

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Научный журнал

ВЕСТНИК
Сибирского государственного
индустриального университета

№ 3 (49), 2024

Издается с июня 2012 года
Выходит 4 раза в год

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Scientific journal

BULLETIN
of the Siberian State Industrial University

No. 3 (49), 2024

Published since June 2012
It is published 4 times a year

Учредитель

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

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

Свидетельство о регистрации:

ПИ № ФС77-77872 от 03.03.2020 г.

Адрес редакции:

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

каб. 433 М, тел. 8-3843-74-86-28

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

e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Адрес издателя:

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

каб. 336 Г, тел. 8-3843-46-35-02

e-mail: rector@sibsiu.ru

Адрес типографии:

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

каб. 280 Г, тел. 8-3843-46-44-02

Подписные индексы:

Объединенный каталог «Пресса России» – 41270

Founder

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

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

Certificate of registration:

PI No. FS77-77872 dated 03.03.2020

Editorial office address:

42 Kirova Str., Central district, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation, Siberian State Industrial University office 433 M, tel. 8-3843-74-86-28

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

e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Publisher's address:

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

e-mail: rector@sibsiu.ru

Printing house address:

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

Subscription indexes:

United catalog «Press of Russia» – 41270

Подписано в печать

30.09.2024 г.

Выход в свет

30.09.2024 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл. печ. л. 4,6.

Уч.-изд. л. 4,9.

Тираж 300 экз.

Заказ № 184.

Цена свободная

Signed to the press

30.09.2024

Coming out

30.09.2024

The paper size is 60×88 1/8.

Writing paper.

Offset printing.

Usl. pech. l. 4,6.

Uch.-ed. l. 4,9.

The circulation is 300 copies.

Order no. 184.

The price is free

Редакционная коллегия

Главный редактор

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

Ответственный секретарь

Запольская Екатерина Михайловна, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Зимин Алексей Валерьевич, д.т.н., заместитель директора по научной и проектной работе института информационных технологий и автоматизированных систем, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Уманский Александр Александрович, д.т.н., доцент, директор Института металлургии и материаловедения, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия
Хамзаева Айнура Мураталиевна, к.э.н., доцент, заведующий кафедрой бухгалтерского учета и аудита, Ошский технологический университет им. Академика М.М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан
Chen Xizhang, PhD, профессор, профессор университета Вэньчжоу, г. Вэньчжоу, Китай
Чехонадских Александр Васильевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры алгебры и математической логики, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
Юлдашев Носиржон Хайдарович, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики, Ферганский политехнический институт, г. Фергана, Узбекистан
Юрьев Алексей Борисович, д.т.н., профессор, ректор, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Members of the editorial board

Chief Editor

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

Executive Secretary

Zapolskaya Ekaterina Mikhailovna, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Editorial team:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Zimin Aleksey Valerievich, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Research and Design Work of the Institute of Information Technologies and Automated Systems, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Романов Д.А., Московский С.В., Почету-
хья В.В., Иванов Ю.Ф., Ващук Е.С.** Структура и
свойства системы «покрытие (Ag – C)/(Cu)
подложка», облученной импульсным элек-
тронным пучком.....10
- Чжэн Ц., Гурьев М.А., Иванов С.Г., Мей Ш.,
Гурьев А.М.** Влияние диффузионного
покрытия бор-хром-лантан на жаростой-
кость и износостойкость стали
4X5MФ1С.....22
- Гурьев М.А., Иванов С.Г., Чжэн Ц., Гурьев А.М.**
Влияние содержания углерода в стали на
параметры диффузии бора и толщину диф-
фузионного покрытия при борировании...30

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Темлянцева Е.Н., Коротков С.Г., Уманс-
кий А.А., Темлянцева М.В.** От металлурги-
ческих печей до технологий устойчивого
развития. Кафедре теплоэнергетики и эколо-
гии Сибирского государственного индустри-
ального университета 90 лет.....37
- Пимахин А.В., Осколкова Т.Н., Кузнецо-
ва О.В., Темлянцева М.В., Темлянцева
Е.Н., Запольская Е.М.** Исследование про-
цессов обезуглероживания рельсовой стали
Э90ХАФ при нагреве под прокатку.....47
- Мурко В.И., Прошунин Ю.Е., Темлянцева М.В.,
Темлянцева Е.Н., Беляев К.В.** Разработка
и развитие инновационных угольных тех-
нологий в сибирском государственном ин-
дустриальном университете.....53
- Водолеев А.С., Темлянцева М.В., Семина И.С.,
Домнин К.И.** Возможности использова-
ния осадков сточных вод в качестве удоб-
рений и рекультиванта.....66
- Павловец В.М.** Анализ структурной корреля-
ции между поверхностным рельефом
напыленного слоя шихты и пористостью
железородных окатышей.....77
- Леонтьев А.С., Рыбенко И.А.** Посуточное
планирование и оптимизация потоков
сырья в черной металлургии86
- Ноздрин И.В., Коряковцева О.В., Полях О.А.,**

