

Information about the authors

***Rodion Yu. Kovalev**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), researcher,* Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS
***E-mail**:* kovaleviuhm@yandex.ru

ORCID: 0009-0001-7776-7440
SPIN-код: 8244-8479

Andrey P. Nikitin, *Ph.D. (Phys.-Math.), senior researcher,* Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS
E-mail: nikitinandreyp@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-2187-2281
SPIN-cod: 2980-7637

Anatoly N. Zaostrovsky, *Cand. Sci. (Eng.), leading researcher,* Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry SB RAS
E-mail: catalys01@rambler.ru
ORCID: 0000-0003-1761-7093
SPIN-cod: 9749-0681

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

Поступила в редакцию 14.01.2026
После доработки 10.02.2026
Принята к публикации 01.03.2026

Received 14.01.2026
Revised 10.02.2026
Accepted 01.03.2026

Оригинальная статья

УДК: 621.74.08

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-84-93

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛИТЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЗИКО-ИНФОРМИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ДЕФЕКТНОСТИ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК

© 2026 г. А. И. Куценко, С. В. Князев, А. А. Усольцев, М. В. Темлянцев, А. А. Куценко, М. М. Гусев

Сибирского государственного индустриального университета (654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Представлено физико-информированное генеративное моделирование (ФИГМ) как подход системной оптимизации технологических параметров литья стальных отливок с целью минимизации комплексной дефектности. Методология объединяет методы машинного обучения (глубокие автоэнкодеры для снижения размерности и кластеризации) с фундаментальными физико-технологическими ограничениями, формализованными в виде аналитических выражений. Последние описывают причинно-следственные связи между входными параметрами процесса и возникновением конкретных видов дефектов, что обеспечивает генерацию физически реализуемых и технологически обоснованных решений. Апробация подхода выполнена на историческом датасете по производству отливок типа Рама из стали марки 20Л, содержащем 15 входных и 8 выходных параметров, оценивающих средний уровень дефектности (СУД). В результате применения ФИГМ были идентифицированы и формализованы две устойчивые технологические зоны с различными комплексами параметров, каждая из которых обеспечивает стабильно приемлемый уровень качества. Для количественной оценки разработана целевая функция, учитывающая взвешенную критичность различных видов брака. Ключевым практическим результатом является создание инструмента визуальной аналитики на основе контурных карт взаимосвязей параметров и дефектов. Он позволяет наглядно анализировать технологические компромиссы, выявлять области устойчивых режимов и обоснованно выбирать оптимальные параметры литья. Показано, что предложенная методика преодолевает ограничения традиционных методов, основанных на последовательном устранении отдельных дефектов, и обеспечивает переход к системному управлению качеством за счет одновременного учета взаимного влияния ключевых видов брака.

Ключевые слова: стальные отливки, дефектность, физико-информированные нейронные сети, генеративные модели, машинное обучение

Для цитирования: Куценко А.И., Князев С.В., Усольцев А.А., Темлянцев М.В., Куценко А.А., Гусев М.М. Оптимизация технологических параметров литья с использованием физико-информированных генеративных моделей для минимизации дефектности стальных отливок. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):84–93. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-84-93*

Original article

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF CASTING USING PHYSICO-INFORMED GENERATIVE MODELS TO MINIMIZE DEFECTS IN STEEL CASTINGS

© 2026 A. I. Kutsenko, S. V. Knyazev, A. A. Usoltsev, M. V. Temlyantsev, A. A. Kutsenko, M. M. Gusev

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

Abstract. Physicologically informed generative modeling (FIGM) is presented as an approach to system optimization of technological parameters of casting steel castings in order to minimize complex defects. The methodology combines machine learning methods (deep autoencoders for dimensionality reduction and clustering) with fundamental physical and technological limitations formalized in the form of analytical expressions. The latter describe the causal relationships between the input parameters of the process and the occurrence of specific types of defects, which ensures the generation of physically feasible and technologically sound solutions. The approach was tested on a historical dataset for the production of castings of the Frame type made of 20L grade steel, containing 15 input and 8 output parameters estimating the average defect level (SDA). As a result of the application of FIGM, two stable technological zones with different sets of parameters were identified and formalized, each of which provides a consistently acceptable level of quality. For quantitative assessment, an objective function has been developed that takes into account the weighted criticality of various types of defects. The key practical result is the creation of a visual analytics tool based on contour maps of the interrelationships of parameters and defects. It allows you to visually analyze technological compromises, identify areas of stable modes, and reasonably select optimal casting parameters. It is shown that the proposed methodology overcomes the limitations of traditional methods based on the sequential elimination of individual defects and ensures the transition to systematic quality management by simultaneously taking into account the mutual influence of key types of defects.

Keywords: steel castings, defectiveness, physical-informed neural networks, generative models, machine learning

For citation: Kutsenko A.I., Knyazev S.V., Usoltsev A.A., Temlyantsev M.V., Kutsenko A.A., Gusev M.M. Optimization of technological parameters of casting using physico-informed generative models to minimize defectiveness of steel castings. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):84–93. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-84-93*

Введение

Современное литейное производство характеризуется сложностью технологических процессов и многофакторностью задач, связанных с обеспечением качества отливок. Традиционные подходы к оптимизации зачастую оказываются малоэффективными, что стимулирует развитие и внедрение методов искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения. В настоящей работе рассматривается эволюция подходов: от классических методов к перспективным физико-информированным и генеративным моделям.

Исторически основным методом отладки технологии литья и минимизации дефектов был метод «проб и ошибок», основанный на эмпирическом опыте технологов. Этот подход требует значительных временных и материальных затрат на изготовление опытных образцов и их последующий контроль, а его результативность сильно зависит от квалификации персонала [1]. Кроме того, такой метод плохо поддается формализации и масштабированию на новые виды отливок, особенно с повышенной технологической сложностью [2; 3].

С развитием вычислительной техники стали активно применяться статистические методы, в частности, регрессионный анализ, позволяющий установить количественные связи между параметрами процесса и выходными характеристиками отливки. Например, в работе [4] для прогнозирования прочностных свойств песчано-глинистых смесей использовался персептрон, обученный по методу обратного распространения ошибки на экспериментальных данных. Это позволило количественно оценить влияние состава смеси, влажности и температуры на сопротивление деформации.

Для задач классификации и прогнозирования дефектов успешно применяются различные архитектуры нейронных сетей. В работах [5 – 10] рассмотрено объединение сверточных (CNN) и рекуррентных (RNN) нейронных сетей с методами

нечеткой логики и традиционным неразрушающим контролем для создания автоматизированных систем диагностики литейных дефектов. Эти системы способны не только выявлять дефекты, но и предлагать решения по их устранению или отбраковке отливки.

Методы групповой классификации на основе самоорганизующихся карт Кохонена [2; 3; 11; 12] позволяют разбивать отливки на группы технологической сложности, что дает возможность применять проверенные технологические решения и типовые литниково-питающие системы (ЛПС) к новым, но схожим по классу деталям, значительно ускоряя процесс проектирования.

Несмотря на успехи классического машинного обучения, его ключевым ограничением является требование к большим объемам размеченных данных, получение которых в литейном производстве часто дорого и трудоемко. Перспективным направлением является интеграция физических знаний о процессе в модель ИИ.

В рассмотренных источниках прослеживается переход к более сложным гибридным подходам. Для прогнозирования механических свойств алюминиевых сплавов при кристаллизации под давлением используется нейросетевая модель [13], которая обучается на данных, отражающих физику процесса (давление, химический состав). Это является шагом к созданию физико-информированных нейронных сетей (Physics-Informed Neural Networks – PINNs), которые используют не только данные, но и включают в свою архитектуру уравнения в частных производных, описывающие фундаментальные законы (теплопередачу, гидродинамику, кинетику фазовых превращений).

Для задач, где данных мало, но много физических знаний, также перспективны генеративные модели. Для оптимизации химического состава чугуна с вермикулярным графитом применяется генетический алгоритм – метод [14], родственный идеям генеративного ИИ. Он позволяет в пространстве параметров, ограниченном физико-химическими законами, «генерировать» новые, оптимальные составы сплавов, минимизируя необходимость в полном переборе всех возможных комбинаций.

Рассматриваемые подходы открывают путь к созданию цифровых двойников литейных процессов [14 – 16], которые интегрируют данные, физические модели и алгоритмы ИИ для прогнозирования и минимизации дефектов в стальных отливках еще на этапе проектирования технологии.

Методика исследований

В основу исследования положен разработанный интегрированный алгоритм физико-информированного генеративного проектирования (ФИГОП) [17], реализованный на языке Python [18]. Алгоритм представляет собой сквозной цикл, состоящий из трех последовательных этапов, ключевой особенностью которого является органичное объединение методов машинного обучения с фундаментальными физическими законами, что обеспечивает генерацию не только оптимальных, но и физически реализуемых решений для литейных процессов и оборудования.

Этап 1. Формализация задачи и подготовка данных

Начальный этап посвящен формализации технологической задачи для литейного производства:

– формулируется техническое задание, определяющее целевую операцию (плавка, кристаллизация), технологические параметры (температура, состав сплава, тип литниково-питающей системы) и критерии оптимизации (минимизация пористости, повышение механических свойств, снижение брака);

– осуществляется концептуальное проектирование, в ходе которого выбирается принцип действия и базовая схема технологического процесса или агрегата на основе законов тепломассоперена, гидродинамики и кристаллизации;

– выполняется сбор и структурирование ретроспективных производственных данных (параметры режимов, характеристики шихты, результаты контроля качества отливок); проводится статистическая обработка данных, включая анализ корреляций для исключения мультиколлинеарных параметров ($|r| > 0{,}85$), снижение размерности методами PCA и t-SNE [19], а также кластерный анализ для выявления устойчивых технологических режимов [20].

Этап 2. Физико-информированная генерация решений

Второй этап направлен на создание и использование гибридной модели:

– разрабатывается и обучается суррогатная модель на основе глубокого автоэнкодера с архитектурой «бутылочное горлышко» (128 → 64 → 32 нейрона), которая сжимает исходные данные в латентное пространство и восстанавливает их с минимальной ошибкой (MSE);

– обеспечивается физическая обоснованность модели за счет интеграции формализованного словаря технологических ограничений; словарь включает в себя прямые ограничения (допустимые диапазоны температур, свойства формовочных и стержневых материалов, химического состава сплава), аналитические ограничения (уравнения, учитывающие значения входных параметров, при которых велика вероятность дефектов) и логические ограничения, отражающие технологические причинно-следственные связи.

Для решения обратной задачи (определения входных технологических параметров по заданным

целевым характеристикам отливки) применяется метод стохастической оптимизации на основе модифицированного алгоритма Монте-Карло. Алгоритм осуществляет поиск в латентном пространстве автоэнкодера, генерируя варианты, которые декодер преобразует в наборы входных параметров, обеспечивающих достижение целевых выходных показателей с заданной точностью.

Этап 3. Валидация и формирование документации

Заключительный этап направлен на верификацию и формализацию полученных решений:

– сгенерированные и прошедшие валидацию на соответствие словарю ограничений варианты группируются в кластеры (технологические зоны) с использованием алгоритмов машинного обучения (K-Means, GMM) [19; 20].

Для каждого кластера автоматически формируется паспорт, содержащий статистику по параметрам, оценку стабильности технологического процесса и дробную оценку оптимальности.

Результаты визуализируются в виде контурных карт и диаграмм, наглядно отображающих области оптимальных и допустимых режимов.

На основе апробированных оптимальных решений формируется комплект технологической и рабочей документации для внедрения в литейное производство.

Предложенная методика позволяет системно подойти к задаче оптимизации технологических параметров литья, обеспечивая переход от анализа ретроспективных данных к синтезу новых, физически обоснованных и оптимальных решений, направленных на минимизацию дефектности стальных отливок.

Результаты исследований

В настоящей работе была решена прикладная задача повышения качества стальных (сталь марки 20Л) отливок массой до 300 кг сложной конфигурации при толщине стенок 15 – 30 мм типа Рама, полученных способом литья в песчано-глинистые сырые формы с большим количеством стержней. В качестве исходных данных использовали исторический датасет, содержащий 15 входных технологических параметров (химический состав стали, параметры заливки, свойства формовочной и стержневой смесей) и 8 выходных параметров, представляющих собой средний уровень дефектов (СУД) в баллах от нуля до пять и 530 строк с экспериментальными наблюдениями (табл. 1).

Для количественной оценки комплексного качества отливки была разработана целевая функция (*quality*), представляющая собой взвешенную сумму, обратную уровням дефектности. Весовые коэффициенты были назначены в соответствии с критичностью и ремонтопригодностью каждого вида брака: наибольший вес получили наименее критичные и легкоустранимые дефекты (20 % пригар; 18 % ужимины), а наименьший – наиболее критические и неремонтопригодные (5 % горячие трещины; 7 % усадочные раковины):

$$quality = 0{,}05/(_GorTr + 1) + 0{,}12/(_GasRak + 1) + 0{,}14/(_Porist + 1) + 0{,}20/(_Prigar + 1) + 0{,}08/(_Spay + 1) + 0{,}18/(_Ugim + 1) + 0{,}07/(_UsRak + 1) + 0{,}16/(_Zasor + 1);$$

$quality \rightarrow 1{,}0$ (дефектность отливки отсутствует).

Рассматриваемое распределение приоритетов позволяет сосредоточить внимание на борьбе с наиболее критичными и неисправимыми видами брака при разработке технологии литья и контроле качества.

Ключевым элементом методики стала формализация физико-технологических ограничений в виде системы аналитических выражений, описывающих причинно-следственные связи между входными параметрами и возникновением конкретных дефектов. Например, было включено известное правило, что комбинация высокой температуры заливки, низкой газопроницаемости смеси и высокого содержания серы с высокой вероятностью приводит к образованию горячих трещин и газовой пористости.

В результате применения алгоритма физико-информированного генеративного проектирования были идентифицированы две устойчивые технологические зоны (*0* и *1*) с различными характеристиками (табл. 2).

Зона *0* характеризуется более высоким содержанием углерода (примерно 0,24 %) в стали, пониженной температурой (1588 °С) и скоростью заливки (9,7 кг/с), а также меньшей газопроницаемость формовочных и стержневых смесей.

Зона *1* отличается меньшим содержанием углерода (0,19 %), но более высокой температурой (1600 °С) и скоростью заливки (11 кг/с), а также повышенной газопроницаемостью смесей.

Анализ сгенерированных контурных карт (см. рисунок) позволил визуализировать сложные взаимосвязи между параметрами и дефек тами. Области экстраполяции, отображенные на контурных картах как незаполненные (белые) зоны, служат важным диагностическим признаком, определяющим границы технологически допустимого пространства параметров. Внутри этих контуров формируются рабочие зоны, гарантирующие с заданной вероятностью стабильность целевых выходных характеристик.

Таблица 1

Структура датасета и система оценки дефектности стальных отливок на основе среднего уровня дефектности (СУД)
Table 1. **Datasetstructureanddefectassessmentsystem for steelcastingsbased on the averagedefectlevel (COURT)**

Параметры	Обозначение	Минимум	Максимум
Входные			
Группа 1: Параметры стали (металла)			
Содержание углерода, %	C	0,151	0,315
Содержание серы, %	S	0,010	0,079
Содержание остаточного алюминия, %	Al	0,01	0,07
Температура заливки, °С	T	1562	1656
Группа 2: Параметры процесса заливки			
Скорость заливки стали, кг/сек	v	6,0	13,9
Группа 3: Параметры формовочной смеси (F)			
Влажность формовочной смеси, %	W	2,41	3,90
Прочность на сжатие формовочной смеси,кПа	F_{proch}	65	120
Газопроницаемость формовочной смеси,ед.	F_{gas}	83	238
Осыпаемость формовочной смеси, %	F_{osip}	0,30	0,98
Уплотняемость формовочной смеси, %	F_{uplot}	20	50
Содержание органических добавок в формовочной смеси, %	F_{potves}	4,2	6,2
Группа 4: Параметры стержневой смеси (S)			
Прочность на растяжение стержневой смеси, кПа	S_{rastyg}	172	349
Газопроницаемость стержневой смеси, ед.	S_{gas}	76	238
Уплотняемость стержневой смеси,%	S_{uplot}	17	49
Осыпаемость стержневой смеси, %	S_{osip}	0,32	0,70
Выходные (бальная оценка дефектности отливки)			
СУД по горячим трещинам	_GorTr	0	1,95
СУД по газовым раковинам	_GasRak	0	1,91
СУД по ситовидной пористости	_Porist	0	1,95
СУД по засорам	_Zasor	0	1,95
СУД по ужиминам	_Ugim	0	1,92
СУД по пригару	_Prigar	0	1,94
СУД по спаям	_Spay	0	1,95
СУД по усадочным раковинам	_UsRak	0	1,95

Бальные и численные значение СУД дефектности отливки						
Значение	Отсутствие дефектов	Нижний Уровень дефектности	Уровень дефектности соответствует техническим требованиям	Уровень дефектности соответствует техническим условиям	Высокий уровень дефектности	Появление брака по типу дефекта
Балл	0	1	2	3	4	5
Число	0 – 0,1	0,11 – 0,25	0,26 – 0,75	0,76 – 1,25	1,26 – 1,75	Более 1,75

Анализ таких областей позволяет не только установить пределы существования технологического процесса, но и выделить в них подпространства параметров, обеспечивающие воспроизводимое качество продукции.

Наглядно продемонстрирован компенсационный эффект: области технологических параметров, обеспечивающие минимизацию одного типа дефектов (усадочных раковин), часто соседствуют с зонами роста других дефектов (горячих трещин или газовых раковин). Это подтверждает фундаментальную проблему литейного производства – наличие технологических противоречий [21].

Полученные «паспорта» технологических зон

Таблица 2

Характеристики устойчивых технологических зон
Table 2. **Characteristics of sustainabletechnologicalzones**

Параметр	Значение параметра для зоны			
	0		*1*	
	Минимум	Максимум	Минимум	Максимум
Al	0,01	0,06	0,01	0,07
C	0,16	0,31	0,15	0,31
F_{gas}	83	235	104	234
F_{osip}	0,32	0,98	0,30	0,94
F_{potves}	4,2	6,2	4,2	6,1
F_{proch}	65	102	65	108
F_{uplot}	20	50	20	50
S	0,011	0,055	0,011	0,059
S_{gas}	76	199	85	235
S_{osip}	0,33	0,68	0,32	0,68
S_{rastyg}	172	349	175	346
S_{uplot}	17	49	17	48
T	1566	1656	1573	1648
W	2,45	3,89	2,42	3,90
v	6,4	12,0	7,9	12,79
Стабильность предсказания				
_GorTr	0,875		0,821	
_GasRak	0,757		0,798	
_Porist	0,603		0,636	
_Zasor	0,885		0,841	
_Ugim	0,532		0,557	
_Prigar	0,855		0,761	
_Spay	0,649		0,830	
_UsRak	0,675		0.730	
Примечание:от 0 до менее 0,7 – низкаястабильность;от 0,7 до менее 0,9 – умеренная стабильность; от 0,9 до 1,0 – высокая стабильность.				

содержат детальные статистические характеристики всех параметров и интегральную оценку качества (0,611 и 0,619 для зон *0* и *1*), что предоставляет инженеру-технологу строгий количественный инструмент для выбора оптимальных и устойчивых режимов работы, гарантирующих соблюдение заданных требований к качеству отливки.

Выводы

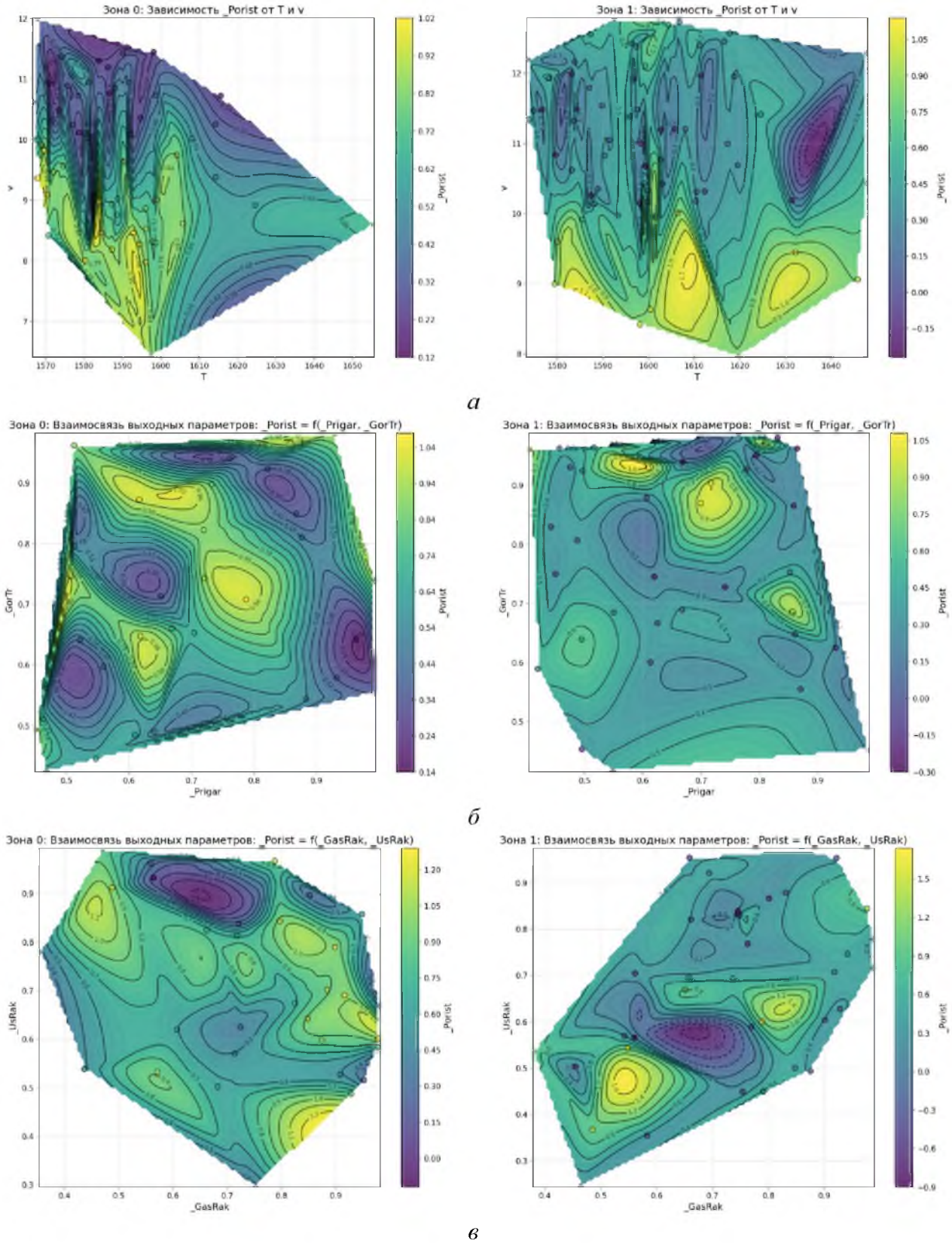
Разработан и успешно апробирован интегрированный физико-информированный генеративный подход для решения конкретной технологической задачи – минимизации дефектности стальных отливок. Подход продемонстрировал способность выявлять скрытые, неочевидные зависимости между параметрами технологического процесса и комплексным качеством литья.

В результате работы алгоритма были идентифицированы и формализованы две устойчивые технологические зоны с различными комплексами параметров, каждая из которых обеспечивает приемлемый и стабильный уровень качества. Это доказывает, что для достижения целевых показателей несколько различных, но равноценных с точки зрения многокритериальной оптимизации, технологических стратегий.

Ключевым практическим результатом является создание инструмента визуальной аналитики на основе контурных карт. Такой инструмент позволяет инженеру-технологу наглядно анализировать компромиссы между различными видами дефектов, находить зоны технологической устойчивости и обоснованно выбирать режимные параметры, обеспечивающие оптимальный баланс качества.

Установлено, что традиционная практика последовательного устранения отдельных дефектов является малоэффективной из-за наличия сильных технологических противоречий. Предложенная методика позволяет перейти к системному управлению качеством, учитывающему взаимное влияние всех ключевых видов брака одновременно.

Полученные результаты обладают высокой практической значимостью и могут быть непосредственно внедрены в производство для оптимизации режимов литья стальных фасонных отливок, снижения процента брака и повышения стабильности технологического процесса.



Контурные карты взаимосвязи температуры стали и скорости ее заливки расплава в литейную форму с дефектами в виде ситовидной пористости (*а*), дефектов в виде ситовидной пористости с пригаром и горячими трещинами (*б*), с газовыми и усадочными раковинами (*в*) для различных технологических зон

Contour maps of the relationship between the temperature of steel and the rate of its casting into a casting mold with defects in the form of sieve porosity (*a*), defects in the form of sieve porosity with burn and hot cracks (*б*), with gas and shrink shells (*в*) for various technological zones

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matokhina A.V., Kizim A.V., Voronin Y.F. Automation of customer needs forecasting. *World Applied Sciences Journal*. 2013;24(24):126–132. *https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.24.itmies.80024; EDN SLAPBT*
2. Одарченко И.Б., Жаранов В.А., Прусенко И.Н. Расширенная оценка технологической сложности отливок на основе применения методов нейросетей. В кн.: *Современные проблемы машиноведения: Материалы XIII Международной научно-технической конференции (научные чтения, посвященные 125-летию со дня рождения П. О. Сухого).* Гомель: изд. Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, 2020:102–105. *EDN: SMXSYJ.*
3. Schmidhuber J. Deep Learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*. 2015;61:85–117. *https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003*; *EDN YEWUEF.*
4. Андреев С.М., Колокольцев М.В., Савинов Д.А. и др. Использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования прочностных свойств песчано-глинистых смесей литейных форм. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2023;21(4):23–33.
5. Смыков А.Ф., Кузовов С.С. Основы разработки автоматизированной системы по выявлению литейных дефектов в фасонных отливках на базе нейронных сетей и нечеткой логики. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2025;23(7):295–301.
6. Schmidhuber J. Deep Learning in Neural Networks: An Overview. *Neural Networks*. 2015;61. *EDN: YEWUEF.*
7. Mikolov T., Karafiat M., Burget L., Cernocky J., Khudanpur S. Recurrent neural network based language model. In*: 11th Annual Conference of the International Speech Communication Association*. Japan. 2010:38–45.
8. Kuzovov S.S., Smykov A.F. The Application of Convolutional Neural Networks and Fuzzy Logic in Control and Automation Systems for Recognizing and Assessing the Danger Level of Hot Cracks in the Production of Cast Products. In*: International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). IEEE*. 2024:984–988.
9. Angelini L., Carlo F., Marangi C., Pellicoro M., Nardullia M., Stramaglia S. Clustering Data by Inhomogeneous Chaotic Map Lattices. *Physical Review Letters*. 2000;85:199–329. *EDN: LTNGNH.*
10. Князев С.В., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Михно А.Р. Алгоритмы управления подготовкой формовочных смесей. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2021;77(10):1076–1080. *https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-10-1076-1080. EDN: AMYKQZ.*
11. Oborskiy G.A., Bundyuk A.N., Tarakhtiy O.S. Control system of cogeneration power plant at partial electrical loads. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2018;50(7):70–78. *https://doi.org/10.1615/jautomatinfscien.v50.i7.60*; *EDN: FOFKWW.*
12. Одарченко И.Б., Жаранов В.А., Прусенко И.Н. Оптимизация гидродинамики литниково-питающих систем с использованием нейросетевых методов классификации технологических параметров. *Литье и металлургия*. 2017;4(89):84–88.
13. Денисов М.С., Петрешин Д.И., Чеботарев П.А., Ряузов С.А. Разработка нейросетевой модели для прогнозирования механических свойств алюминиевых сплавов при литье с кристаллизацией под давлением. *Автоматизация. Современные технологии*. 2023;77(10):439–446.
14. Юсупов Л.Р., Клочкова К.В., Симонова Л.А. Методика моделирования химического состава чугуна с вермикулярным графитом на основе генетического алгоритма. В кн.: *Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы*. 2016:180–185.
15. Одарченко И.Б., Жаранов В.А., Прусенко И.Н. Интеграция нейросетевых моделей в процессы технологической подготовки производства отливок. *Литье и металлургия*. 2018;4(93):45–49.
16. Шайхутдинова И.И. Автоматизированные системы контроля качества в производстве отливок из алюминиевых сплавов. *Литейное производство*. 2025;9:25–33.
17. Черняев М.А., Терешина В.В. Гибридные модели на стыке физики и искусственного интеллекта: методы и приложения. *Вектор научной мысли*. 2025;7(24):159–164.
18. Dli M.I., Vlasova E.A., Sokolov A.M., Morgunova E.V. Creation of a chemical-technological system digital twin using the Python language. *Journal of Applied Informatics*. 2021;16(1(91)):22–31. *https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-1-22-31*; *EDN AGPYPO.*
19. Holmes J., Ahmed I., Brindescu C. et al. Using Relative Lines of Code to Guide Automated Test Generation for Python. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2020;29(4):1–38. *https://doi.org/10.1145/3408896. EDN: IZTCZY.*

20. Kharisma Raharjana I., Faris Arifin M., Iklil Nur A., Mubarak N. Conversion of User Story Scenarios to Python-Based Selenium Source Code for Automated Testing. *TEM Journal*. 2023;12(1):309–315. *https://doi.org/10.18421/tem121-39*; *EDN: TDIVAF*.

21. Князев С.В., Куценко А.И., Усольцев А.А. и др. Перспективы и направления цифровой трансформации в литейном производстве. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(2):140–147. *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-140-147. EDN: JNMFIQ*.

REFERENCES

1. Matokhina A.V., Kizim A.V., Voronin Y.F. Automation of customer needs forecasting. *World Applied Sciences Journal*. 2013;24(24):126–132. *https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.24.itmies.80024*; *EDN SLAPBT*

2. Odarchenko I.B., Zharanov V.A., Prusenko I.N. Extended assessment of the technological complexity of castings based on the application of neural network methods. In: *Modern problems of mechanical engineering: Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference (scientific readings dedicated to the 125th anniversary of P. O. Sukhoi's birth)*. Gomel: izd. Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, 2020:102–105. (In Russ.). *EDN SMXSYJ*.

3. Schmidhuber J. Deep Learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*. 2015;61:85–117. *https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003*; *EDN YEWUEF*.

4. Andreev S.M., Kolokol'tsev M.V., Savinov D.A. at al. The use of artificial neural networks to predict the strength properties of sand-clay mixtures of molds. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2023;21(4):23–33. (In Russ.).

5. Smykov A.F., Kuzovov S.S. Fundamentals of the development of an automated system for detecting casting defects in shaped castings based on neural networks and fuzzy logic. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2025;23(7):295–301. (In Russ.).

6. Schmidhuber J. Deep Learning in Neural Networks: An Overview. *Neural Networks*. 2015;61. *EDN: YEWUEF*.

7. Mikolov T., Karafiat M., Burget L., Cernocky J., Khudanpur S. Recurrent neural network based language model. In: *11th Annual Conference of the International Speech Communication Association*. Japan. 2010: 38–45.

8. Kuzovov S.S., Smykov A.F. The Application of Convolutional Neural Networks and Fuzzy Logic in Control and Automation Systems for Recognizing and Assessing the Danger Level of Hot Cracks in the Production of Cast Products. In: *International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). IEEE*. 2024:984–988.

9. Angelini L., Carlo F., Marangi C., Pellicoro M., Nardullia M., Stramaglia S. Clustering Data by Inhomogeneous Chaotic Map Lattices. *Physical Review Letters*. 2000;85:199–329. *EDN: LTNGNH*.

10. Knyazev S.V., Kozyrev N.A., Usol'tsev A.A., Mikhno A.R. Algorithms for controlling the preparation of molding mixtures. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2021;77(10):1076–1080. *https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-10-1076-1081. EDN: AMYKQZ*.

11. Oborskiy G.A., Bundyuk A.N., Tarakhtiy O.S. Control system of cogeneration power plant at partial electrical loads. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2018;50(7):70–78. *https://doi.org/10.1615/jautomatinfscien.v50.i7.60*; *EDN: FOFKWW*.

12. Odarchenko I.B., Zharanov V.A., Prusenko I.N. Optimization of hydrodynamics of gate-feeding systems using neural network methods for classifying technological parameters. *Lit'e i metallurgiya*. 2017;4(89):84–88. (In Russ.).

13. Denisov M.S., Petreshin D.I., Chebotarev P.A., Ryauzov S.A. Development of a neural network model for predicting the mechanical properties of aluminum alloys during injection molding. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*. 2023;77(10):439–446. (In Russ.).

14. Yusupov L.R., Klochkova K.V., Simonova L.A. Methodology for modeling the chemical composition of cast iron with vermicular graphite based on a genetic algorithm. In: *Innovative engineering technologies, equipment and materials*. 2016:180–185. (In Russ.).

15. Odarchenko I.B., Zharanov V.A., Prusenko I.N. Integration of neural network models into the processes of technological preparation of castings. *Lit'e i metallurgiya*. 2018;4(93):45–49. (In Russ.).

16. Shaikhutdinova I.I. Automated quality control systems in the production of aluminum alloy castings. *Liteinoe proizvodstvo*. 2025;9:25–33. (In Russ.).

17. Chernyaev M.A., Tereshina V.V. Hybrid models at the junction of physics and artificial intelligence: methods and applications. *Vektor nauchnoi mysli*. 2025;7(24):159–164. (In Russ.).

18. Dli M.I., Vlasova E.A., Sokolov A.M., Morgunova E.V. Creation of a chemical-technological system digital twin using the Python language. *Journal of Applied Informatics*. 2021;16(1(91)):22–31. *https://doi.org/10.37791/2687-0649-2021-16-1-22-31*; *EDN AGPYPO*.

19. Holmes J., Ahmed I., Brindescu C. et al. Using Relative Lines of Code to Guide Automated Test Generation for Python. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2020;29(4):1–38. *https://doi.org/10.1145/3408896*; *EDN: IZTCZY*.

20. Kharisma Raharjana I., Faris Arifin M., Iklil Nur A., Mubarak N. Conversion of User Story Scenarios to Python-Based Selenium Source Code for Automated Testing. *TEM Journal*. 2023;12(1):309–315. *https://doi.org/10.18421/tem121-39*; *EDN: TDIVAF*.

21. Knyazev S.V., Kutsenko A.I., Usol'tsev A.A. at al. Prospects and directions of digital transformation in foundry production. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2023;66(2):140–147. (In Russ.). *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-140-147*. *EDN: JNMFIQ*.

Сведения об авторах:

***Андрей Иванович Куценко**, к.т.н., доцент, главный специалист по управлению стратегическим проектом*, Сибирский государственный индустриальный университет
***ORCID**:* 0000-0003-4724-630X
***E-mail**:* aik_mail@mail.ru
***SPIN-код**:* 6707-3067

***Сергей Валентинович Князев**, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов и химической технологии,* Сибирский государственный индустриальный университет
***ORCID**:* 0000-0001-9637-4821
***E-mail**:* krookia@mail.ru
***SPIN-код**:* 7261-3100

***Александр Александрович Усольцев**, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов и химической технологии*, Сибирский государственный индустриальный университет
***ORCID**:* 0000-0001-6220-7910
***E-mail**:* a.us@rambler.ru
***SPIN-код**:* 8252-7303

***Михаил Викторович Темлянцев**, д.т.н., профессор, проректор по реализации стратегического проекта,* Сибирский государственный индустриальный университет
***ORCID**:* 0000-0001-7985-5666
***E-mail**:* uchebn_otdel@sibsiu.ru
***SPIN-код**:* 6169-5458

***Андрей Андреевич Куценко**, к.т.н., доцент кафедры теплогазоводоснабжения, водоотведения и вентиляции*, Сибирский государственный индустриальный университет
***ORCID**:* 0000-0003-0503-7438
***E-mail**:* aak_mail@mail.ru
***SPIN-код**:* 4243-5030

***Максим Михайлович Гусев**, директор центра цифровых компетенций,* Сибирский государственный индустриальный университет
***ORCID**:* 0009-0008-7693-8405
***E-mail**:* gusev_mm@sibsiu.ru
***SPIN-код**:* 2010-1015

Information about the Authors

***Andrey I. Kutsenko,** Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Specialist in Strategic Project Management,* Siberian State Industrial University
***ORCID**:* 0000-0003-4724-630X
***E-mail**:* aik_mail@mail.ru
***SPIN-код**:* 6707-3067

***Sergey V. Knyazev,** Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology,* Siberian State Industrial University
***ORCID**:* 0000-0001-9637-4821
***E-mail**:* krookia@mail.ru
***SPIN-код**:* 7261-3100

***Alexander A. Usoltsev,** Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology,* Siberian State Industrial University
***ORCID**:* 0000-0001-6220-7910
***E-mail**:* a.us@rambler.ru
***SPIN-код**:* 8252-7303

***Mikhail V. Temlyantsev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof, Vice-Rector for Strategic Project Implementation,* Siberian State Industrial University
***ORCID**:* 0000-0001-7985-5666
***E-mail**:* uchebn_otdel@sibsiu.ru
***SPIN-код**:* 6169-5458

***Andrey A. Kutsenko,** Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Sanitation and Ventilation,* Siberian State Industrial University
***ORCID**:* 0000-0003-0503-7438
***E-mail**:* aak_mail@mail.ru
***SPIN-код**:* 4243-5030

***Maxim M. Gusev,** Director of the Center for Digital Competencies,* Siberian State Industrial University
***ORCID**:* 0009-0008-7693-8405
***E-mail**:* gusev_mm@sibsiu.ru
***SPIN-код**:* 2010-1015

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

Поступила в редакцию 19.01.2026
После доработки 03.02.2026
Принята к публикации 15.02.2026

Received 19.01.2026
Revised 03.02.2026
Accepted 15.02.2026

Оригинальная статья

УДК 621.791.011

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-94-102

ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ НАПЛАВКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

© 2026 г. А. Р. Михно, Г. И. Махнева, Н. П. Ломиворотов, Е. М. Запольская, И. А. Панченко, С. В. Коновалов

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

Аннотация. Представлен анализ методов создания порошковых проволок, используемых для электродуговой наплавки, с акцентом на их химический состав и микроструктуру. Для производства порошковых проволок использовали различные металлические порошки (железо, вольфрам, марганец, хром и ванадий), а также добавляли пыль газоочистки производства алюминия. Рассматривали порошковые проволоки на основе систем Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V, Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo, Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti, Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V– Ti, WC – Co, Ni/WC – Co, Fe – Cr – C и Fe – Cr – B, которые применяли для формирования защитных покрытий. Последние играют ключевую роль в промышленности, так как они увеличивают срок службы оборудования, подвергающегося значительным механическим и термическим нагрузкам. Процесс наплавки проводили с использованием сварочного трактора ASAW-1250 в пять слоев, что способствует предотвращению смешивания наплавленного металла с подложкой и повышает качество покрытия. Микроструктурные и химические характеристики были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), что позволило глубже понять структуру полученных материалов. В результате проведенных экспериментов выявлено, что состав порошковых проволок и режимы наплавки существенно влияют на характеристики полученного слоя. Обнаруженные глобулярные формы неметаллических включений свидетельствуют о наличии различных оксидов и силикатов, что, в свою очередь, указывает на особенности процесса формирования наплавочного слоя.