CONTENTS

CONDENSED MATTER PHYSICS

- Romanov D.A., Moskovskii S.V., Pochetu-
kha V.V., Vashchuk E.S., Ivanov Yu.F.** Structure and properties of the system
coating (Ag – C) / substrate (Cu), irradiat-
ed by a pulsed electron beam10
- Zheng Q., Guryev M.A., Ivanov S.G., Mei S.,
Guryev A.M.** Effect of boron – chromium –
lanthanum diffusion coating on the heat
resistance and wear resistance of
4Kh5MF1S steel.....22
- Guryev M.A., Ivanov S.G., Zheng Q., Gu-
ryev A.M.** Influence of carbon content in
steel on boron diffusion parameters and diffu-
sion coating thickness during borizing.....30

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

- Temlyantseva E.N., Korotkov S.G., Umansky A.A.,
Temlyantsev M.V.** From metallurgical fur-
naces to sustainable development technolo-
gies. The Department of Thermal Power En-
gineering and Ecology of the Siberian State
Industrial University is 90 years old.....37
- Pimakhin A.V., Oskolkova T.N., Simachev A.S.,
Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N.,
Zapol'skaya E.M.** Investigation of decar-
burization processes of E90AF rail steel
during heating for rolling.....47
- Murko V.I., Proshunin Y.E., Temlyantsev M.V.,
Temlyantseva E.N., Belyaev K.V.** Crea-
tion and development of innovative coal
technologies at the Siberian State Industri-
al University.....53
- Vodoleev A.S., Temlyantsev M.V., Semina I.S.,
Domnin K.I.** Possibilities of using sewage
sludge as fertilizers and reclamation
agent.....66
- Pavlovets V.M.** Analysis of structural corre-
lation between the surface relief of the
sprayed charge layer and the porosity of
iron ore pellets.....77
- Leont'ev A.S., Rybenko I.A.** Daily planning
and optimization of raw materials flows in
ferrous metallurgy.....86
- Nozdrin I.V., Koryakovceva O.V., Polyah O.A.,**

Аникин А.Е. Актуализация методов переработки цинкосодержащих пылей и шламов доменного и сталеплавильного производства.....97

Anikin A.E. Updating of processing methods of zinc-containing dust and sludge from blast furnace and steelmaking production.....97

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

REGIONAL AND SECTORAL ECONOMY

Муминова Э.А., Усманова З.М. Исследование влияния налоговых реформ на функционирование системы налогообложения Республики Узбекистан. Часть 2.....107

Muminova E.A., Usmanova Z.M. Study of influence of tax reforms on the functioning of taxation system of the Republic of Uzbekistan. Part 2.....107

Мирюкова М.А., Кан И.А. Реализация политики Российской Федерации в области формирования социально-экономической стабильности (на примере Калининградской обл.).....121

Miryukova M.A., Kan I.A. Implementation of the Policy of the Russian Federation in the Field of Socio-Economic Stability (on the Example of the Kaliningrad Region).....121

Курпаяниди К.И. Международные практики институционального стимулирования малого и среднего бизнеса: опыт Казахстана.....130

Kurpayanidi K.I. International practices of institutional stimulation of smes: Kazakhstan's experience.....130

К сведению авторов.....140

To the authors attention.....141

Оригинальная статья

УДК 621.793.79

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-10-21

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИСТЕМЫ ПОКРЫТИЕ (Ag – C) / ПОДЛОЖКА (Cu), ОБЛУЧЕННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

© 2024 г. Д. А. Романов¹, С. В. Московский¹, В. В. Почетуха¹, Е. С. Ващук²,
Ю. Ф. Иванов³

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

²Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевск (Россия, 653039, Кемеровская обл. – Кузбасс, Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а)