Ключевые слова: наплавочный слой, порошковая проволока, электронная микроскопия, химический состав, микроструктура, неметаллические включения

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

Для цитирования: Михно А.Р., Махнева Г.И., Ломиворотов Н.П., Запольская Е.М., Панченко И.А., Коновалов С.В. Электродуговая наплавка порошковой проволокой для получения износостойких покрытий. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):94–102. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-94-102*

Original article

ELECTRIC ARC SURFACING WITH POWDERED WIRE TO PRODUCE WEAR-RESISTANT COATINGS

© 2026 A. R. Mikhno, G. I. Makhneva, N. P. Lomivorotov, E. M. Zapolskaya, I. A. Panchenko, S. V. Konovalov

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

Abstract. An analysis of methods for creating powder wires used for electric arc welding is presented, with an emphasis on their chemical composition and microstructure. Various metal powders (iron, tungsten, manganese, chromium and vanadium) were used for the production of powdered wires, and aluminum gas purification dust was also

added. Powder wires based on Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V, Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo, Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti, Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V– Ti, WC – Co, Ni/WC – Co, Fe – Cr – C and Fe – Cr – B, which were used to form protective coatings. The latter play a key role in industry, as they increase the service life of equipment subjected to significant mechanical and thermal stresses. The surfacing process was carried out using an ASAW-1250 welding tractor in five layers, which helps to prevent mixing of the deposited metal with the substrate and improves the coating quality. The microstructural and chemical characteristics were studied using a scanning electron microscope (SEM), which allowed for a deeper understanding of the structure of the obtained materials. As a result of the experiments, it was revealed that the composition of the powder wires and the surfacing modes significantly affect the characteristics of the resulting layer. The discovered globular forms of nonmetallic inclusions indicate the presence of various oxides and silicates, which, in turn, indicates the peculiarities of the formation of the surfacing layer.

Keywords: deposited layer, powder wire, electron microscopy, chemical composition, microstructure, non-metallic inclusions

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

For citation: Mikhno A.R., Makhneva G.I., Lomivorotov N.P., Zapolskaya E.M., Panchenko I.A., Konovalov S.V. Electric arc surfacing with powdered wire to produce wear-resistant coatings. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):94–102. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-94-102*

Введение

Прокатные валки являются важным элементом технологического процесса на металлургических предприятиях, обеспечивая формование проката путем пластического деформирования исходного материала [1; 2]. Высокая нагрузка на рабочие поверхности валков, обусловленная значительными контактными напряжениями и температурными нагрузками, вызывает быстрый износ и необходимость частых ремонтов [3; 4]. Для наплавки прокатных валков широкое распространение получили порошковые проволоки (ПП) системы Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V [5].

Одним из наиболее распространенных методов восстановления рабочих поверхностей является электродуговая наплавка с применением ПП [6; 7]. Этот метод позволяет формировать новые слои покрытия, обладающие высокими прочностными характеристиками и износостойкостью [8 – 10]. Наплавленные покрытия представляют собой композитные материалы, состоящие из основы (матрицы), легирующих элементов и твердых частиц (например, карбидов) [11; 12].

Перспективное направление развития в области улучшения качества наплавляемых покрытий заключается в применении экономически обоснованных и рационально легированных наплавочных материалов. Экономно-легированные наплавочные сплавы обеспечивают достижение высоких механических свойств (твердости, ударной вязкости, износостойкости) при минимизации стоимости и сложности изготовления самих наплавочных составов [13; 14].

Целью настоящей работы является изучение микроструктуры образцов с минимальным содержанием неметаллических включений (силикатов, оксидов), а также сравнительный анализ результатов исследования ПП на основе следующих систем:

1. Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V;
2. Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo;
3. Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti;
4. Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V– Ti;
5. WC – Co;
6. Ni/WC – Co;
7. Fe – Cr – C;
8. Fe – Cr – B.

Материалы и методы исследования

Для получения ПП предварительно рассчитывали состав флюса. Смешивание материалов выполняли в течение 30 мин. Изготовление ПП проводили путем волочения через фильеру, а полученную проволоку наматывали на барабан. Для наплавки электродуговых покрытий использовали сварочный трактор ASAW-1250. Наплавку выполняли на стальные пластины марки 09Г2С в пять слоев с целью предотвращения перемешивания наплавляемого металла и подложки.

Система ПП на основе Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V была изготовлена следующим образом: наружная оболочка состояла из стальной ленты марки Ст3 толщиной 0,4 мм; внутренний порошок-наполнитель представлял собой смесь различных металлических порошков (железо ПЖВ1 (ГОСТ 9849 – 86), кремний КР-1 (ГОСТ 2169 – 69), вольфрам ПВ-1 (ГОСТ 1049 – 74), марганец МР-0 (ГОСТ 6008 – 82), хром ПХА-1М (ТУ 14-1-1474 – 75) и ванадий ВЭЛ-1 (ТУ 48-0533 – 71)) [5]. В качестве добавки на замену аморфного углерода использовали пыль газоочистки производства алюминия (ПГПА), полученную из фильтрации электро-

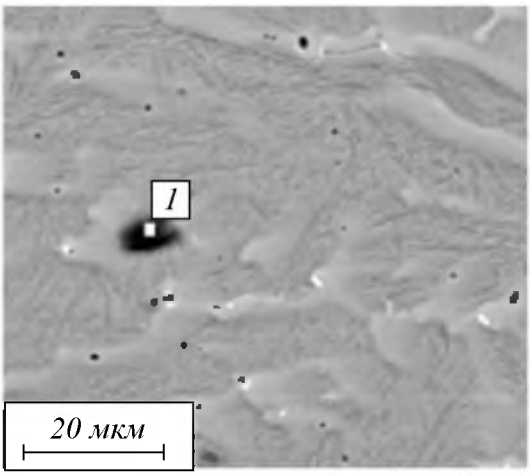


Рис. 1. Микроструктура наплавленного покрытия системы Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V и распределение неметаллических включений
Fig. 1. Microstructure of the deposited coating of the Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V system and distribution of non-metallic inclusions

литических печей. Общий диаметр готовой ПП составил 4,2 мм. Режим наплавки осуществляли при силе сварного тока 422 А, напряжении дуги 38,0 В, скорости подачи проволоки 18 см/мин.

Для исследования была изготовлена ПП системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo диаметром 5 мм. Оболочкой проволоки служила лента из стали марки Ст3. В качестве наполнителя использовали порошки железа марки ПЖВ1 (ГОСТ 9849 – 86), ферросилиция марки ФС 75 (ГОСТ 1415 – 93), высокоуглеродистого феррохрома марки ФХ900А (ГОСТ 4757 – 91), углеродистого ферромарганца ФМн 78 (А) (ГОСТ 4755 – 91), никеля ПНК-1Л5 (ГОСТ 9722 – 97), ферромолибдена марки ФМо60 (ГОСТ 4759 – 91), кобальта ПК-1У (ГОСТ 9721 – 79) и вольфрама ПВ-1 ТУ 14-22-143 – 2000 [15]. Режим наплавки: сила сварного тока 450 А, напряжение дуги 30 В, подача проволоки 10 см/мин.

На электроэрозионном проволочно-вырезном станке струйного типа DK7732 были получены образцы следующих размеров 20 × 55 × 14 и 20 × 20 × 20 мм. Следующим этапом была проведена пробоподготовка образцов, которая включала в себя шлифование, полирование и травление поверхности азотной кислотой (HNO_3) с целью выявления структуры. Изучение структуры и химического состава наплавленного слоя проводили в лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений Сибирского государственного индустриального университета с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) KYKY-EM6900.

Результаты и их обсуждение

При исследовании сплава Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V выявлена микроструктура наплавленного слоя «волокнистого» строения, с четко выраженными линиями по границе зерен, что может указывать на процесс кристаллизации во время наплавления (рис. 1). Было установлено, что в рассматриваемой области присутствуют следующие элементы: 2,22 % Cr; 0,92 % Mn; 5,50 % C; 6,36 % W; 0,11 % V; 84,62 % Fe. В микроструктуре обнаружены неметаллические включения неправильной глобулярной формы, которые в основном располагаются вдоль межзеренных границ (рис. 1). Более крупное включение *1* имеет следующий химический состав: 7,90 % Na; 10,18 % Al; 19,88 % Si; 0,96 % Cr; 0,42 % Mn; 2,49 % W; 26,46 % C и 31,72 % Fe. Содержание натрия, алюминия, кремния, хрома, марганца, вольфрама может быть обусловлено методом нанесения наплавочного слоя [16].

В ходе проведенных исследований [5] с помощью СЭМ получили химический состав наплавленного покрытия, сформированного с использованием ПП системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo: 0,58 % C; 0,64 % Si; 0,92 % Mn; 1,15 % Cr; 0,35 % Mo; 0,37 % Ni; 0,51 % V; 0,076 % S; 0,02 % P.

Микроструктура наплавленного слоя имеет дендритное строение и представляет собой грубоигольчатый мартенсит (рис. 2, *а*), что характерно для литых металлов. В ходе исследований были обнаружены силикатные включения глобулярной формы диаметром от 33 до 47 мкм (рис. 2, *б*). Химический состав неметаллических включений следующий: 49,79 % O; 1,64 % Na; 9,91 % Mg; 3,48 % Al; 22,09 % Si; 1,37 % S и 1,00 % Ca и 10,72 % Mn. Фазовый состав однороден и включает основные компоненты (оксиды кремния, марганца и магния, с незначительным содержанием алюминия и натрия).

В работе [17] микроструктура в нижнем, среднем и верхнем слоях наплавки состоит из мартенсита отпуска (рис. 3, *а*) и мартенсита, окруженного δ-ферритом (рис. 3, *б*, *в*). Тепло, возникающее при наплавлении третьего слоя, привело к отпуску мартенсита во втором слое, однако δ-феррит не подвергся воздействию. Таким образом, в середине наплавки образовался мартенсит отпуска, окруженный δ-ферритом.

В работе [18] исследовали возможность повышения структурных качеств наплавленных слоев (твердость и износостойкость) путем введения титана в состав ПП систем Fe – C – Si – Mn – – Cr – Mo – Ni и Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V,

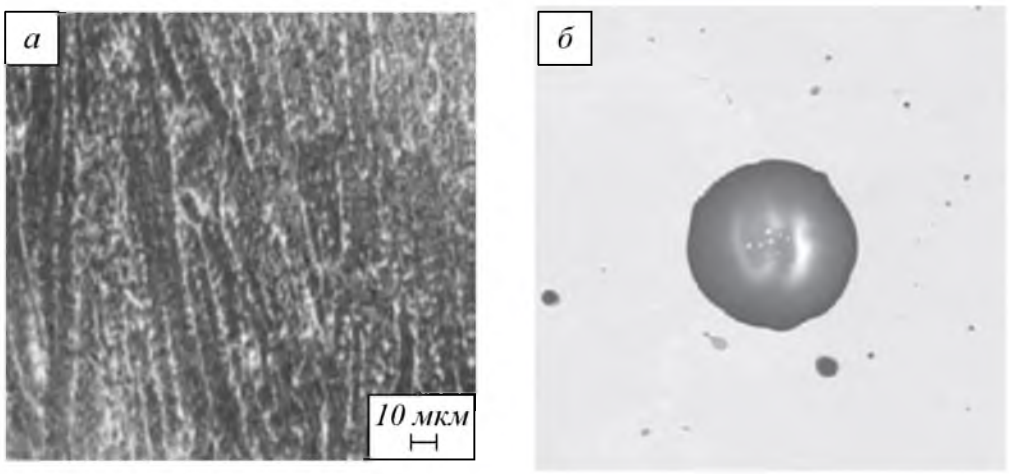


Рис. 2. Микроструктура наплавленного покрытия системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo (*а*) и неметаллическое включение диаметром 33 мкм (*б*) [15]
Fig. 2. Microstructure of the deposited coating of the Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo system (*a*) and a non-metallic inclusion with a diameter of 33 μm (*б*) [15]

а также химический состав, структура, твердость и износостойкость слоев, наплавленных на сталь марки 09Г2С (рис. 4). При изучении степени загрязненности полученных наплавок неметаллическими включениями установлено наличие преимущественно недеформируемых силикатов и точечных оксидов. Увеличение содержания титана в наплавленных слоях незначительно влияет на уровень их загрязненности, при этом, наименьшее загрязнение наблюдается при пониженном содержании титана в слоях. Для слоев, наплавленных ПП системы Fe – C – Si – Mn – – Cr – Mo – Ni – Ti, наименьшее загрязнение точечными оксидами и недеформируемыми силикатами установлено при содержании 0,008 и 0,013 % Ti. При увеличении концентрации титана до 0,019 и 0,035 % в наплавленных слоях наряду с оксидными включениями и недеформируемыми силикатами происходит образование нитридных включений. Для слоев, наплавленных ПП системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti, наименьший уровень загрязненности неметаллическими включениями установлен при содержании 0,024 % Ti. Незначительная степень загрязненности исследуемых наплавленных слоев не оказывает отрицательного влияния на их свойства и приемлема для использования исследуемых ПП. Добавление титанового порошка в состав ПП систем Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V и Fe – C – – Si – Mn – Cr – Mo – Ni оказывает положительное влияние на микроструктуру наплавленных слоев. С увеличением содержания титана уменьшаются размеры игл мартенсита и первичного зерна аустенита. Улучшение микроструктуры наплавленных слоев с увеличением содержания титанового флюса в ПП сопровождается повышением твердости и снижением скорости износа слоев.

В работе [19] изображения поперечного сечения покрытий WC – Co (рис. 5, *а*) и Ni/WC – Co (рис. 5, *б*), полученных лазерной наплавкой. Покрытия характеризуются низким уровнем дефектов, а Ni/WC – Co демонстрирует более тонкую микроструктуру и более высокую износостойкость по сравнению с покрытием WC – Co. Покрытия состоят из фаз WC – Co, W_2C, Me_6C (Co_3W_3C, Fe_3W_3C и Ni_3W_3C) и α (Co, Ni и Fe).

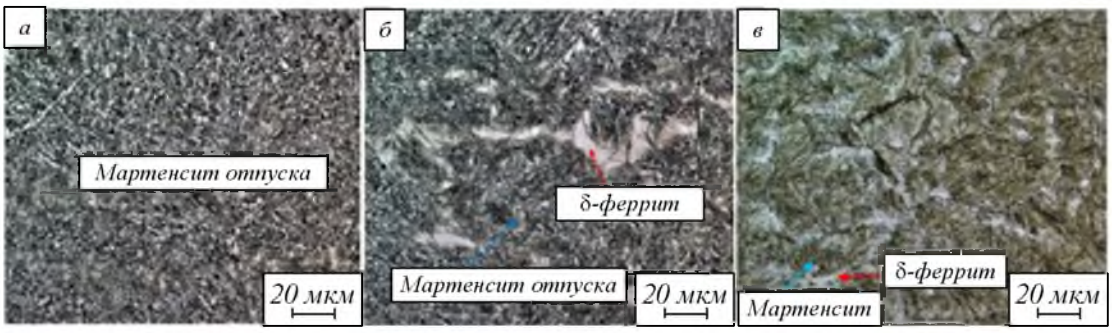


Рис. 3. Микроструктура наплавленного покрытия системы Fe – Cr – C – Mo – Mn:
а – в – нижний, средний, верхний слои [17]
Fig. 3. Microstructure of the deposited coating of the Fe – Cr – C – Mo – Mn system:
а – в – lower, middle, upper layers [17]

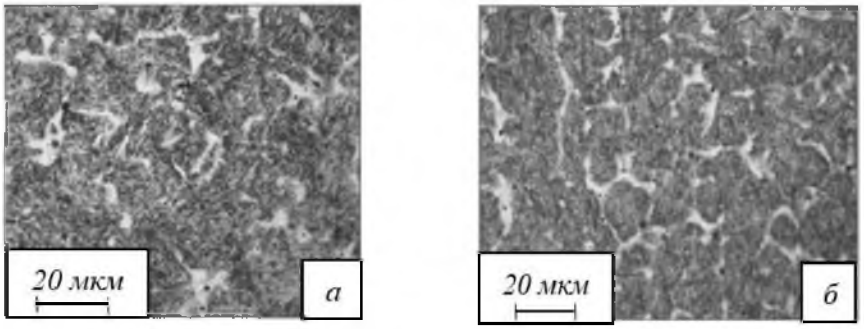


Рис. 4. Микроструктура образцов Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti (*а*) и Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V – Ti (*б*) [18]
Fig. 4. Microstructure of samples Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti (*а*) and Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V – Ti (*б*) [18]

В работе [20] исследовали электродуговые покрытия систем Fe – Cr – C и Fe – Cr – B. Электродуговые покрытия имеют характерную пластинчатую структуру, где ламели в основном разделены оксидными пленками различной толщины и химической природы. Межламелярные границы содержат примеси сложных оксидов легирующих элементов ПП и поры (рис. 6). По сравнению с твердыми материалами, содержание хрома в шихте ПП 140Х12, 140Х12Н2ТЮ и 70Х12РЗГС2Ю, равное 12 мас. %, не гарантирует требуемой коррозионной стойкости ЭДП, полученных из этих ПП, в нейтральных водных средах.

Для снижения количества оксидов хрома в шихту ПП принято добавлять 1 – 2 мас. % Ti, Al, Si и B. Это объясняется тем, что реакции окисления этих элементов имеют более отрицательные значения свободной энергии, чем соответствующие реакции с хромом, и, следовательно, их оксиды образуются быстрее.

Предложены формулы для оценки оптимального содержания хрома в ПП систем легирования Fe – Cr – C и Fe – Cr – B. Эти формулы учитывают неравномерное распределение хрома в ламелях покрытий, обусловленное их микрогетерогенностью, а также обеднение твердого раствора хромом за счет образования оксидов, карбидов и боридов на основе хрома.

Выводы

В ходе исследования были проанализированы порошковые проволоки на основе систем, используемых для электродуговой наплавки: Fe – – C – Si – Mn – Cr – W – V, Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo, Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti, Fe – – C – Si – Mn – Cr – W – V– Ti, WC – Co, Ni/WC – Co, Fe – Cr – C и Fe – Cr – B.

Исследуемое покрытие порошковой проволоки на основе системы Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V имеет высокое содержание углерода и вольфрама. В структуре наплавленного покрытия наблюдается грубоигольчатый мартенсит и неравномерное распределение неметаллических включений. Наплавленные слои имеют микроструктуру «волокнистого строения», характеризующейся четко выраженными межзеренными границами.

Покрытие порошковой проволоки на основе системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo содержит меньше углерода, чем в первой системе. Микроструктура покрытия отличается сниженым количеством включений и имеет дендритное строение, которое представляет собой грубоигольча-

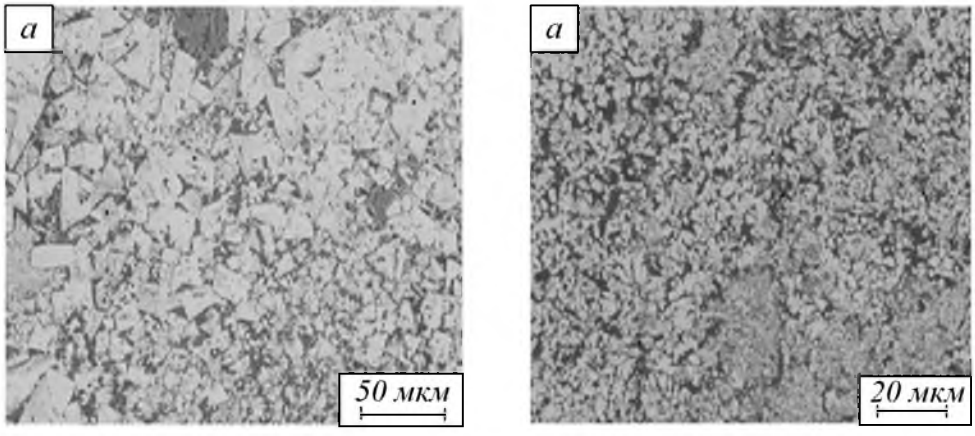


Рис. 5. Микроструктура наплавок WC – Co (*а*) и Ni/WC – Co (*б*) [19]
Fig. 5. Microstructure of surfacing WC – Co (*а*) and Ni/WC – Co (*б*) [19]

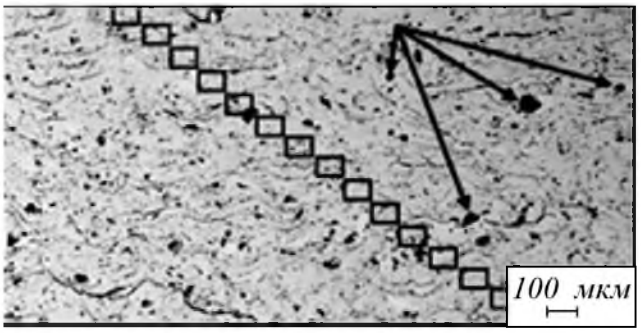


Рис. 6. Схема определения локального содержания легирующих элементов в покрытии, стрелками обозначены поры [20]
Fig. 6. Scheme for determining the local content of alloying elements in the coating, arrows indicate pores [20]

тый мартенсит, что характерно для литых металлов.

С увеличением содержания титана в рассмотренных системах Fe – C – Si – Mn – Cr – W – V – Ti и Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – Ti улучшается микроструктура наплавленных слоев, которая сопровождается повышением твердости и снижением скорости износа слоев.

Электродуговые покрытия систем Fe – Cr – C и Fe – Cr – B имеют характерную пластинчатую структуру, где межламелярные границы содержат примеси сложных оксидов легирующих элементов ПП и поры.

Наплавленные покрытия на основе систем WC – Co и Ni/WC – Co, полученных лазерной наплавкой, характеризуются низким уровнем дефектов, где покрытие системы Ni/WC – Co имеет более тонкую микроструктуру и более высокую износостойкость по сравнению с покрытием WC – Co.

Порошковая проволока Fe – C – Si – Mn – Cr – – Ni – Mo может быть рекомендована для применения при условиях, требующих защиты от коррозии, но с умеренными нагрузками.

Порошковая проволока Fe – C – Si – Mn – Cr – – W – V отлично подходит для эксплуатации в условиях, где требуется высокая износостойкость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron. *Welding International*. 2008;22(11):796–800. *https://doi.org/10.1080/09507110802593646*
2. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lehchilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium-carbon austenite. *Welding International*. 2015;29(10):819–822. *https://doi.org/10.1080/09507116.2014.986891*
3. Пегашкин В.Ф. Сравнительный анализ технологий обработки прокатных валков. *Черные металлы*. 2024;11:22–26.
4. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy. *Materials Science and Technology*. 2014;30(3):316–322. *https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000359*
5. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Михно А.Р., Усольцев А.А., Денисов П.А. Изучение влияния введения в состав порошковой проволоки марки 35В9Х3СФ углеродфторсодержащей добавки. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2019;4(30):16–20.
6. Михайловский Г.М., Нгуен В.В., Захаров П.К. Формирование износостойких слоев дуговой наплавкой с использованием порошковых проволок. *Глобальная энергия*. 2024;30(4):53–64.
7. Емелюшин А.Н., Петроченко Е.В., Нефедьев С.П. Исследование структуры и ударно-абразивной износостойкости покрытий системы Fe – C – Cr – Mn – Si, дополнительно легированных азотом. *Сварочное производство*. 2011;10:18–22.
8. Еремин Е.Н., Лосев А.С., Бородихин С.А., Маталасова А.Е., Пономарев И.А. Порошковая проволока для наплавки коррозионностойкой и износостойкой стали. *Вестник машиностроения*. 2018;7:66–68.
9. Макиенко В.М., Соколов П.В., Перваков Д.Г. Восстановление деталей и узлов подвижного состава методом электродуговой наплавки. *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона*. 2016;1(6):6–11.
10. Li R., He D.Y., Zhou Z., Wang Z.J., Song X.Y. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings. *Surface Engineering*. 2014;30(11):784–790.
11. Бородихин С.А., Еремин Е.Н., Лосев А.С. Порошковая проволока с карбидом бора для восстановительной наплавки прокатных валков. *Россия молодая: передовые технологии – в промышленность*. 2015;1:11–14.
12. Яковлев Д.С. Анализ технологических особенностей сварки порошковой проволокой. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия»*. 2014;14(2):92–95.

13. Babinets A.A., Ryabtsev I.A., Panfilov A.I., Zhdanov V.A., Ryabtsev I.I. Influence of methods of arc surfacing with flux-cored wire on penetration of base metal and formation of deposited metal. *The Paton Welding Journal*. 2016;11:17–22. *https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.03*
14. Ryabtsev I.O., Babinets A.A., Lentugov I.P., Zhdanov V.O., Ryabtsev I.I., Osin V.V. Methods of Investigation of the Deposited Metal Properties and Their Application for the Development of Flux Cored Wires. *Materials Science*. 2024;59(4):467–473.
15. Козырев Н.А., Осетковский И.В., Усольцев А.А., Полевой Е.В., Михно А.Р. Исследование состава неметаллических включений и микроструктуры электродугового покрытия, сформированного с использованием порошковой проволоки системы Fe – C – Si – – Mn – Cr – Ni – Mo. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022;65(6):421–426. *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-421-426*
16. Райков С.В., Коновалов С.В., Капралов Е.В., Будовских А.Е., Целлермаер В.Я. Формирование износостойких поверхностных слоев наплавкой. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015;58(10):769–774. *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-10-769-774*
17. Pournajaf E., Abbasi A., Hamidreza N. Microstructure and wear resistance of single- and multi-layered low-carbon Fe – Cr – C – Mo – Mn clads deposited by shielded metal arc welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(10):7704–7715.
18. Kibko N.V., Usoltsev A.A., Mikhno A.R., Sychev A.A. Effect of titanium on the structure and properties of clad metal from powder wires of Fe – C – Si – Mn – Cr – W– V and Fe – C – – Si – Mn – Cr – Mo – Ni Systems. *Metal Science and Heat Treatment*. 2022;64(5–6):281–284. *https://doi.org/10.1007/s11041-022-00801-1*
19. Erfanmanesh M., Shoja-Razavi R., Abdollah Pour H., Mohammadian Semnani H., Barekat M., Hashemi S.H. Friction and wear behavior of laser cladded WC – Co and Ni/WC – Co deposits at high temperature. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019;81:137–148.
20. Stupnytskyi T.R., Student M.M., Pokhmurska H.V., Hvozdetskyi V.M. Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe – Cr – C and Fe – Cr – B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings. *Materials Science*. 2016;52(2):165–172. *https://doi.org/10.1007/s11003-016-9939-8*

REFERENCES

1. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron. *Welding International*. 2008;22(11):796–800. *https://doi.org/10.1080/09507110802593646*
2. Filippov M.A., Shumyakov V.I., Balin S.A., Zhilin A.S., Lehchilo V.V., Rimer G.A. Structure and wear resistance of deposited alloys based on metastable chromium-carbon austenite. *Welding International*. 2015;29(10):819–822. *https://doi.org/10.1080/09507116.2014.986891*
3. Pegashkin V.F. Comparative analysis of mill roll processing technologies. *Chernye metally*. 2024;11:22–26. (In Russ.).
4. Liu D.S., Liu R.P., Wei Y.H. Influence of tungsten on microstructure and wear resistance of iron base hardfacing alloy. *Materials Science and Technology*. 2014;30(3):316–322. *https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000359*
5. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Mikhno A.R., Usol'tsev A.A., Denisov P.A. Study of the effect of introducing a carbon-fluorine-containing additive into the composition of flux-cored wire grade 35V9Kh3SF. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2019;4(30):16–20. (In Russ.).
6. Mikhailovskii G.M., Nguen V.V., Zakharov P.K. Formation of wear-resistant layers by arc surfacing using flux-cored wires. *Global'naya ehnergiya*. 2024;30(4):53–64. (In Russ.).
7. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V., Nefed'ev S.P. Study of the structure and impact-abrasive wear resistance of coatings of the Fe – C – Cr – Mn – Si system, additionally alloyed with nitrogen. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2011;10:18–22. (In Russ.).
8. Eremin E.N., Losev A.S., Borodikhin S.A., Matalasova A.E., Ponomarev I.A. Flux-cored wire for surfacing corrosion-resistant and wear-resistant steel. *Vestnik mashinostroeniya*. 2018;7:66–68. (In Russ.).
9. Makienko V.M., Sokolov P.V., Pervakov D.G. Restoration of rolling stock parts and assemblies using electric arc surfacing. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona*. 2016;1(6):6–11. (In Russ.).
10. Li R., He D.Y., Zhou Z., Wang Z.J., Song X.Y. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings. *Surface Engineering*. 2014;30(11):784–790.
11. Borodikhin S.A., Eremin E.N., Losev A.S. Boron carbide flux-cored wire for restorative surfacing of rolling rolls. *Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – v promyshlennost'*. 2015;1:11–14. (In Russ.).
12. Yakovlev D.S. Analysis of technological features of flux-cored wire welding. *Vestnik Yu-*

zhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Metallurgiya». 2014;14(2):92–95. (In Russ.).

13. Babinets A.A., Ryabtsev I.A., Panfilov A.I., Zhdanov V.A., Ryabtsev I.I. Influence of methods of arc surfacing with flux-cored wire on penetration of base metal and formation of deposited metal. *The Paton Welding Journal*. 2016;11:17–22. *https://doi.org/10.15407/tpwj2016.11.03*
14. Ryabtsev I.O., Babinets A.A., Lentugov I.P., Zhdanov V.O., Ryabtsev I.I., Osin V.V. Methods of Investigation of the Deposited Metal Properties and Their Application for the Development of Flux Cored Wires. *Materials Science*. 2024;59(4):467–473.
15. Kozyrev N.A., Osetkovskii I.V., Usol'tsev A.A., Polevoi E.V., Mikhno A.R. Study of the composition of non-metallic inclusions and microstructure of an electric arc coating formed using a flux-cored wire of the Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo system. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2022;65(6):421–426. (In Russ.). *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-421-426*
16. Raikov S.V., Konovalov S.V., Kapralov E.V., Budovskikh A.E., Tsellermaer V.Ya. Formation of wear-resistant surface layers by surfacing. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2015;58(10):769–774. (In Russ.). *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-10-769-774*
17. Pournajaf E., Abbasi A., Hamidreza N. Microstructure and Wear Resistance of Single- and Multi-Layered Low-Carbon Fe – Cr – C – Mo – – Mn Clads Deposited by Shielded Metal Arc Welding. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(10):7704–7715.
18. Kibko N.V., Usoltsev A.A., Mikhno A.R., Sychev A.A. Effect of Titanium on the Structure and Properties of Clad Metal from Powder Wires of Fe – C – Si – Mn – Cr – W– V and Fe – C – Si – – Mn – Cr – Mo – Ni Systems. *Metal Science and Heat Treatment.* 2022;64(5-6):281–284. *https://doi.org/10.1007/s11041-022-00801-1*
19. Erfanmanesh M., Shoja-Razavi R., Abdollah Pour H., Mohammadian Semnani H., Barekat M., Hashemi S.H. Friction and wear behavior of laser cladded WC – Co and Ni/WC – Co deposits at high temperature. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019;81:137–148.
20. Stupnytskyi T.R., Student M.M., Pokhmurska H.V., Hvozdetskyi V.M. Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe – Cr – C and Fe – Cr – B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings. *Materials Science*. 2016;52(2):165–172. https://doi.org/10.1007/s11003-016-9939-8

Сведения об авторах:

Алексей Романович Михно, *научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений*, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: mihno_ar@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-7305-6692
SPIN-код: 5553-1164

Галина Игоревна Махнева, *инженер-исследователь лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений*, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: glcherepanova25@mail.com
ORCID: 0009-0003-2592-6539
SPIN-код: 3610-9340

Николай Павлович Ломиворотов, *инженер-исследователь лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений*, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: lomivorotov_np@sibsiu.ru
ORCID: 0009-0000-7953-2920

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

Ирина Алексеевна Панченко, *к.т.н., заведующий лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений*, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: panchenko_ia@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-1631-9644
SPIN-код: 4253-6679

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:

Aleksei R. Mikhno, *Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing*, Siberian State Industrial University
E-mail: mihno_ar@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-7305-6692
SPIN-код: 5553-1164

Galina I. Makhneva, *research engineer at the Electron Microscopy and Image Processing Laboratory*, Siberian State Industrial University
E-mail: glcherepanova25@mail.com
ORCID: 0009-0003-2592-6539
SPIN-код: 3610-9340

Nikolai P. Lomivorotov, *Research Engineer at the Electron Microscopy and Image Processing Laboratory,* Siberian State Industrial University
E-mail: lomivorotov_np@sibsiu.ru
ORCID: 0009-0000-7953-2920

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

Irina A. Panchenko, *Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Senior Researcher of the Scientific Research Department*, Siberian State Industrial University
E-mail: panchenko_ia@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-1631-9644
SPIN-код: 4253-6679

Sergei V. Konovalov, *Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation Activities,* 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 03.02.2026
После доработки 01.03.2026
Принята к публикации 11.03.2026

Received 03.02.2026
Revised 01.03.2026
Accepted 11.03.2026

Оригинальная статья

УДК 669.046:662.61.66-971

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-103-113

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЗОКИСЛОРОДНЫХ ФАКЕЛОВ С РАСПЛАВОМ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ КОНВЕРТЕРОВ

© 2026 г. Е. В. Протопопов, Е. А. Беленецкий, Н. Ф. Якушевич, Е. М. Запольская

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

Аннотация. Современные тенденции в конвертерном производстве стали характеризуются активным внедрением ресурсо- и энергосберегающих технологий, направленных на повышение эффективности металлургических процессов. Проанализированы перспективные методы выплавки стали с получением металлического полупродукта непосредственно в конвертере, а также рассмотрены технологические решения по утилизации техногенных отходов. Особое внимание уделено опыту применения комбинированной продувки, которая значительно расширяет функциональные возможности агрегатов за счет использования новых композитных материалов на основе промышленных отходов. Показано, что внедрение таких технологий способствует не только снижению себестоимости производства, но и повышению экологической безопасности металлургических предприятий. В работе обосновывается необходимость разработки новых компоновок оборудования и технологических решений, включая предварительный подогрев лома и других шихтовых материалов, а также методы интенсификации дожигания CO для оптимизации энергопотребления. Представлены ключевые аспекты повышения технико-экономических показателей плавки за счет рационального использования вторичных ресурсов и внедрения инновационных подходов к управлению процессом. Проведенный термодинамический анализ показал, что применение факельного горения в рабочем пространстве конвертера существенно изменяет состав газовой фазы. Помимо традиционных компонентов (O_2, CO, CO_2), в системе появляются H_2 и H_2O, что приводит к изменению окислительной способности газовой фазы; модификации теплового режима процесса. Оптимизация состава газокислородного топлива должна учитывать выявленные термодинамические закономерности для обеспечения эффективного протекания металлургических процессов.

Ключевые слова: конвертерная плавка, комбинированная продувка, техногенные отходы, ресурсосбережение, энергоэффективность, предварительный подогрев лома, интенсификация процессов

Для цитирования: Протопопов Е.В., Беленецкий Е.А., Якушевич Н.Ф., Запольская Е.М. Исследование процессов взаимодействия газокислородных факелов с расплавом в рабочем пространстве конвертеров. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2026;1(55):103–113. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-103-113*

Original article

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF INTERACTION OF OXYGEN GAS FLARES WITH MELT IN THE WORKING SPACE OF CONVERTERS

© 2026 E. V. Protopopov, E. A. Belenetsky, N. F. Yakushevich, E. M. Zapolskaya

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

Abstract. Current trends in converter steel production are characterized by the active introduction of resource- and energy-saving technologies aimed at improving the efficiency of metallurgical processes. Promising methods of steel smelting to produce a metal intermediate directly in a converter are analyzed, and technological solutions for the disposal of man-made waste are considered. Special attention is paid to the experience of using combined purging, which significantly expands the functionality of the units through the use of new composite materials based on

industrial waste. It is shown that the introduction of such technologies contributes not only to reducing the cost of production, but also to improving the environmental safety of metallurgical enterprises. The paper substantiates the need to develop new equipment upgrades and technological solutions, including preheating scrap and other charge materials, as well as methods for intensifying CO afterburning to optimize energy consumption. The key aspects of improving the technical and economic performance of smelting through the rational use of secondary resources and the introduction of innovative approaches to process management are presented. The thermodynamic analysis showed that the use of flare combustion in the working space of the converter significantly changes the composition of the gas phase. In addition to the traditional components (O_2, CO, CO_2), H_2 and H_2O appear in the system, which leads to a change in the oxidizing ability of the gas phase; modification of the thermal regime of the process. Optimization of the composition of oxygen gas fuel should take into account the revealed thermodynamic patterns to ensure the efficient flow of metallurgical processes.

Keywords: converter melting, combined purging, man-made waste, resource conservation, energy efficiency, preheating of scrap, intensification of processes

For citation: Protopopov E.V., Belenetsky E.A., Yakushevich N.F., Zapolskaya E.M. Investigation of the processes of interaction of oxygen gas flares with melt in the working space of converters. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):103–113. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-103-113*

Введение

За последние годы основные подходы к определению оптимальных условий выплавки стали в конвертерах существенно изменились в связи с реализацией технологических вариантов плавки с получением в агрегате металлического полупродукта и поисках технических решений по ресурсо- и энергосбережению при переработке различных техногенных отходов. В тоже время, накопленный опыт использования в отечественной отрасли и за рубежом комбинированной продувки в конвертерах позволили существенно расширить функциональные возможности процесса с точки зрения применения различных новых комплексных материалов на основе техногенных отходов, что будет способствовать повышению технико-экономических показателей плавки [1 – 5].

С целью оптимизации характеристик рассматриваемых процессов должны быть созданы новые компоновки оборудования агрегатов и технологических мероприятий, обеспечивающих в том числе предварительный подогрев лома и других шихтовых материалов, интенсификацию дожигания отходящих газов и окислительно-восстановитель-ных процессов в жидкой ванне при сохранении стойкости дутьевых устройств и футеровки конвертеров (рис. 1).

Для решения таких многоцелевых технологических задач в каждом из возможных вариантов процесса широко используются высокотемпературные разноимпульсные газовые струи и газокислородные факелы горения [6 – 9]. Поэтому важным представляется изучение и оценка вклада факелов горения в окислительно-восстановительные процессы в барботируемой конвертерной ванне.

Сжигание газообразного топлива в рабочем пространстве конвертера при формировании погружных факелов горения будет значительно изменять общую гидродинамическую картину в реакционных зонах и жидкой ванне. Необходимо учитывать, что в газокислородных струях сложной структуры при формировании и по ходу течения в рабочем пространстве будут изменяться температура, объем и состав газа. При этом объем выделяющихся газов будет изменяться не только из-за роста температуры, но и в результате химических реакций, которые могут протекать как с увеличением, так и с уменьшением объема реагирующих фаз и системы в целом.