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

Аннотация. Полученная система Ag – C, сформированная на медной подложке, характеризуется толщиной покрытия от 50 до 550 мкм. В покрытии углеграфитовое волокно присутствует в виде пластин. Покрытие представляет собой легированный атомами меди агрегат. Изменение концентрации атомов меди при изменении расстояния от поверхности покрытия в глубину имеет положительный градиент. Формирование твердых растворов внедрения на основе меди и серебра подтверждено данными рентгенофазового анализа. Исследования методом микрорентгеноспектрального анализа фольг для просвечивающей электронной микроскопии показали, что медь в покрытии располагается в виде тонких прослоек по границам зерен серебра или формирует включения (зерна) субмикрористаллических размеров. Установлено, что графит присутствует в виде наноразмерных (10 – 15 нм) частиц в объеме зерен серебра и зерен меди, а также располагается на границах зерен серебра. В системе Ag – C / Cu выявлено формирование переходного слоя толщиной 250 – 300 нм. Размер субзерен в переходном слое изменяется в пределах 150 – 250 нм. Модуль Юнга и микротвердость по Виккерсу уменьшаются с увеличением толщины покрытия. Износостойкость покрытия составляет $6 \cdot 10^{-6}$ мм³/(Н·м). Полученный набор свойств и характеристик структуры позволяет сделать вывод о пригодности сформированных покрытий для работы в электрических контактах мощных электрических сетей. Конкретный выбор определенной модели контактов требует дополнительных уточняющих исследований.

Ключевые слова: низкоэнергетический импульсный электронный пучок, серебро, углеграфитовое волокно, медь, наноразмерные частицы, твердость, модуль Юнга, износостойкость

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4292.2022.4. Электровзрывное напыление проведено с использованием оборудования научной лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий (лаборатория создана согласно постановлению Правительства Кемеровской области – Кузбасса № 632 от 19 сентября 2022 г., соглашение № 8). Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

Для цитирования: Романов Д.А., Московский С.В., Почетуха В.В., Ващук Е.С., Иванов Ю.Ф. Структура и свойства системы покрытие (Ag – C) / подложка (Cu), облученной импульсным электронным пучком. Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2024;3(49):10–21. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-10-21](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-10-21)

Original article

STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE SYSTEM COATING (Ag – C) / SUBSTRATE (Cu), IRRADIATED BY A PULSED ELECTRON BEAM

© 2024 D. A. Romanov¹, S. V. Moskovskii¹, V. V. Pochetukha¹, E. S. Vashchuk²,
Yu. F. Ivanov³

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

²**T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk Branch** (19a Nogradskaya Str., Prokopyevsk, Kemerovo region – Kuzbass 653039, Russian Federation)

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

Abstract. The resulting Ag – C system formed on a copper substrate is characterized by a highly developed coating thickness from 50 to 550 μm. In the coating, carbon-graphite fiber is present in the form of plates. The coating is an aggregate doped with copper atoms. The change in the concentration of copper atoms with a change in the distance from the coating surface to the depth has a positive gradient. The formation of interstitial solid solutions based on copper and silver is confirmed by X-ray phase analysis data. Studies by X-ray microanalysis of foils for transmission electron microscopy showed that copper in the coating is located in the form of thin layers along the boundaries of silver grains, or forms inclusions (grains) of submicrocrystalline sizes. It was established that graphite is present in the form of nanosized (10 – 15 nm) particles in the volume of silver grains and copper grains, and is also located at the boundaries of silver grains. In the Ag – C / Cu system, the formation of a transition layer with a thickness of 250 – 300 nm was revealed. The size of subgrains in the transition layer varies within 150 – 250 nm. The obtained set of properties and characteristics of the structure allows us to draw a conclusion about the suitability of the formed coatings for work in electrical contacts of powerful electrical networks. The specific choice of a certain model of contacts requires additional clarifying studies.

Key words: low energy pulsed electron beam, silver, carbon graphite fiber, copper, nanoparticles, hardness, Young's modulus, wear resistance

Funding. The study was carried out with the financial support of the Grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of science MK-4292.2022.4. Electroexplosive coating was carried out using the equipment of the scientific laboratory of electroexplosive spraying of highly reliable coatings (laboratory created in accordance with the Decree of the Government of the Kemerovo Region – Kuzbass No. 632 of September 19, 2022, agreement No. 8). The studies were carried out using the equipment of the Collective Use Center "Structure, Mechanical and Physical Properties of Materials" of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Novosibirsk State Technical University".