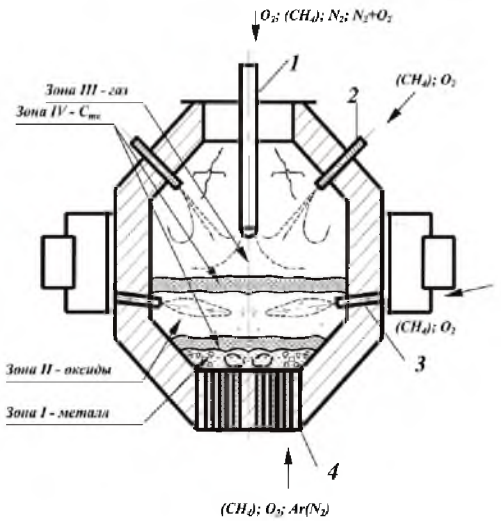


Рис. 1. Схема конвертерного процесса с жидкофазным восстановлением техногенных отходов:
1 – дутьевая фурма; *2* и *3* – газокислородные горелки при формировании факелов в рабочем пространстве и под уровень расплава; *4* – донные фурмы;
I – IV – выделенные зоны взаимодействия фаз

Fig. 1. Schemes of the converter process by liquid–phase recovery of man–made waste:
1 – blast tuyeres; *2* and *3* – gas-oxygen burners when forming torches in the working space and under the melt level;
4 – bottom tuyeres; *I – IV* – selected zones of phase interaction

Методы и результаты исследований

Динамика процессов горения газообразного топлива и окисления элементов в конвертерной ванне при взаимодействии с высокотемпературными продуктами сгорания может быть определена известными термодинамическими методами [10 – 12], а расчеты процессов взаимодействия факелов с химическими элементами металлического расплава с определенными допущениями могут быть проведены для равновесных условий. В реальных условиях конвертерной плавки достижение равновесия отдельных реакций и всей системы в целом практически невозможны, однако такие расчеты могут обеспечить возможность выявления наиболее существенных взаимосвязей в поведении элементов расплава и установить направление реакций в процессах окисления – восстановления дополнительных присадок и примесей металлозавалки.

Схема взаимодействий компонентов при сжигании газообразного углеводородного топлива в рабочем пространстве конвертера может быть представлена при анализе диаграммы состояния системы C – H_2 – O_2 (рис. 2), которая позволяет количественно оценить состав продуктов реакций на разных этапах процесса горения [10].

На диаграмме можно выделить три характерных области. Поле области H_2 – H_2O – CO_2 – CO будет соответствовать четырехкомпонентным составам смесей продуктов окисления (CO + CO_2 + + H_2O + H_2) исходных углеводородных смесей C_nH_m + H_2 + C и дополнительно присутствующему молекулярному кислороду (P_{O_2} = 10^{-9} ÷ 10^{-18} атм.). Выше этой области расположено поле составов газов, состоящих из продуктов сжигания (CO_2, H_2O и O_2), а ниже – поле восстановительных газовых смесей, состоящих из CO, H_2 недоокисленных углеводородов и твердого углерода.

При сжигании метана CH_4 и использовании в качестве окислителя кислородных смесей, выделенный участок будет расположен на соединительной линии CH_4 – O_2. При сжигании других газов (например, ацетилена C_2H_2) кривая будет расположена соответственно на линии C_2H_2 – O_2 или других смесей окислителя и углеводородов.

В реальных условиях окисление природного газа, состоящего, в основном, из метана, будет осуществляться в две стадии. На первой стадии при температурах 1146 – 1746 К происходит конверсия углеводородов по реакции

$$2CH_4 + O_2 = 2CO + 4H_2. \qquad (1)$$

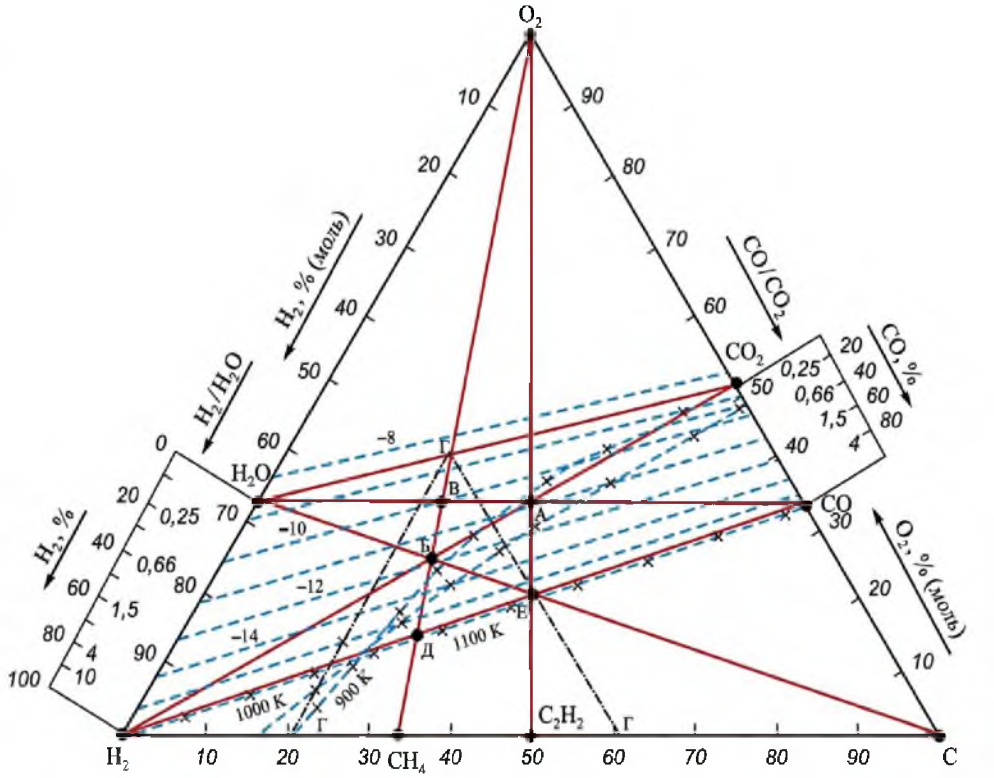


Рис. 2. Диаграмма состояния системы C – H_2 – O_2:
– –×– – – изотермическая граница области углеродоотложения при температуре 1100, 1000 и 900 К;
– – – – – линии постоянных значений lgP_{O2} при 1100 К

Fig. 2. Diagram of the state of the C – H_2 – O_2 system:
– –×– – – isothermal boundary of the carbon deposition region at a temperature of 1100, 1000 and 900 K;
– – – – – lines of constant lgP_{O2} values at 1100 K

На второй стадии происходит дожигание оксида углерода и водорода по реакциям

$$2CO + O_2 = 2CO_2; \quad (2)$$
$$4H_2 + 2O_2 = 4H_2O. \quad (3)$$

Тогда сжигание газа в факелах горения может быть описано суммирующей реакцией:

$$1/2CH_4 + O_2 = 1/2CO_2 + H_2O, \quad (4)$$

где $\Delta G°_{(4)1650\ K}$ = –377 907 Дж/моль O_2; $\Delta G°_{(4)2000\ K}$ = –355 975 Дж/моль O_2.

В рассматриваемом случае и далее для получения корректных сравнительных оценок все реакции приведены к 1 моль O_2.

Количество и состав продуктов реакции будут зависеть в первую очередь от количества кислорода в газокислородной смеси (рис. 2). При отсутствии углерода и недостатке кислорода, например, если состав газокислородной смеси соответствует точке *Д* (27 % С, 58 % H_2, 14,5 % O_2), лежащей на пересечении линий $CH_4 – O_2$ и $H_2 – CO$, соответствую содержанию 16,8 % O_2 от количества метана, происходит конверсия газа по реакции (1). При этом в качестве продуктов реакции будут образовываться H_2 и CO в соотношении, равным длинам отрезков (CO – *Д*):(H_2 – *Д*) или (56,8 % H_2):(43,2 % CO). Тогда при увеличении содержания кислорода в газокислородной смеси до 25 % (точка *Б*) окисление метана будет осуществляться по следующим реакциям параллельно с протеканием реакции (1) (рис. 2):

$$CH_4 + O_2 = CO_2 + 2H_2; \quad (5)$$
$$1/2CH_4 + O_2 = 1/2CO_2 + H_2O; \quad (6)$$
$$1/3CH_4 + O_2 = 2/3H_2O + 1/3CO. \quad (7)$$

Состав продуктов реакции в области H_2 – – H_2O – CO_2 – CO и, соответственно, соотношение степени протекания реакций (1), (4) – (7) будет контролироваться константой равновесия *K* реакции водяного газа:

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2;$$
$$K_{(Д)} = (P_{CO_2}/P_{CO})(P_{H_2}/P_{H_2O}), \quad (8)$$

где *P* – равновесные парциальные давления газов, МПа.

Кроме того, для газовых смесей с высокой концентрацией CO указанное выше отношение также будет контролироваться константой равновесия реакции:

$$2CO \leftrightarrow CO_2 + C_{тв}, \quad (9)$$

протекающей с выделением сажистого углерода [10].

Причем при низких температурах рабочего пространства (менее 1100 К) зона выделения углерода уже в значительной степени будет совмещаться с областью существования многокомпонентной газовой смеси $H_2 – H_2O – CO_2 – CO$. Тогда при температурах выше 1100 К твердый углерод может присутствовать только в поле $H_2 – C – CO$, а при повышении концентрации H_2O возможно развитие реакции

$$H_2O + C = H_2 + CO. \quad (10)$$

Универсальной характеристикой состояния газовой фазы является парциальное давление кислорода P_{O_2}, которое может быть определено из констант равновесия реакций (2) и (3):

$$K_{(2)} = \frac{P^2_{CO_2}}{P_{O_2}P^2_{CO}}; \quad (11)$$

$$P_{O_2} = \frac{P^2_{CO_2}}{K_{(2)}P^2_{CO}}; \quad (12)$$

$$K_{(3)} = \frac{P^4_{H_2O}}{P^4_{H_2}P^2_{O_2}}; \quad (13)$$

$$P_{O_2} = \frac{P^2_{H_2O}}{P^2_{H_2}K^{1/2}_{(3)}}. \quad (14)$$

Таким образом, термодинамические параметры газовых реакций могут характеризоваться значениями $\Delta G° = f(T) = -P\ln K_P$ или отношением равновесных парциальных давлений $\frac{P_{CO}}{P_{CO_2}}$ или $\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}}$.

При анализе видно (рис. 2), что при полном сгорании метана до CO_2 и H_2O по реакции (4) необходимо, чтобы исходная газокислородная смесь соответствовала по составу точке *Г* $\frac{O_2}{CH_4} = \frac{Г - CH_4}{Г - O_2} = 0{,}6$, то есть в смеси должно присутствовать 40,9 % O_2 и 59,1 % CH_4 (смесь по составу должна соответствовать 100 % CH_4 и 69 % O_2, при этом будет образовываться газовая фаза, содержащая 40 % CO_2 и 60 % H_2O).

При меньшем количестве кислорода будет происходить неполное сгорание CO и H_2 (на второй стадии процесса), то есть в газовой фазе, кроме CO_2 и H_2O, будут также присутствовать H_2 и CO. При большем количестве кислорода в продуктах реакции дополнительно будет находиться и свободный кислород. Причем в обоих случаях полная энтальпия процесса будет снижаться: в первом случае за счет неполного протекания экзотермических реакций окисления водорода H_2 и оксида углерода CO, а во втором – за счет нагрева избыточного кислорода. В последнем варианте избыточный кислород можно полезно использовать как тепловой балласт при необходимости

снижения температуры факелов горения, например, при подаче через боковые фурмы (рис. 1).

Показатели равновесных процессов окисления метана кислородом, оксидом углерода CO_2 и водяным паром при температурах конвертерной ванны (1800 – 2200 К) приведены в таблице, где J – полная энтальпия конечных продуктов, отнесенная к 1 молю исходных реагентов, Дж/моль; γ^{C}_{CO} – степень превращения углерода исходных реагентов в CO; $\gamma^{H}_{H_2}$ – степень превращения водорода исходных реагентов в молекулярный водород; $\gamma^{C}_{CO_2}$ – степень превращения углерода исходных реагентов в CO_2; $\gamma^{H}_{H_2O}$ – степень превращения водорода исходных реагентов в H_2O; J'– полная энтальпия исходных реагентов, Дж/моль; $\alpha_{CO + H_2}$ – затраты энергии, отнесенные к 1 м^3 CO + H_2, кДж/м^3; $\alpha_{O_2 + CO_2}$ (или H_2O) – затраты энергии, отнесенные к единице исходных реагентов (O_2 + CO_2 + H_2O), кДж/м^3 (кДж/кг).

Следует отметить, что в рабочем пространстве конвертера в процессе окисления метана кислородом одновременно протекают все реакции, в том числе и реакции (8), (9), контролирующие в целом состав газовой фазы. В результате степень превращения углерода метана CH_4 в твердый углерод и водорода в H_2O при низких температурах (1100 – 1200 К) и давлении P = 0,1 МПа невелика. В тоже время при температурах конвертерной ванны 1600 – 2600 К степень конверсии метана до CO и H_2 будет достигать практически 100 % при соотношении CH_4 + 0,5O_2 и незначительно уменьшаться при увеличении концентрации кислорода в смеси до соотношения CH_4 + 2O_2 и повышении давления до 0,3 МПа (см. таблицу).

Как показывает выполненный термодинамический анализ [11] в области высоких температур 1200 – 2800 К при соотношении C/O = 1 в конечных продуктах присутствуют, в основном, молекулярный водород и оксид углерода (H_2 + CO). Концентрации CO и H_2 будет зависеть от исходного соотношения элементов в системе C – H – O и могут при C/O = 1 с достаточной точностью определяться из известных выражений [12 – 15]

$$N_{CO} = \frac{2\left(\frac{C}{H}\right)}{1+\left(\frac{C}{H}\right)}, \text{ моль;} \qquad (15)$$

$$N_{CO_2} = \frac{2\left(\frac{C}{H}\right)}{1+2\left(\frac{C}{H}\right)}, \text{ моль;} \qquad (16)$$

В тоже время при низких температурах в составе равновесных продуктов будут присутствовать также CH_4, CO_2, H_2O и конденсированный углерод $C_к$. Причем степень превращения углерода

Показатели равновесных процессов окисления метана кислородом, оксидом углерода CO_2 и водяным паром H_2O (P = 100 кПа)
Indicators of equilibrium processes of methane oxidation by oxygen, carbon monoxide CO_2 and water vapor H_2O (P = 100 kPa)

Показатель	Значение показателя							
	CH_4 + 0,5O_2		CH_4 + 2O_2		CH_4 + CO_2		CH_4 + H_2O	
	1600 К	2200 К	1800 К	2200 К	1800 К	2200 К	1800 К	2200 К
Состав продуктов, моль · Дж C:O = 1, H:C = 4	C/O = 1	H/O = 4	C/O=0,25	H/O = 1	C/O = 1	H/O = 2	C/O = 1	H/O = 6
H_2	0,6660	0,6628	0,0010	0,0070	0,4996	0,4970	0,7495	0,7457
CH_4	0,0002	–	–	–	0,0001	–	0,0002	–
H_2O	0,0001	–	0,6644	0,6467	0,0001	–	0,0001	–
CO	0,3332	0,3326	0,0019	0,0179	0,4999	0,4990	0,2499	0,2494
CO_2	–	–	0,3309	0,3106	–	–	–	–
O_2	–	–	0,0013	0,0109	–	–	–	–
ΣH	1,3340	1,3300	1,3310	1,3140	1,0000	0,9981	1,5000	1,4960
J	+10624	+25545	–232555	–191046	–7253	+7707	+19565	+34455
γ^{C}_{CO}	0,99860	0,99990	0,00565	0,05457	0,99970	0,99990	0,99930	0,99980
$\gamma^{H}_{H_2}$	0,998300	0,999100	0,001473	0,010650	0,999900	0,995800	0,999200	0,996600
$\gamma^{C}_{CO_2}$	0,000052	0,000100	0,994300	0,945400	0,000053	0,000010	0,000480	0,000009
$\gamma^{H}_{H_2O}$	0,002010	0,000052	0,998100	0,984300	0,000202	0,000053	0,000189	0,000048
J'	+21240	+51200	–222900	–19390	–14500	+15440	+39120	+69070
$\alpha_{CO + H2}$	1586	2260	308400	29820	4905	5582	4409	5087
$\alpha_{O2 + CO2}$	9511	13520	–13260	–11310	19610	22280	–	–

метана в оксид углерода (γ^{C}_{CO}) и степень превращения водорода метана в молекулярный водород ($\gamma^{H}_{H_2}$) при C/O = 1 и T = 1500 ÷ 2500 К составляют примерно 100 % [13; 15].

Повышение давления и увеличение соотношения C/H расширяют область существования конденсированного углерода (γ_C), которая сужается при росте соотношения O/C в системе.

При конверсии метана оксидом углерода CO степень превращения углерода в CO (γ^{C}_{CO}) при температурах конвертерной плавки будет снижаться до 0,6, а степень окисления водорода до H_2O возрастать до 0,95 и при конверсии парами воды, наоборот, уменьшаться до 0,7 (см. таблицу).

Таким образом, использование факелов горения изменяет состав газовой фазы в рабочем пространстве конвертера, в которой, кроме традиционно присутствующих при продувке кислородом газов O_2, CO, CO_2, появляются H_2 и H_2O. Причем присутствие этих газов будет изменять тепловой режим процесса и окислительную способность газовой фазы в целом.

Тогда при сжигании газокислородного топлива оптимальный состав исходной газовой смеси (природный газ и кислород) должен соответствовать составу 100 % CH_4 и 69 % O_2, при этом в качестве продукта реакций окисления образуется парогазовая фаза, содержащая 40 % CO_2 и 60 % H_2O. Причем только при окислении метана кислородом может быть достигнута температура факела более 1800 К, а использование в качестве окислителя воздуха, углекислого газа или паров воды не будет обеспечивать получение необходимого теплового эффекта.

Решение различных технологических задач в конвертерах, как правило, связывают с использованием многоцелевых дутьевых устройств и различных технологических газов, поэтому совершенно очевидно, что для данных условий из факелов горения в газовую фазу на различных этапах процесса также будут поступать пары воды и углекислый газ.

В рабочем пространстве агрегата при взаимодействии факелов с расплавом, подаваемый через горелки кислород, природный газ и продуваемый через основную фурму кислород также будут активно взаимодействовать с барботируемой шлакометаллической ванной [3; 16 – 18], в результате чего будут протекать процессы окисления – восстановления примисей металлозавалки – углерода, марганца, кремния, фосфора и железа

В дальнейшем при разработке и технологических положениях конвертерного процесса с жидкофазным восстановлением железосодержащих отходов проанализировали характеристики и поведение основных с точки зрения значимости для технологии химических элементов – железа и углерода.

Тогда возможные варианты развития окисления железа будут осуществляться по следующим реакциям [3; 15]:

$$2Fe + O_2 = 2FeO;$$

$$K_1 = \frac{a^2_{FeO}}{a^2_{Fe}\ P_{O_2}}; \qquad (17)$$

$$Fe + CO_2 = FeO + CO;$$

$$K_2 = \frac{a^2_{FeO}\ P_{CO}}{a^2_{Fe}\ P_{CO_2}}; \qquad (18)$$

$$2Fe + 2H_2O = 2(FeO) + 2H_2;$$

$$K_3 = \frac{a^2_{FeO}\ P^2_{H_2}}{a^2_{Fe}\ P^2_{H_2O}}. \qquad (19)$$

При известных значениях активностей α_{Fe} и α_{FeO} равновесие представленных реакций может однозначно характеризоваться составом газовой фазы, выраженным отношениями P_{CO}/P_{CO_2}, P_{H_2}/P_{H_2O} или более универсальной характеристикой – парциальным давлением кислорода P_{O_2}. Такой подход позволяет сопоставлять вероятность преимущественного протекания реакций окислительно-восстановительных процессов, в том числе при изменении составов газовой и конденсированных фаз. На рис. 3 представлена диаграмма зависимости значений $\Delta G° = f(T)$ для газообразных и некоторых конденсированных оксидов (например, FeO), равновесие которых характеризуется значениями P_{CO}/P_{CO_2}, P_{H_2}/P_{H_2O} и P_{O_2}, каждое из которых представлено на отдельной шкале, рассчитанной по константам равновесия достаточно хорошо изученных «газовых реакций» [10, 15].

Пересечение линеаризованных зависимостей $\Delta G° = f(T)$ для реакций взаимодействия восстановителей (C, H, CO, *Me*) с кислородом позволяет оценить при заданных условиях равновесный состав газовой фазы (P_{CO}/P_{CO_2}, P_{H_2}/P_{H_2O} и P_{O_2}) и возможность протекания той или иной реакции (рис. 3).

Исходные координаты точек C, O, H, CO на шкале $\Delta G°$ при 0 К были получены путем экстраполяции значений $\Delta G° = f(T)$ для газовых реакций на нулевые значения температур.

При окислении чистого железа с образованием оксидных фаз, насыщенных оксидом железа FeO, можно принять, что $\alpha_{Fe} = 1$ и $\alpha_{FeO} = 1$.

В этом случае равновесие реакции (17) при температуре плавления железа (точка K на линии) характеризуется параметрами T = 1808 К, $P_{O_2} \approx 9 \cdot 10^{-9}$ (точка K' на шкале P_{O_2}).

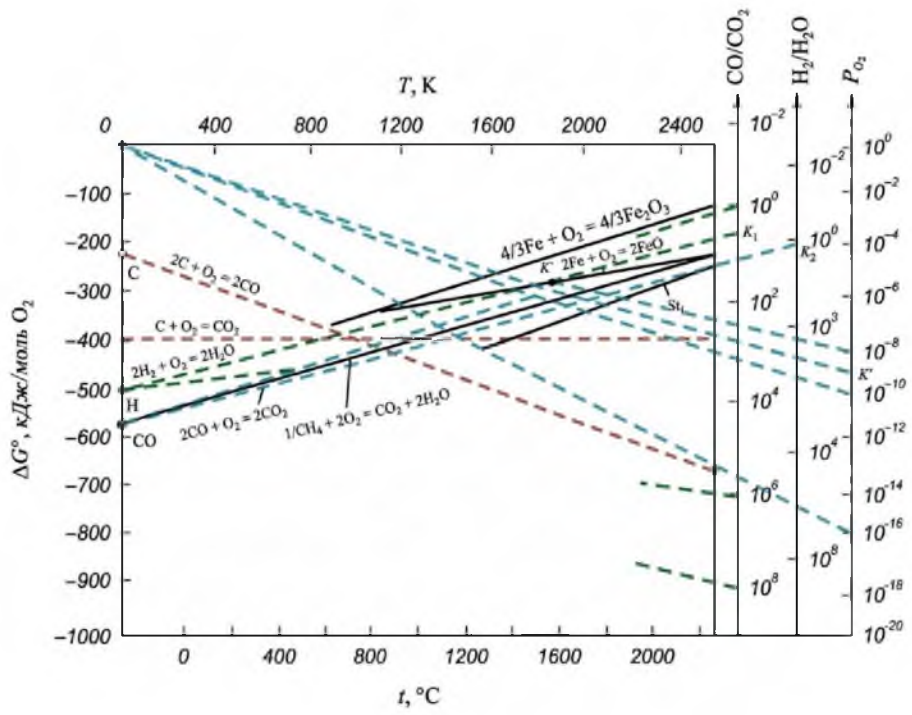


Рис. 3. Диаграмма $\Delta G° = f(T)$ реакций образования оксидов
Fig. 3. Diagram $\Delta G° = f(T)$ of reactions of formation of oxides

При небольшом (до 5 %) содержании примесей в металлическом расплаве активность железа при изменении температуры и концентрации примесей меняется незначительно. Так, например, при $T = 1600$ К и изменении концентрации углерода в металле от 3 до 4 % (область гомогенных расплавов) величина $\alpha_{Fe} = 0{,}80 \div 0{,}73$; при 1800 К и концентрации углерода менее 3 % – $\alpha_{Fe} = 0{,}99 \div 0{,}85$ %, а при 1973 К – $\alpha_{Fe} = 1 \div 0{,}86$ (рис. 3).

Активности оксида железа FeO в оксидных расплавах системы FeO – CaO – SiO_2 – MgO, соответствующих по составу 15 – 30 % FeO, 20 – 30 % SiO, в зависимости от состава и температуры при 1800 – 1900 К находятся в пределах 0,25 – 0,40 [19; 20].

Параметры окисления железа в расплаве, рассчитанные с учетом изменения активностей α_{Fe} и α_{FeO}, изменяются незначительно в основном в области низких температур (менее 1550 °С).

При окислении железа продуктами окисления метана (H_2O и CO_2) по реакциям (18) и (19) точка равновесных параметров K смещается в K_1 для реакции (18) ($P_{O_2} = 9 \cdot 10^{-10}$, $CO/CO_2 \approx 4$) и в K_2 для реакции (19) ($H_2/H_2O \approx 1$).

Таким образом, окисление железа возможно кислородом ($P_{O_2} = 10^{-11} \div 10^{-6}$), менее интенсивное окисление углекислым газом CO_2 ($P_{O_2} = 10^{-4} \div 10^{-2}$). Окисление железа парами воды при температурах конвертерной плавки практически невозможно.

При анализе процесса окисления углерода в рассматриваемых условиях следует отметить следующее.

Сжигание газообразного топлива в факелах горения описывается реакцией

$$1/2CH_4 + O_2 = 1/2CO_2 + H_2O;$$
$$\Delta G°_{(20)1650\ K} = -377{,}9\ кДж/моль\ O_2; \quad (20)$$
$$\Delta G°_{(20)2000\ K} = -356{,}0\ кДж/моль\ O_2.$$

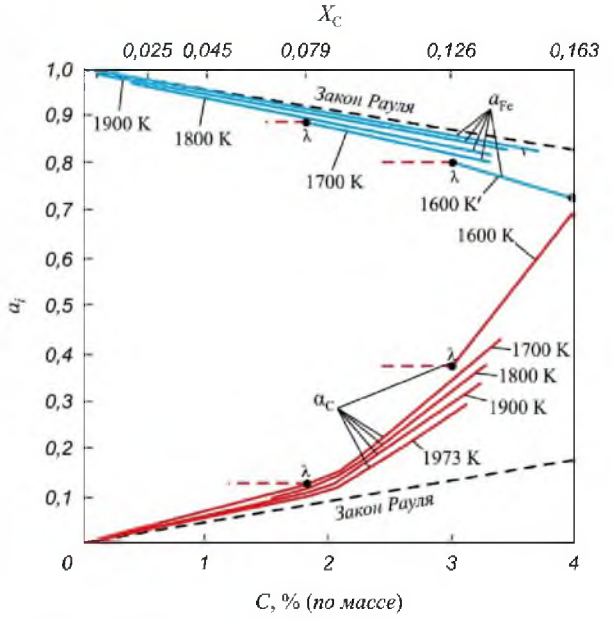


Рис. 4. Зависимость активностей железа и углерода в Fe – C расплавах от температуры и концентрации углерода:
● – граница двухфазных равновесий γ-Fe + X_C (ликвидус)
Fig. 4. Dependence of iron and carbon activities in Fe – C melts on temperature and carbon concentration:
● – is the boundary of two–phase equilibria γ-Fe + XC (liquidus)

Энергия Гиббса для этой реакции меньше, чем для реакции окисления твердого углерода до CO и CO_2 [21]:

$$2C + O_2 = 2CO; \quad (21)$$
$$\Delta G°_{(21)} = -235\,977 - 168{,}7T \text{ кДж/моль } O_2;$$
$$C + O_2 = CO_2;$$
$$\Delta G°_{(22)} = -397\,480 + 0{,}75T \text{ кДж/моль } O_2;$$
$$\Delta G°_{(21)1800\text{ K}} = -569{,}6 \text{ кДж/моль } O_2; \quad (22)$$
$$\Delta G°_{(21)2000\text{ K}} = -573{,}4 \text{ кДж/моль } O_2;$$
$$\Delta G°_{(22)1800\text{ K}} = -396{,}1 \text{ кДж/моль } O_2;$$
$$\Delta G°_{(22)2000\text{ K}} = -396{,}0 \text{ кДж/моль } O_2.$$

Такой анализ показывает [20], что присутствие твердого углерода (пылеугольного топлива или порошкообразного теплоносителя) в факелах горения может управлять и интенсифицировать процесс горения, причем наиболее эффективен процесс при окислении углерода до CO, то есть при коэффициенте избытка кислорода менее 1,0. При этом равновесные значения P_{O_2} будут находиться в пределах $10^{-15} \div 10^{-18}$, а $P_{CO}/P_{CO_2} > 10^4$.

При окислении углерода в расплаве при изменении активности углерода в зависимости от его концентрации и температуры от 0,65 до 0,30 (C = 4 %, T = 1473 ÷ 2273 K) и до 0,010 – 0,001 (C = 0,1 %, T = 1873 ÷ 2073 K) условия окисления углерода значительно изменяются.

В качестве окислителей углерода расплава могут выступать кислород, подаваемый на продувку, продукты окисления метана (CO_2 и H_2O) и оксиды железа окисленного шлака (см. таблицу) при взаимодействии углерода металла с кислородом по реакции (21):

$$K_{21} = P_{CO}^2 a_C^{-2} P_{O_2}^{-1},$$

при температурах 1723 – 2273 K, $P_{O2} = 10^{-17} \div 10^{-13}$.

Окислении углерода металла оксидом углерода CO_2 по реакции

$$C + CO_2 = 2CO; \quad (23)$$
$$\Delta G°_{(23)} = -170\,780 - 176{,}56T \text{ кДж/моль } O_2;$$
$$K_{(23)} = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2} a_{|C|}};$$
$$\Delta G°_{(23)1800\text{ K}} = -485\,024 \text{ Дж/моль } O_2;$$
$$\Delta G°_{(22)2000\text{ K}} = -519\,940 \text{ Дж/моль } O_2.$$

Рассматривая реальный процесс последовательно получим для начальной стадии плавки (после заливки чугуна) при температуре $T \approx 1600$ K; |C| = 3,2 %; $\alpha_C = 0{,}35$; $P_{CO}/P_{CO_2} = 3{,}4 \cdot 10^3$; в конце плавки при T = 1900 K, |C| = 0,5 %, $\alpha_C = 0{,}3$, $P_{CO}/P_{CO_2} = 2{,}5 \cdot 10^4$. Причем равновесное значение P_{O_2} в начале плавки будет составлять примерно $P_{O_2} \approx 10^{-16}$ и на заключительном этапе плавки $P_{O_2} \approx 10^{-11}$.

При окислении углерода парами воды по реакциям

$$2|C| + 2H_2O = 2CO + 2H_2; \quad (24)$$
$$|C| + 2H_2O = CO_2 + 2H_2; \quad (25)$$
$$\Delta G°_{(24)1800\text{ K}} = -245\,768 \text{ Дж/моль } O_2;$$
$$\Delta G°_{(24)2000\text{ K}} = -302\,820 \text{ Дж/моль } O_2;$$
$$\Delta G°_{(25)1800\text{ K}} = -249\,408 \text{ Дж/моль } O_2;$$
$$\Delta G°_{(25)2000\text{ K}} = -277\,150 \text{ Дж/моль } O_2.$$
$$K_{(24)} = \frac{P_{H_2}^2 P_{CO}^2}{P_{H_2O} a_{|C|}};$$
$$K_{(25)} = \frac{P_{H_2}^2 P_{CO_2}^2}{P_{H_2O} a_{|C|}}.$$

Для реакции (24) при |C| = 3 % и T = 1800 K, $\Delta G°$ = –30 206 Дж, при 2000 K $\Delta G°$ = –20 470 Дж; при C = 1,0 % $\Delta G°_{(24)1800}$ = –1228 Дж и $\Delta G°_{(24)2000}$ = –916,3 Дж соответственно, а при |C| = 0,1 % $\Delta G°_{(24)1800}$ = –30 Дж/ моль и $\Delta G°_{(24)2000}$ = –6,1 Дж/моль.

Для реакции (25) получим при |C| = 3 % и T = 1800 K, $\Delta G°_{(25)1800}$ = –249 408 Дж, при T = 2000 K $\Delta G°_{(25)2000}$ = –277 150 Дж; при |C| = 1 % $\Delta G°$ = –14 966 Дж, а при |C| = 0,1 %, $\Delta G°_{(25)1800}$ = –1247 Дж и $\Delta G°_{(25)2000}$ = –2771 Дж.

Таким образом, по ходу продувки окисление углерода металла газообразными окислителями осуществляется преимущественно кислородом, в меньшей степени оксидом углерода CO_2 ($P_{O2(22)} = 10^{-17} \div 10^{-13}$; $P_{O2(23)} = 10^{-16} \div 10^{-11}$; $CO/CO_2 = 2{,}5 \cdot 10^4$) и в очень незначительной степени возможно при низких температурах и высоких концентрациях углерода парами воды H_2O (при значениях P_{H_2}/P_{H_2O} менее 10^{-3}).

Рассматривая окисление углерода оксидами железа (FeO), находящимися в шлаковом расплаве возможно окисление по реакциям

$$2|C| + 2(FeO) = 2Fe + 2CO; \quad (26)$$
$$|C| + 2(FeO) = 2Fe + CO_2; \quad (27)$$
$$\Delta G°_{(26)1800\text{ K}} = -193\,184 \text{ Дж/моль } O_2;$$
$$\Delta G°_{(26)2000\text{ K}} = -319\,708 \text{ Дж/моль } O_2;$$
$$\lg K_{(26)1800} = 5{,}6;$$
$$\lg K_{(27)2000} = 9{,}28;$$
$$K_{(26)} = \frac{a_{(Fe)} P_{CO}^2}{a_{(FeO)}^2 a_{|C|}};$$
$$K_{(27)} = \frac{a_{(Fe)}^2 P_{CO}^2}{a_{(FeO)}^2 a_{|C|}}.$$

При T = 1800 K и содержании углерода в металле 3 % ($\alpha_C = 0{,}8$; $\alpha_{Fe} = 0{,}32$) равновесные значения должны составлять $P_{CO(27)1800\text{ K}} = K_{(27)1800\text{ K}}\ \alpha_C\ \alpha_{FeO} \times \alpha_{Fe}^{-1} = 7{,}635$; $P_{CO_2\ 1800\text{ K}} = K_{(11)1800\text{ K}} = 4{,}78 \cdot 10^8$; при T = 2000 K

($a_C = 0{,}25$; $a_{Fe} = 0{,}81$; $a_{FeO} = 0{,}4$) $P_{CO(27)2000\,K} = 5{,}4 \cdot 10^3$; $P_{CO_2\,2000\,K} = 2{,}3 \cdot 10^7$.

Таким образом, окисление углерода оксидами железа шлакового расплава по реакции (27) протекает преимущественно с образованием CO_2, при этом увеличении температуры расплава концентрация CO в газовой фазе также будет дополнительно увеличиваться.

Выводы

Выполненный термодинамический анализ физико-химических процессов, протекающих в рабочем пространстве конвертера при использовании факелов горения изменяет состав газовой фазы, в которой кроме традиционно присутствующих O_2, CO, CO_2 появляются H_2 и H_2O, что приводит к изменению окислительной способности газовой фазы и теплового режима операции. В качестве универсальной характеристики описания равновесия в системе *Me* – O – C целесообразно использовать парциальное давление кислорода P_{O_2}, а также сопутствующие характеристики P_{CO}/P_{CO_2} и P_{H_2}/P_{H_2O}. Окисление железа может осуществляться кислородом и в незначительной степени оксидом углерода CO_2. Водяной пар H_2O при температурах 1600 – 2000 К практически не окисляет железо. Окисление растворенного в металле углерода осуществляется достаточно эффективно кислородом и оксидом углерода CO_2 до концентрации менее 0,1 % С и будет возрастать с повышением температуры. При сжигании газокислородного топлива оптимальный состав исходной газовой смеси (природный газ и кислород) должен соответствовать составу 100 % CH_4 и 69 % O_2, при этом в качестве продукта реакций окисления образуется парогазовая фаза, содержащая 40 % CO_2 и 60 % H_2O. Важным представляется отметить, что только при окислении метана кислородом может быть достигнута температура факела более 1800 К, а использование в качестве окислителя воздуха, углекислого газа, паров воды не будет обеспечивать необходимого теплового эффекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорович К.В. Современное состояние черной металлургии и направления ее развития в цифровой экономике. В кн.: *Труды XV международного конгресса сталеплавильщиков*, Москва – Тула, 15-19 октября 2018 г. Москва: ООО «РПК ПринтАП», 2018:42–59.
2. Бойченко Б.М., Охотского В.Б., Харлашина П.С. *Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология.* Днепропетровск: Днепр-ВАЛ, 2006:454.
3. Протопопов Е.В., Уманский А.А., Шакиров М.К., Беленецкий Е.А., Фатьянов С.С. Физико-химическая модель рафинирования расплава в конвертерах с жидкофазным восстановлением. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2025;1(51):102–109. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-102-109*
4. Jiahui Wang, Qing Fang, Jin Jia, Kejie Huang, Weining Shi, Chengsong Liu, Hua Zhang. Melting mechanism of steel scrap in a converter with combined blowing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:7047–7058.
5. Puzyrev Yu.A., Puzyrev A.Yu. Installation of purge units for supplying inert gases to the molten metal in converters. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2023;64(3):229–233.
6. Меркер Э.Э., Карпенко Г.А. *Физические процессы в конвертере и энергоэкономические показатели производства*. Старый Оскол: Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», 2014:328.
7. Нугуманов Р.Ф., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Перспективные технологии предварительного подогрева лома в полости конвертера. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2009;2:63–66.
8. Heikki J. Experieces in Phsicochemical Modelling of Oxygen Converter Process (BOF). Shon International Symposium Advanced Principles. *Iron and Steel Making*. 2006;2:541–554.
9. Chao Liu, Shu-Guo Zheng, Miao-Yong Zhu. Variation in Multiphase Flow Characteristics by Single-Flow Post-combustion Oxygen Lance Blowing in BOF Steelmaking. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023;54B:1245–1261.
10. Yakushevich N.F., Strokina I.V., Polyakh O.A. Determining redox parameters in the Fe – C – O_2 – H_2 system. *Steel in Translation.* 2011;41(8):631–635.
11. Падерина С.Н., Рыжонкова Д.И., Серова Г.В. и др. *Термодинамика, кинетика и расчеты металлургических процессов*. Москва: ИД НИТУ «МИСиС», 2010:235.
12. Дильдин А.Н., Чуманов И.В. *Физико-химические основы сталеплавильных процессов.* Вологда: Инфра-Инженерия, 2025:112.
13. Морачевский А.Г., Сладков И.Б., Фирсова Е.Г. *Термодинамические расчеты в химии и металлургии.* Санкт-Петербург: Лань, 2024:208.
14. Толстогузов Н.В. *Теоретические основы и технология плавки кремнистых и марганцевых сплавов*. Москва: Металлургия, 1992:239.

15. Shamsuddin M. Physical Chemistry of Metallurgical Processes. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2016:617.
16. Tianjie Fu, Shimin Liu, Peiyu Li. Digital twin-driven smelting process management method for converter steelmaking. Journal of Intelligent Manufacturing. 2025;36:2749–2765.
17. Jiahui Wang, Qing Fang, Jin Jia, Kejie Huang, Weining Shi, Chengsong Liu, Hua Zhang. Melting mechanism of steel scrap in a converter with combined blowing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:7047–7058.
18. Карпенко Г.А., Меркер Э.Э. Интенсификация теплообмена над зоной продувки в конвертере. *Фундаментальные исследования*. 2005;2:44–46.
19. *Атлас шлаков*. Москва: ОАО «ЕЕ Медиа», 2025:199.
20. Белов Н.А. *Диаграммы состояния тройных и четверных систем*. Москва: МИСИС, 2007:360.