For citation: Romanov D.A., Moskovskii S.V., Pochetukha V.V., Vashchuk E.S., Ivanov Yu.F. Structure and properties of the system coating (Ag – C) / substrate (Cu), irradiated by a pulsed electron beam. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):10–21. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-10-21](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-10-21)

Введение

В настоящее время актуальной проблемой электротехники является получение материалов, из которых изготавливаются электрические контакты. Взаимодействующие контакты должны быть прочными, стойкими к электрокоррозии, залипанию и окислению в процессе включения и выключения электрической цепи, а также обладать высокими тепло- и электропроводностью. Такие требования к материалам реализовываются в композиционных покрытиях.

Максимальные значения электропроводности наблюдаются у сплавов, в составе которых присутствуют углерод, медь, золото, серебро, кобальт, алюминий, никель [1; 2] в различных концентрациях.

В низковольтной энергетике широкое применение нашли электрические контакты на основе серебра с добавлением углерода (в количестве нескольких массовых процентов) в виде графита [3 – 8]. Однако эти контакты обладают недостатками: наблюдаются сильное прогорание и

плохое рассеивание дуги. В настоящем исследовании была предпринята попытка применить вместо порошка графита углеграфитовое волокно, которое служит каркасом изделия, а в качестве матрицы применяются различные металлы.

Самые высокие тепло- и электропроводность имеет серебро, но оно имеет низкую твердость. Как правило, в электрических соединениях должны использоваться контакты из одного и того же материала. Контакт серебро – серебро имеет относительно большую электропроводность. Серебро также имеет хорошие характеристики при пайке, а его оксиды обеспечивают проводимость тока. Именно поэтому серебро может быть подходящим материалом в сочетании с медью [9; 10], примеси которой увеличивают твердость и понижают эрозию.

Серебряные сплавы применяются в слаботоковых электромагнитных реле постоянного или переменного тока частотой 50 Гц для управления аппаратурой автоматики и связи в цепях повышенной мощности. Композиционные сплавы востребованы для изготовления в электромеханических реле для устройств сигнализации, контактов автоматов, электрических щеток, контакт-деталей заклепочного типа, контактов реле в блоках питания, централизации и блокировки на железнодорожном транспорте [1; 2; 8].

Композиционные сплавы должны обладать максимальными эксплуатационными свойствами, которые обеспечат их работоспособность в количестве более миллиона циклов замыкания и размыкания [1; 2; 8].

Электроконтакты на основе графита создают химическим осаждением металлов. С помощью ионно-плазменной струи происходит насыщение упрочняемой поверхности металлами. Для придания детали нужных размеров и требуемого качества поверхности проводят фрезерование и шлифование детали [11 – 13].

Одним из способов получения композиционных материалов медь – серебро – углерод является порошковая металлургия: порошки различных материалов загружаются в формы, прессуются, а затем спекаются, в результате частицы порошков «слипаются» за счет взаимной диффузии. После спекания определенные значения шероховатости поверхности достигаются резанием или шлифованием [5; 14; 15]. Рассматриваемое композиционное соединение имеет большую практическую значимость, соответственно, необходимо научное исследование получаемой структуры этого соединения.

Одним из интересных вариантов является получение нанокристаллов, которые обладают повышенными физическими свойствами [1; 13 – 18].

В последние 20 лет развивается метод электро-взрывного напыления высоконадежных покрытий с помощью плазменных струй продуктов взрыва проводников. Этот метод позволяет формировать покрытия со структурой субмикро- и нанометрового диапазонов [1; 8; 14; 15]. В настоящей работе для сглаживания неровностей поверхности покрытия, устранения пор и неоднородностей используется дополнительная электронно-пучковая обработка вместо механической обработки, что позволяет избежать потерь нанесенного материала.

Целью настоящей работы является изучение структуры и свойств композиционного покрытия серебро – углерод на медных электродах после обработки импульсным электронным пучком.

Методы и принципы исследования

Предметом исследования являются электро-взрывные покрытия серебро – углерод, сформированные на медных электродах. В результате электрического взрыва серебряной фольги массой 400 мг и углеграфитового волокна массой 50 мг при плотности мощности 5,5 ГВт/м² было создано покрытие на облучаемой поверхности (на меди). Давление в ударно-сжатом слое около места обработки составляет примерно 12,5 МПа, остаточное давление газа в рабочей камере приблизительно 100 Па, температура оплавления поверхности порядка 10⁴ К, время плазменного воздействия составляет 100 мкс. Покрытия напыляли на образцы-мишени из электротехнической меди. Химический состав меди приведен в работе [1]. После электровзрывного напыления медные образцы-мишени с покрытием подвергали дополнительному облучению импульсным электронным пучком с характеристиками: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов 60 Дж/см², длительность импульса 100 мкс, частота следования импульсов 0,3 с⁻¹, количество импульсов 10.