REFERENCES

1. Grigorovich K.V. *The current state of ferrous metallurgy and its development directions in the digital economy*. In: *Proceedings of the XV International Congress of Steelmakers*, Moscow – Tula, October 15-19 2018. Moscow: OOO «RPK PrintAP ». 2018:42–59. (In Russ.).
2. Boichenko B.M., Okhotskogo V.B., Kharlashina P.S. *Converter steel production: theory, technology, steel quality, aggregate structures, material recycling and ecology*. Dnepropetrovsk: Dnepr-VAL, 2006:454. (In Russ.).
3. Protopopov E.V., Umanskii A.A., Shakirov M.K., Belenetskii E.A., Fat'yanov S.S. Physicochemical model of melt refining in converters with liquid-phase reduction. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2025;1(51):102–109. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-102-109*
4. Jiahui Wang, Qing Fang, Jin Jia, Kejie Huang, Weining Shi, Chengsong Liu, Hua Zhang. Melting mechanism of steel scrap in a converter with combined blowing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:7047–7058.
5. Puzyrev Yu.A., Puzyrev A.Yu. Installation of purge units for supplying inert gases to the molten metal in converters. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2023;64(3):229–233.
6. Merker Eh.Eh., Karpenko G.A. *Physical processes in the converter and energy-economic indicators of production*. Staryi Oskol: Izd-vo «Tonkie naukoemkie tekhnologii». 2014:328. (In Russ.).
7. Nugumanov R.F., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Promising technologies for preheating scrap in the converter cavity. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2009; 2:63–66. (In Russ.).
8. Heikki J. Experieces in Phsicochemical Modelling of Oxygen Converter Process (BOF). Shon International Symposium Advanced Principles. *Iron and Steel Making*. 2006;2:541–554.
9. Chao Liu, Shu-Guo Zheng, Miao-Yong Zhu. Variation in Multiphase Flow Characteristics by Single-Flow Post-combustion Oxygen Lance Blowing in BOF Steelmaking. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023;54B:1245–1261.
10. Yakushevich N.F., Strokina I.V., Polyakh O.A. Determining redox parameters in the Fe – C – O_2 – H_2 system. *Steel in Translation*. 2011;41(8):631–635.
11. Paderina S.N., Ryzhonkova D.I., Serova G.V. etc. *Thermodynamics, kinetics and calculations of metallurgical processes*. Moscow: ID NITU «MISiS», 2010:235. (In Russ.).
12. Dil'din A.N., Chumanov I.V. *Physico-chemical foundations of steelmaking processes*. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2025:112. (In Russ.).
13. Morachevskii A.G., Sladkov I.B., Firsova E.G. *Thermodynamic calculations in chemistry and metallurgy*. Saint Petersburg: Lan', 2024:208. (In Russ.).
14. Tolstoguzov N.V. *Theoretical foundations and technology of smelting silicon and manganese alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1992:239. (In Russ.).
15. Shamsuddin M. Physical *Chemistry of Metallurgical Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2016:617.
16. Tianjie Fu, Shimin Liu, Peiyu Li. Digital twin-driven smelting process management method for converter steelmaking. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2025;36:2749–2765.
17. Jiahui Wang, Qing Fang, Jin Jia, Kejie Huang, Weining Shi, Chengsong Liu, Hua Zhang. Melting mechanism of steel scrap in a converter with combined blowing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:7047–7058.
18. Karpenko G.A., Merker E.E. Intensification of heat exchange above the purge zone in the converter. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2005;2:44–46. (In Russ.).
19. *Atlas of slags*. Moscow: OAO «EE Media», 2025:199. (In Russ.).
20. Belov N.A. *Phase diagrams of ternary and quaternary systems*. Moscow: MISIS. 2007:360. (In Russ.).

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

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

Николай Филиппович Якушевич, *д.т.н., профессор-консультант кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail*:* Yakushevich@cmet.sibsiu
SPIN-код*:* 2998-9304

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

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

Nikolai F. Yakushevich, *Dr. Sci. (Eng.), Prof -Consultant of the Chair of Non-Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering*, Siberian State Industrial University
E-mail*:* Yakushevich@cmet.sibsiu

Ekaterina M. Zapolskaya, *Cand. Sci. (Eng.), senior researcher Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing,* Siberian State Industrial University
E-mail: 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 28.01.2026
После доработки 06.03.2026
Принята к публикации 10.03.2026

Received 28.01.2026
Revised 06.03.2026
Accepted 10.03.2026

Оригинальная статья

УДК 338.45

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-1(55)-114-121

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОМАРЖИНАЛЬНОЙ УГЛЕХИМИЧЕСКОЙ ПОВЕСТКИ КУЗБАССА: УСЛОВИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2026 г. О. С. Самохвалова, О. П. Черникова, Т. А. Финская, Ж. М. Титова

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

Аннотация. Рассмотрена возможность перехода угольной отрасли Сибири, прежде всего Кузбасса, от традиционной топливной функции к формированию нового промышленного направления, ориентированного на производство углеродных наноматериалов с высокой добавленной стоимостью. Такое смещение акцентов рассматривается как ответ на глобальные изменения в структуре спроса, рост значимости экологических стандартов и стремительное развитие технологий переработки углеродсодержащего сырья. Обоснованы технологические маршруты получения графена, углеродных нанотрубок, фуллеренов и перспективных сорбентов из каменных углей и антрацитов, с последующим сопоставлением этих решений с мировыми тенденциями устойчивого развития и декарбонизации промышленности. Нарастающее снижение экспортной маржи и изменение структуры внешнего спроса усиливают значение международного научно-технологического сотрудничества, прежде всего с Китаем, который остается мировым лидером в области углехимии. Установленные в ходе двусторонних контактов связи с исследовательскими центрами и промышленными предприятиями Китая демонстрируют практическую применимость передовых методов переработки углеродного сырья в условиях Сибири и формируют основу для совместных инженерных решений. Взаимный интерес к технологиям глубокой переработки, а также соглашения о научном взаимодействии создают предпосылки для ускорения развития региональной углехимии и снижения зависимости кузбасской промышленности от нестабильности сырьевых экспортных рынков. Полученные результаты подтверждают возможность создания пилотных производств на базе действующих предприятий Кузбасса при условии активного участия научно-исследовательских и опытно-конструкторских организаций. Отмечается, что интеграция таких технологий в региональную промышленную инфраструктуру способна обеспечить формирование нового сегмента рынка и повысить устойчивость отрасли в условиях глобального энергоперехода. Модель «уголь как углеродное сырье» обладает значительным потенциалом для диверсификации экономики, расширения портфеля продукции и снижения углеродной интенсивности промышленного производства, что делает ее перспективным направлением долгосрочного развития.

Ключевые слова: Кузбасс, маржинальность продукции, устойчивое развитие, антрацит, графен, углеродные нанотрубки, фуллерены, активированный уголь

Для цитирования: Самохвалова О.С., Черникова О.П., Финская Т.А., Титова Ж.М. Формирование высокомаржинальной углехимической повестки Кузбасса: условия и перспективы. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;1(55):114–121. *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-114-121*

Original article

FORMATION OF A HIGH-MARGIN COAL CHEMICAL AGENDA IN KUZBASS: CONDITIONS AND PROSPECTS

©2026 O. S. Samokhvalova, O. P. Chernikova, T. A. Finskaya, Z. M. Titova

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

Abstrat. The possibility of the transition of the Siberian coal industry, primarily Kuzbass, from the traditional fuel function to the formation of a new industrial direction focused on the production of carbon nanomaterials with high added value is considered. Such a shift in emphasis is seen as a response to global changes in the structure of demand, the growing importance of environmental standards and the rapid development of technologies for processing carbon-containing raw materials. Technological routes for the production of graphene, carbon nanotubes, fullerenes and promising sorbents from coal and anthracite are substantiated, with subsequent comparison of these solutions with global trends in sustainable development and decarbonization of industry. The increasing decline in export margins and the changing structure of external demand reinforce the importance of international scientific and technological cooperation, primarily with China, which remains the world leader in the field of carbon chemistry. The links established during the bilateral contacts with research centers and industrial enterprises in China demonstrate the practical applicability of advanced methods of processing carbon raw materials in Siberia and form the basis for joint engineering solutions. Mutual interest in deep processing technologies, as well as agreements on scientific cooperation, create prerequisites for accelerating the development of regional coal chemistry and reducing the dependence of the Kuzbass industry on the instability of commodity export markets. The results obtained confirm the possibility of creating pilot production facilities on the basis of existing enterprises in Kuzbass, subject to the active participation of research and development organizations. It is noted that the integration of such technologies into the regional industrial infrastructure can ensure the formation of a new market segment and increase the sustainability of the industry in the context of the global energy transition. The "coal as a carbon raw material" model has significant potential for economic diversification, expanding the product portfolio and reducing the carbon intensity of industrial production, which makes it a promising direction for long-term development.

Keywords: Kuzbass, product margin, sustainable development, anthracite, graphene, carbon nanotubes, fullerenes, activated carbon

For citation: Samokhvalova O.S., Chernikova O.P., Finskaya T.A., Titova Z.M. Formation of a high-margin coal chemical agenda in Kuzbass: conditions and prospects. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;1(55):114–121. (In Russ.). *http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-1(55)-114-121*

Введение

В условиях снижения мирового спроса на уголь за 2022 – 2024 гг. ценовые индикаторы на энергетические и коксующиеся марки демонстрировали постепенное снижение: средняя экспортная цена российских поставок на азиатском направлении опустилась ниже 120 – 130 долл. за т, тогда как в пиковые периоды (2021 – 2022 гг.) она превышала 200 долл. На фоне удорожания тарифов на восточную логистику, которые за три года приросли более чем на 25 – 30 %, рентабельность экспортных партий заметно снизилась. Для Кузбасса, где доля перевозок в себестоимости отдельных угольных марок достигает 45 – 50 %, подобная динамика приводит к сокращению инвестиционных возможностей и ограничивает ввод новых мощностей, особенно в чрезмерно зависимых от экспорта районах юга и центра региона. Статистика показывает, что даже при сохранении объемов добычи на уровне свыше 200 млн т ежегодно фактическая доходность отрасли перестала соответствовать уровню капитальных вложений, зафиксированных в докризисные годы [1; 2].

Дополнительное давление создает изменение структуры мирового импорта. Если в 2021 – 2022 гг. быстрый рост азиатского спроса компенсировал закрытие европейского направления, то в 2023 – 2024 гг. ключевые импортеры перешли к политике ценовой оптимизации. Китай и Индия начали активнее использовать собственные низкозатратные запасы полезных ископаемых, а маржинальная прибыль в цене к российскому углю сократилась до величин, которые едва покрывают логистику. По сравнительным оценкам дисконт к индонезийскому и австралийскому сы-

рью местами достигал 20 – 30 долл. за т, а маржинальность продукции российских экспортеров на отдельных маршрутах опускалась до нуля. В таких условиях традиционная модель роста за счет наращивания добычи перестала быть устойчивой. Для регионов с высокой концентрацией угольного сектора, включая Кузбасс, экономическая мотивация смещается в сторону переработки и выпуска углеродных материалов с высокой добавленной стоимостью, по которым даже небольшие объемы способны генерировать сопоставимую или более высокую выручку по сравнению с экспортом сырья.

Изучение вопроса

Российская угольная отрасль, и в особенности Кузбасс, входит в фазу структурных ограничений: ухудшение ценовой конъюнктуры, санкционные барьеры, удорожание восточной логистики и сужение европейских рынков подталкивают к переосмыслению роли угля в региональной экономике. По данным отраслевой статистики в 2023 г. в Кемеровской обл. добыто 214,2 млн т угля, что на 9,4 млн т меньше уровня 2022 г; в абсолютном выражении Кузбасс остается ядром российской добычи, но вектор спроса и география поставок меняются [1 – 3]. В 2022 г. объем добычи угля в регионе составлял более половины общероссийского, обеспечивая 58 % производства коксующихся марок, однако дальнейшее расширение поставок в Азию упирается в восточные транспортные «узкие места» и дисконт к индикативным ценам [4]. На внешних рынках одновременно фиксируется волатильность импорта: в 2024 г. Китай сократил закупки российского угля, а в 2025 г. тренд укрепился на фоне замещения внутренней добычей и тарифных факторов, что усиливает мотивацию к глубокой переработке внутри страны [5 – 7].

Международные исследования показывают, что страны – крупные производители и потребители угля (Китай, США, Австралия) уже фокусируются на углеродных материалах как на самостоятельном рынке. Для России ограничения носят преимущественно логистический и санкционный характер. В 2024 – 2025 гг. китайский импорт из России снижался на фоне переориентации Китая на внутреннюю добычу и коррекции цен, что сокращает маржу экспортеров и делает внутреннюю переработку в продукцию с высокой добавленной стоимостью более рациональной с точки зрения регионального мультипликатора занятости и налоговой базы [8]. Для Кузбасса это означает, что диверсификация в направлении производства материалов способна сгладить цикличность цен на энергетический уголь и использовать сильные стороны региона (коксохимию, кадровую базу, доступ к электроэнергии) при уменьшении логистической зависимости от дальневосточных коридоров [9 – 11].

С учетом сырьевой специфики Сибири целесообразно рассматривать комбинированную модель. Антрациты и малозольные каменные угли целесообразно направлять в FJH-модули для выпуска турбостатического графена и флэш-агрегатов, а отходы обогащения, шламы и низкосортные фракции – в линии приготовления активированных углей и углерод-минеральных сорбентов. Небольшие дуговые реакторы, питаемые углеграфитовыми электродами, могут служить для малотоннажных партий фуллеренов и нанотрубок для электронной пасты, сенсоров и медицинских нанокомпозиций. Экономика пилотных проектов опирается на близость к сырью, имеющиеся электрические мощности и наличие потребителей (металлургия, машиностроение, строительство) композитов на территории региона, что уменьшает плечо доставки.

Количественные ориентиры и сопоставления представлены в таблице, которая иллюстрирует масштаб базы и технологические параметры, релевантные для проектирования пилотных мощностей и оценки эффекта импортозамещения.

С инженерной точки зрения узким местом FJH-линий остается непрерывность подачи и обработка летучих, однако недавние разработки в сторону континуального режима и связки с цементными и полимерными линиями указывают на практическую преодолимость ограничений. Поэтапная реализация может стартовать с размещения пилотных модулей мощностью 5 – 50 кг/сут. при интеграции с существующими линиями дробления/сушки, сбытом в локальные композитные кластеры и проектами водоочистки, а также кооперации с университетами для метрологии и контроля качества. Для выхода на рынки стран с жесткими требованиями к сертификации материалов в Кузбассе планируется создать региональный центр компетенций по углеродным материалам. Его работа будет основана на кооперации местных предприятий с научными группами – экспертами в области графена и углеродных наноструктур.

Сопоставление угольных ориентиров с другими странами подтверждает, что окно возможностей не ограничено внутренним спросом. В Китае и Северной Америке уже формируются цепочки углеродные отходы/низкосортный уголь → графен/углеродные наполнители → строительные смеси/полимеры, где основным конкурентным преимуществом является близость к дешевому углеродному сырью и электроэнергии, а также способность быстро масштабировать модульные реакторы. Для Кузбасса

Ориентиры для разворота уголь → углеродные материалы на базе Кузбасса [1 – 8; 10]

Landmarks for the «coal → carbon materials» turn based on Kuzbass [1 – 8; 10]

Показатель	Значение показателя по годам			Ориентиры для разворота уголь → углеродные материалы
	2022	2023	2024	
Добыча угля в Кузбассе (всего), млн т	223,6	214,2	207,0	Снижение добычи продолжается: за 3 года примерно 17 млн т; давление на отрасль усиливает необходимость перехода к глубокой переработке
Энергетический уголь, млн т	158,0	145,9	139,0	Падение ускоряется из-за снижения спроса ТЭС и переориентации рынков; сегмент – первый кандидат на перевод к углеродным материалам
Коксующийся уголь, млн т	65,6	68,3	68,0	Стабильность добычи коксующихся марок формирует основу для углеродных материалов: кокса, волокон, углеродных композиционных полуфабрикатов
Доля коксующегося угля в добыче, %	29,3	31,9	32,9	Доля растет, что усиливает стратегическую привлекательность перехода к «тонким» углеродным переделам
Экспорт угля из Кузбасса (всего), млн т	120,2	113,8	108,0	Продолжающееся сокращение экспорта: за 2022 – 2024 гг. −12,2 млн т; растет потребность в переориентации угля на внутреннюю переработку
Оценочный экспорт в Китай, млн т	54,1	51,2	49,5	Китай сохраняет значимый спрос, но повышает требования к качеству; возможен переход к поставкам полуфабрикатов углеродной индустрии
Оценочный экспорт в Индию, млн т	20,4	19,3	18,8	Индия остается перспективным потребителем металлургической продукции; поставки углеродных материалов могут иметь бóльшую маржу
Оценочный экспорт в Южную Корею, млн т	14,4	13,7	12,9	Падение импорта угля продолжается, но рынок технологичных углеродных продуктов остается устойчивым
Прочие рынки (Турция, ОАЭ и др.), млн т	31,3	29,6	26,8	Наиболее сокращающееся направление; логично замещать сырьевой экспорт продукцией с высокой добавленной стоимостью

похожая логика означает снижение экспортного плеча и транспортного риска за счет переработки на месте и последующего вывоза легкого высокоценного наполнителя вместо массивного топлива (см. рисунок).

В контексте формирования новой углехимической повестки особое значение приобретают результаты рабочей поездки кузбасской делегации в Китай, в которой участвовали ведущие ученые университетов, представители регионального бизнеса во главе с губернатором Кузбасса Ильей Середюком. В ходе визита были установлены прямые контакты с профильными научными организациями и промышленными предприятиями, что позволило оценить уровень развития китайской углехимии и подтвердить практическую применимость аналогичных решений в Сибири. Стороны обсудили возможности использования разработок в области переработки углеродного сырья, включая создание новых материалов и энергоносителей, а также перспективы адаптации китайских инженерных подходов к условиям Кузбасса. Особый интерес к Китаю прежде всего вызван тем, что в настоящее время он является мировым лидером в области углехимии, перерабатывая в ценные продукты 380 млн т угля в год. Поэтому подписанное соглашение с Шаньсийским энергетическим институтом усиливает научно-технологическую базу сотрудничества и дает направления совместным исследованиям, ориентированных на повышение эффективности углехимических процессов.

Дополнительным результатом поездки стало углубление взаимодействия с промышленными корпорациями, включенными в строительство и модернизацию предприятий коксохимии, метанольного производства и водородной энергетики. Посещение научных лабораторий и заводов позволило участникам оценить масштабы переработки угля в Китае, где ежегодно преобразуется более 380 млн т сырья в продукты с высокой добавленной стоимостью [12 – 14]. Полученные данные подтверждают, что модели, используемые в китайской промышленности, могут быть адаптированы к кузбасским условиям и служить основой для развития регионального Центра инженерных разработок по углехимии. Для научного сообщества Кузбасса это означает расширение методологической и технической базы, а для промышленности – доступ к проверенным технологическим решениям, способным ускорить переход угольной отрасли к производству конкурентоспособных углеродных материалов.

Динамика показателей разворота уголь → углеродные материалы на базе Кузбасса
Dynamics of the coal → carbon materials reversal indicators based on Kuzbass

В Кемеровской обл. будет создан первый в России Центр инженерных разработок по углехимии на базе ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет», на его финансирование регион получит от Министерства промышленности и торговли Российской Федерации 400 млн руб., что будет способствовать развитию и диверсифиции экономики угледобывающих регионов, снижению зависимости от импорта и созданию новых высокотехнологичных производств. В состав консорциума вошли следующие организации: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» (СибГИУ); Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН; НОЦ «Кузбасс – Донбасс»; ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет» [15 – 19]. В Центре инновационных угольных технологий СибГИУ уже разработаны технология и экспериментальные образцы оборудования для получения полукокса и генераторного газа, в том числе синтез-газа, методом слоевой газификации кускового угля.