Элементный и фазовый составы исследовали на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 Tescan и просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100F, JEOL. Проведен рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализы поверхности на дифрактометре Shimadzu XRD 6000 в медном отфильтрованном излучении Cu-K_{α1} (монокроматор CM-3121). Микротвердость измеряли на приборе TTX-NHT S/N: 01-04538. Методика эксперимента указана в работе [1]. Определен модуль Юнга. Износостойкость определяли на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester [1]. Профиль канавки износа и ее параметры исследовали контактным нанопрофилометром.

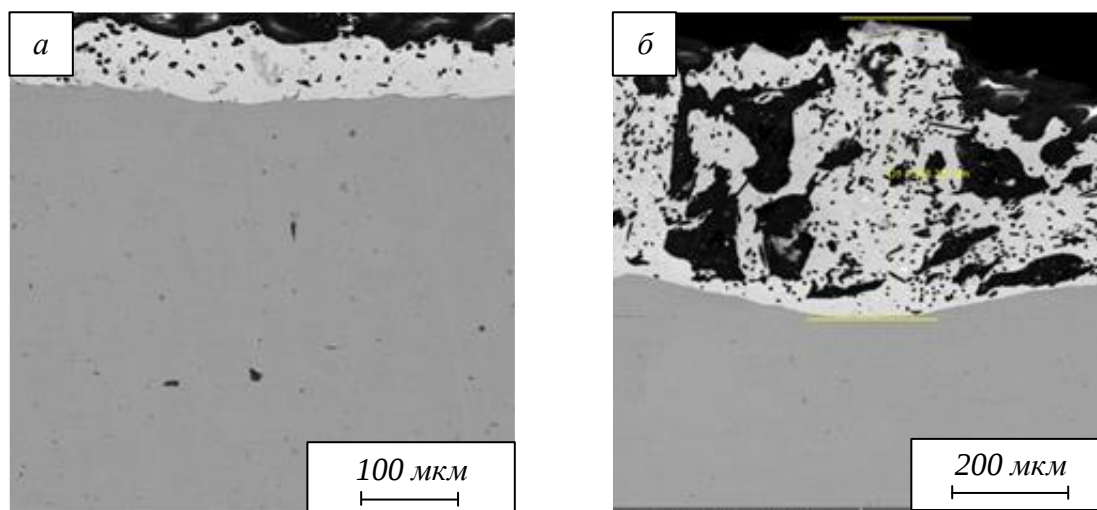


Рис. 1. Сканирующая электронная микроскопия поверхности серебро – углерод на медном электроде при различном увеличении (поперечный шлиф)

Fig. 1. Scanning electron microscopy of the silver-carbon surface on a copper electrode at different magnifications (cross section)

Основные результаты

Электронно-микроскопические исследования поперечных травленных шлифов данной системы показали формирование слоев неоднородной структуры (рис. 1) толщиной от 50 до 550 мкм. Покрытие имеет неоднородный фазовый состав и содержит включения преимущественно пластинчатой (цилиндрической) формы и микрокристаллических размеров (рис. 1).

Как и следовало ожидать, включения являются графитом, что было убедительно показано методами микрорентгеноспектрального анализа (метод картирования), результаты которого приведены на рис. 2. Часто включения графита в

системе покрытие (Ag – C) / подложка (медь) наблюдаются в виде скоплений разнообразной формы и размеров (рис. 3). В совокупности это указывает на формирование в покрытии механической смеси двух фаз: серебра и графита.

Метод картирования «по точкам» продемонстрировал распределение химических элементов покрытия в количественном отношении. Результаты такого исследования приведены на рис. 4 и 5, а также представлены в табл. 1. Анализируя представленные данные, можно отметить неоднородное распределение химических элементов в покрытии. Кроме этого, отчетливо