В Кузбассе формируется группа компаний, которые уже располагают технологической базой для перехода от простой добычи к производству углеродных материалов, среди них предприятия коксохимического цикла (ПАО «Кокс»; АО «ЕВРАЗ ЗСМК»; ООО «Сибуглемет»), а также угольные холдинги с собственными научно-техническими подразделениями (АО «СУЭК-Кузбасс» и АО «УК «Кузбассразрезуголь»). Эти компании обладают оборудованием для глубокой переработки и могут расширить линейку продукции за счет получения активированных углей, углеродных адсорбентов, микрогранулированного кокса, углеродных композитов и других материалов. Потенциальными покупателями выступают металлургические комбинаты, предприятия химической промышленности, водоочистные системы, производители аккумуляторов и катализаторов, где устойчивое импортозамещение делает углеродные материалы особенно востребованными. Региональные меры поддержки (налоговые льготы для переработчиков, субсидии на модернизацию, спецрежимы в ТОСЭР и технопарках) делают переход к таким направлениям экономически оправданным, способствуя снижению отраслевых рисков [20].

В Китае из угля давно производят углеродные волокна, адсорбенты, технический графит и материалы для литий-ионных батарей. В Южной Корее и Японии развиваются технологии получения углеродных композитов и графенсодержащих структур из углеродистого сырья. Эти страны демонстрируют, что специализированные продукты имеют устойчивый спрос даже при сокращении роли традиционного угля. Для Кузбасса подобная стратегия открывает возможность не только компенсировать снижение экспортных поставок энергетического угля, но и занять нишу в сегментах с высокой добавленной стоимостью, где требуется качественное сырье и надежные долгосрочные поставки [1; 9; 21; 22].

Анализ подтверждает экономическую целесообразность постепенного перераспределения части кузбасского угля из энергетического сегмента в сферу производства углеродных материалов. Снижение внешнего спроса на энергетические марки и сокращение экспортной маржи

усиливают давление на сырьевую модель и делают поиск альтернативных направлений использования угля экономически оправданными. Углеродные материалы, получаемые из антрацитов и коксующихся фракций, позволяют формировать продукцию с более высокой стоимостью, меньшей зависимостью от конъюнктуры топливных рынков и более устойчивым спросом в промышленности, машиностроении, электронике и экологических технологиях.

Выводы

Процессы глубокой переработки, основанные на современных методах получения графеновых структур, сорбентов и других форм углеродной продукции, создают возможности для выпуска товаров с существенно большей добавленной стоимостью, чем традиционный экспорт угля. Это повышает потенциал налоговых поступлений, развивает перерабатывающую промышленность и способствует созданию высококвалифицированных рабочих мест. В условиях логистических ограничений и изменения мировых энергетических приоритетов переход к производству материалов способен снизить зависимость Кузбасса от колебаний сырьевых рынков и укрепить устойчивость региональной экономики.

Экономический эффект может проявиться не сразу и потребует инвестиций в пилотные производства, развитие исследовательских компетенций и обновление промышленной инфраструктуры. Тем не менее формируемая база знаний, опыт реализации отдельных технологий и растущий мировой спрос на углеродные материалы создают реальные предпосылки для перехода от сырьевого экспорта к более сложной и прибыльной модели хозяйственного развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитический центр ТЭК РФ. Состояние и перспективы рынка угольной продукции в России. 2024. – URL: https://ac.gov.ru/uploads/coal-market-review-2024.pdf (дата обращения: 05.11.2025).
2. В Кузбассе в 2023 году добыча угля снизилась почти на 5 %. *ТАСС*. 17.01.2024. – URL: https://tass.ru/ekonomika/19749807 (дата обращения: 05.11.2025).
3. Кочетков А.В., Сидоров П.В. Перспективы применения Flash Joule Heating для переработки антрацитов. *Горный журнал*. 2024;8:75–83.
4. Кузбассразрезуголь представил программу развития углехимии до 2035 года. *Интерфакс*. 12.03.2024. – URL: https://www.interfax-russia.ru/siberia/news/kuzbassrazrezugol-predstavil-programmu-uglehahimii (дата обращения: 05.11.2025).
5. Лапшин Н.Ю., Куликов С.Н. Новые методы активации углей для получения сорбентов. *Сорбционные процессы*. 2023;4:44–52.
6. Лисиенко В.Г., Мухин В.М., Клячко Л.В. и др. Перспективы получения углеродных материалов из каменных углей Сибири. *Химия твердого топлива*. 2023;5:3–15.
7. Министерство промышленности Кузбасса. Развитие центра инженерных разработок по углехимии. 2024. – URL: https://ako.ru/minprom/news/uglekhimia-2024 (дата обращения: 05.11.2025).
8. Минэнерго РФ. Энергетический обзор России 2023. *Министерство энергетики РФ*. 2023. – URL: https://minenergo.gov.ru/node/32025 (дата обращения: 05.11.2025).
9. Мухин В.М., Учанов П.В. Получение активного угля на основе антрацита: исследование его пористости и адсорбционных свойств. *Успехи в химии и химической технологии*. 2013;27(9(149)):35–40.
10. Сибирский федеральный университет. Переработка углей в графеновые структуры: результаты 2023 года. *Новости СФУ*. 2023. – URL: https://news.sfu-kras.ru/node/31644 (дата обращения: 05.11.2025).
11. ФИЦ УУХ СО РАН. Научные разработки в области углеродных наноматериалов. 2024. – URL: https://www.icct.ru/research/carbon (дата обращения: 05.11.2025).
12. Cheng Z., Huang X., Mo D. Production of fullerenes from carbon-rich coals under plasma conditions. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2024;44:851–866.
13. China's coal imports from Russia drop amid shift to domestic coal. *Reuters*. 20.05.2025. – URL: https://www.reuters.com/world/asia-pacific/chinas-coal-imports-russia-drop-amid-shift-domestic-coal-2025-05-20/ (дата обращения: 05.11.2025).
14. Gonzalez A., Park J. Utilization of low-grade coal for carbon nanotube synthesis via catalytic CVD. *Fuel*. 2023;350:128938.
15. Hyun-Suk Lee. Automated tariff design for energy supply–demand matching based on Bayesian optimization: Technical framework and policy implications. *Energy Policy*. 2024;188:114102.
16. Liu X., Wang W., Chen Y., et al. Preparation of Coal-Based Graphene by Flash Joule Heating. *ACS Omega*. 2024;9(45):42268–42276.
17. Luong D.X., Bets K.V., Algozeeb W.A., et al. Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis. *Nature*. 2020;577(7792):647–651.

18. Mironova I. Russia's Coal Sector: Focus on Kuzbass. Report. Moscow: Center for Strategic Research (CSR). 2024:28.

19. Qiu J., Zhang Q., Ruan M., et al. Production of carbon nanotubes from coal. *Carbon*. 2004;42(9):1851–1855

20. Qiu J.S., Li H.D., Zhu Y.Q., et al. Preparation of fullerenes using carbon rods manufactured from coal. *Fuel*. 2000;79(12):1467–1471.

21. Smith R., Zhao P. Advances in Flash Joule Heating for carbon nanomaterial synthesis. *Carbon*. 2024;218:118345.

22. Tao L., Li X., Cheng H. Coal-derived carbon materials for advanced energy applications. *Carbon Trends*. 2023;12:100212.

REFERENCES

1. Analytical Center of the Russian Fuel and Energy Complex. The State and Prospects of the Coal Products Market in Russia. 2024. – URL: https://ac.gov.ru/uploads/coal-market-review-2024.pdf (date of access: 05.11.2025). (In Russ.).

2. In Kuzbass, coal production fell by almost 5% in 2023. *TASS*. 17.01.2024. – URL: https://tass.ru/ekonomika/19749807 (date of access: 05.11.2025). (In Russ.).

3. Kochetkov A.V., Sidorov P.V. Flash Joule Heating Applications for Anthracite Processing. *Gornyi zhurnal*. 2024;8:75–83.

4. Kuzbassrazrezugol presented a program for the development of coal chemistry until 2035. *Interfaks*. 12.03.2024. – URL: https://www.interfax-russia.ru/siberia/news/kuzbassrazrezugol-predstavil-programmu-uglehahimii (date of access: 05.11.2025). (In Russ.).

5. Lapshin N.YU., Kulikov S.N. New methods of carbon activation for obtaining sorbents. *Sorbtsionnye protsessy*. 2023;4:44–52. (In Russ.).

6. Lisienko V.G., Mukhin V.M., Klyachko L.V. and others. Prospects for obtaining carbon materials from Siberian coals. *Khimiya tverdogo topliva*. 2023;5:3–15. (In Russ.).

7. Kuzbass Ministry of Industry. Development of a coal chemistry engineering development center. 2024. – URL: https://ako.ru/minprom/news/uglekhimia-2024 (date of access: 05.11.2025). (In Russ.).

8. Ministry of Energy of the Russian Federation. Energy Review of Russia 2023. *Ministerstvo ehnergetiki RF*. 2023. – URL: https://minenergo.gov.ru/node/32025 (date of access: 05.11.2025). (In Russ.).

9. Mukhin V.M., Uchanov P.V. Production of activated carbon based on anthracite: study of its porosity and adsorption properties. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2013;27(9(149)):35–40.

10. Siberian Federal University. Processing Coal into Graphene Structures: 2023 Results. *Novosti SFU*. 2023. – URL: https://news.sfu-kras.ru/node/31644 (date of access: 05.11.2025). (In Russ.).

11. FRC UUKh SB RAS. Research in the field of carbon nanomaterials. 2024. – URL: https://www.icct.ru/research/carbon (date of access обращения: 05.11.2025). (In Russ.).

12. Cheng Z., Huang X., Mo D. Production of fullerenes from carbon-rich coals under plasma conditions. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2024;44:851–866.

13. China's coal imports from Russia drop amid shift to domestic coal. *Reuters*. 20.05.2025. – URL: https://www.reuters.com/world/asia-pacific/chinas-coal-imports-russia-drop-amid-shift-domestic-coal-2025-05-20/ (дата обращения: 05.11.2025).

14. Gonzalez A., Park J. Utilization of low-grade coal for carbon nanotube synthesis via catalytic CVD. *Fuel*. 2023;350:128938.

15. Hyun-Suk Lee. Automated tariff design for energy supply–demand matching based on Bayesian optimization: Technical framework and policy implications. Energy Policy. 2024;188:114102.

16. Liu X., Wang W., Chen Y., et al. Preparation of Coal-Based Graphene by Flash Joule Heating. *ACS Omega*. 2024;9(45):42268–42276.

17. Luong D.X., Bets K.V., Algozeeb W.A., et al. Gram-scale bottom-up flash graphene synthesis. *Nature*. 2020;577(7792):647–651.

18. Mironova I. Russia's Coal Sector: Focus on Kuzbass. Report. Moscow: Center for Strategic Research (CSR). 2024:28.

19. Qiu J., Zhang Q., Ruan M., et al. Production of carbon nanotubes from coal. *Carbon*. 2004;42(9):1851–1855

20. Qiu J.S., Li H.D., Zhu Y.Q., et al. Preparation of fullerenes using carbon rods manufactured from coal. *Fuel*. 2000;79(12):1467–1471.

21. Smith R., Zhao P. Advances in Flash Joule Heating for carbon nanomaterial synthesis. *Carbon*. 2024;218:118345.

22. Tao L., Li X., Cheng H. Coal-derived carbon materials for advanced energy applications. *Carbon Trends*. 2023;12:100212.

***Сведения об авторах*:**

Ольга Сергеевна Самохвалова, *преподаватель кафедры экономики и устойчивого развития бизнеса*, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: samohvalova_os@sibsiu.ru

ORCID: 0009-0006-4199-9852

SPIN-код: 3339-9370

Оксана Петровна Черникова, *к.э.н., доцент, заведующий кафедрой экономики и устойчивого развития бизнеса*, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: chernikovaop@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5410-6623
SPIN-код: 6496-5060

Таисия Андреевна Финская, *студент кафедры экономики и устойчивого развития бизнеса Института технологий устойчивого развития*, Сибирский государственный индустриальный университет

Жанна Максимовна Финская, *студент кафедры экономики и устойчивого развития бизнеса Института технологий устойчивого развития*, Сибирский государственный индустриальный университет

Information about the authors:
Ol'ga S. Samokhvalova, *Lecturer at the Department of Economics and Sustainable Business Development at the Institute of Sustainable Development Technologies*, Siberian State Industrial University
E-mail: samohvalova_os@sibsiu.ru
ORCID: 0009-0006-4199-9852
SPIN-код: 3339-9370

Oksana P. Chernikova, *Candidate of Economic Sciences Associate Professor, Head of the Department of Economics and Sustainable Business Development at the Institute of Sustainable Development Technologies*, Siberian State Industrial University
E-mail: chernikovaop@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5410-6623
SPIN-код: 6496-5060

Taisiya A. Finskaya, *student of the Department of Economics and Sustainable Business Development at the Institute of Sustainable Development Technologies*, Siberian State Industrial University

Zhanna M. Finskaya, *student of the Department of Economics and Sustainable Business Development at the Institute of Sustainable Development Technologies*, Siberian State Industrial University

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

Поступила в редакцию 14.01.2026
После доработки 17.02.2026
Принята к публикации 10.03.2026

Received 14.01.2026
Revised 17.02.2026
Accepted 10.03.2026

ПАМЯТИ АЛЕКСАНДРА МАРКОВИЧА ГЛЕЗЕРА

26 января 2026 г. исполнилось бы 80 лет д.ф.-м.н., профессору Александру Марковичу Глезеру – крупному ученому и лидеру научной школы в области изучения и разработки многофункциональных материалов нового поколения. Под его руководством выполнен ряд фундаментальных и прикладных исследований нанокристаллических и аморфных функциональных материалов. Он является ведущим ученым России в области материалов, полученных методами закалки из расплава и интенсивной пластической деформации. Александр Маркович известен как ведущий ученый в области применения электронно-микроскопических методов для исследования структуры конденсированного состояния.

Глезером А.М. впервые обнаружены необычные эффекты структурно-фазовых превращений, связанные с высокой степенью пересыщения материалов избыточными вакансиями, формирующимися при закалке из расплава; им также впервые установлен и детально проанализирован размерный эффект при мартенситном превращении в нанокристаллах. Александру Марковичу принадлежит новый оригинальный подход, позволивший понять природу структурно-фазовых превращений, происходящих при интенсивной пластической деформации.

Глезером А.М. установлены способы и конкретные режимы кардинального повышения магнитных, прочностных и пластических свойств модельных и промышленных функциональных материалов на основе железа, никеля и кобальта, в основе которых лежат методы получения нанокристаллических структур с помощью закалки из расплава в сочетании с интенсивной пластической деформацией. Он более 20 лет руководил Институтом металловедения и физики металлов им. академика Г.В. Курдюмова, одним из авторитетнейших институтов России в области материаловедения. Глезер Александр Маркович лауреат Премии РАН им. П.П. Аносова (2011 г.) за выдающиеся научные работы в области металлургии, металловедения и термической обработки металлов и сплавов.

Александр Маркович был главным редактором журнала «Деформация и разрушение материалов», который входит в список ВАК и переводится на английский язык издательством Springer, заместителем главного редактора журнала «Материаловедение», членом редакционной коллегии журналов «Известия РАН. Серия физическая», «Journal of Material Science & Technology», «Наноструктурное материаловедение», «Фундаментальные проблемы современного материаловедения» и «Проблемы черной металлургии и материаловедения».

Глезер А.М. входил в состав Научных Советов РАН по физике конденсированных сред, наноматериалам, металловедению и металлургии. Он также являлся одним из руководителей Межгосударственного Координационного Совета по физике прочности и пластичности материалов.

В нашей памяти Александр Маркович останется как яркий и самобытный ученый, неутомимый исследователь, человек высоких нравственных принципов и государственного мышления. Имя Александра Марковича Глезера навсегда вписано в историю металлофизической науки. Мы навсегда сохраним светлую память об этом талантливом Человеке и Ученом!

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).

Журнал «Вестник Сибирского государственного индустриального университета» включен в Единый государственный перечень научных изданий – «Белый список», присвоен уровень 2.

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 Equatn или Math Type, масштаб формул должен быть 100 %. Масштаб устанавливается в диалоговом окне «Формат объекта». В редакторе формул для латинских и греческих букв использовать стиль «Математический» («Math»), для русских – стиль «Текст» («Text»). Размер задается стилем «Обычный» («Full»), для степеней и индексов – «Крупный индекс / Мелкий индекс» («Subscript / Sub-Subscript»). Недопустимо использовать стиль «Другой» («Other»).

Необходимо избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, графиках и тексте статьи. Объем статьи не должен превышать 18 – 20 страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала.

Рукопись должна быть тщательно выверена, подписана автором (при наличии нескольких авторов, число которых не должно превышать пяти, – всеми авторами); в конце рукописи указывают полное название высшего учебного заведения (предприятия) и кафедры, дату отправки рукописи, а также полные сведения о каждом авторе (Ф.И.О., место работы, должность, ученая степень, звание, служебный и домашний адреса с почтовыми индексами, телефон, e-mail, ORCID). Необходимо указать, с кем вести переписку.

Цитируемую в статье литературу следует давать общим списком в порядке упоминания в статье с обозначением ссылки в тексте порядковой цифрой. Перечень литературных источников рекомендуется не менее 20.

Библиографический список оформляют в соответствии с ГОСТ 7.0.100 – 2018: а) для книг – фамилии и инициалы авторов, полное название книги, номер тома, место издания, издательство и год издания, общее количество страниц; б) для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, полное название журнала, название статьи, год издания, номер тома, номер выпуска, страницы, занятые статьей; в) для статей из сборников – фамилии и инициалы авторов, название сборника, название статьи, место издания, издательство, год издания, кому принадлежит, номер или выпуск, страницы, занятые статьей.

Иностранные фамилии и термины следует давать в тексте в русской транскрипции, в библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводят в оригинальной транскрипции.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

К статье должны быть приложены аннотация объемом 200 – 250 слов, ключевые слова.

В статье необходимо привести на английском языке: название статьи, Ф.И.О. авторов, место их работы, аннотацию и ключевые слова.

Краткие сообщения должны иметь самостоятельное научное значение и характеризоваться новизной и оригинальностью. Они предназначены для публикации в основном аспирантских работ. Объем кратких сообщений не должен превышать двух страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, включая таблицы и библиографический список. Под заголовком в скобках следует указать, что это краткое сообщение. Допускается включение в краткое сообщение одного несложного рисунка, в этом случае текст должен быть уменьшен. Приводить в одном сообщении одновременно таблицу и рисунок не рекомендуется.

Количество авторов в кратком сообщении должно быть не более трех. Требования к оформлению рукописей и необходимой документации те же, что к оформлению статей.

Корректуры статей авторам, как правило, не посылают.

В случае возвращения статьи автору для исправления (или при сокращении) датой представления считается день получения окончательного текста.

Статьи, поступающие в редакцию, проходят гласную рецензию.

Статьи журнала индексируются в РИНЦ, представлены на сайтах https://vestnik.sibsiu.ru/ и https://www.sibsiu.ru в разделе Наука и инновации (Периодические научные издания).

TO THE AUTHORS ATTENTION

On June 22, 2023 the journal, "Bulletin of Siberian State Industrial University" was included in the List of peer-reviewed scientific editions. The journal should publish the main scientific results of dissertations for the degrees of Candidates and Doctors of Sciences in following specialties:

1.3.8. Condensed matter physics (physical and mathematical, engineering);

2.6.1. Metallurgy and heat treatment of metals and alloys (engineering);

2.6.2. Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals (engineering);

2.6.17. Materials science (engineering).

The journal "Bulletin of the Siberian State Industrial University" received K2 category.

The journal publishes original, previously unpublished articles containing the most significant results of scientific and technical experimental research, as well as the results of problematic work in the following areas:

1. *Condensed matter physics;*
2. *Metallurgy and materials science;*
3. *Economics. Management. Finance.*

The journal "Bulletin of the Siberian State Industrial University" is included in the Unified State List of scientific publications - the "White List", assigned level 2.

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).

Над номером работали

Коновалов С.В., главный редактор

Запольская Е.М., ответственный секретарь

Темлянцева Е.Н., верстка

Олендаренко Е.В., менеджер по работе с клиентами

Безродная Е.А., администратор сайта