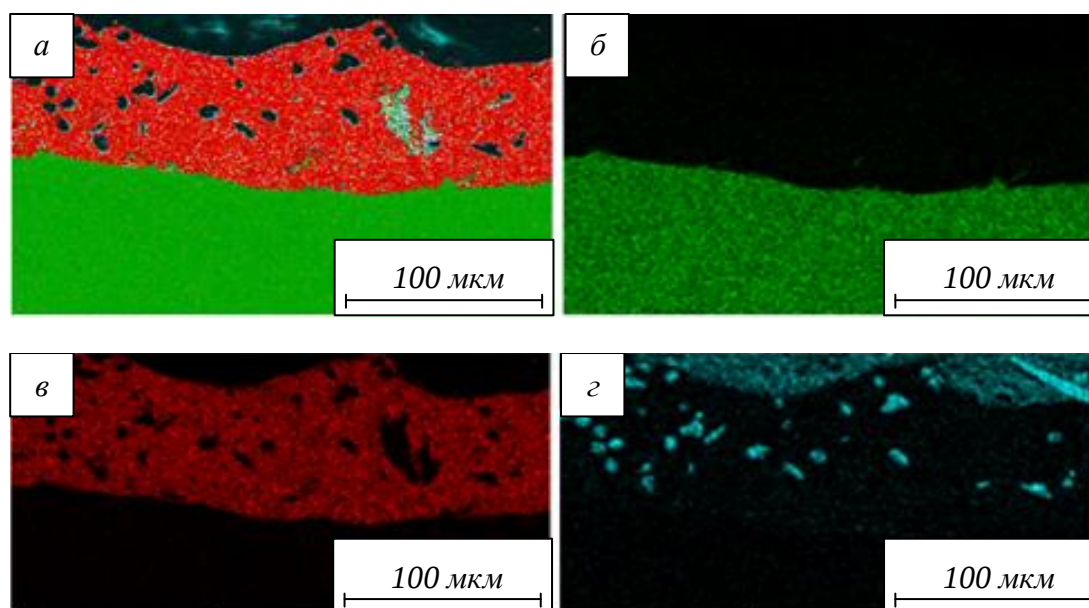


Рис. 2. Характеристическое рентгеновское излучение атомов меди (δ), серебра (ε) и углерода (ζ): а – многослойная карта ЭДС, полученная наложением изображений (б – ζ) поверхности серебро – углерод на медном электроде

Fig. 2. Characteristic X-ray emission of copper (δ), silver (ε) and carbon (ζ) atoms a is a multilayer EDS map obtained by superimposing images (б – ζ) of the silver-carbon surface on a copper electrode

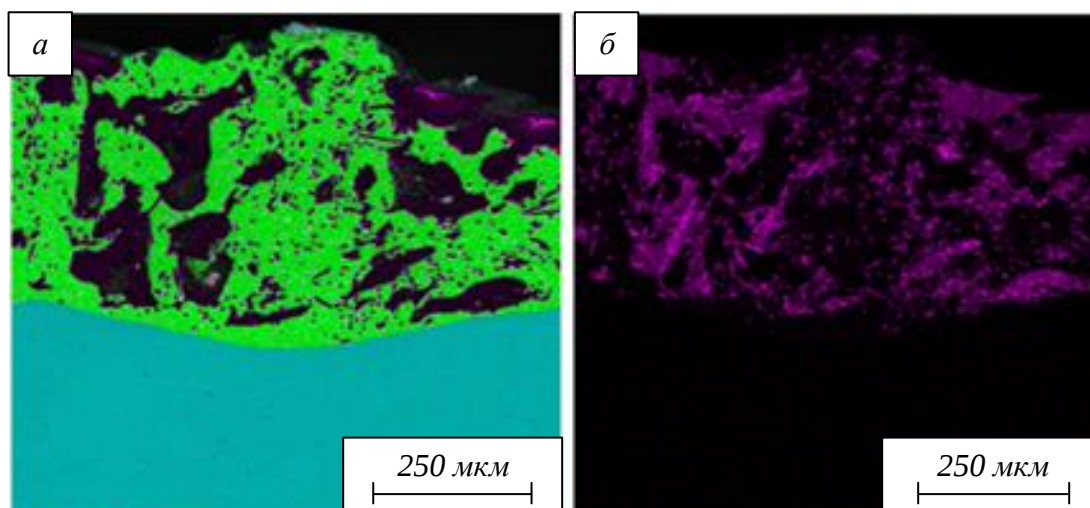


Рис. 3. Многослойная карта ЭДС поверхности серебро – углерод (а) и соответствующее ей характеристические рентгеновские излучения атомов углерода (фиолетовый цвет), серебра (зеленый цвет) и меди (голубой цвет) (б)
 Fig. 3. Multilayer EMF map of the silver-carbon surface (а), corresponding to its characteristic X-ray emission of carbon atoms (purple color), silver (green color) and copper (blue color) (б)

видно легирование покрытия атомами меди (подложка). При этом концентрация атомов меди увеличивается по мере удаления от поверхности покрытия.

Рентгенофазовый анализ поверхности показал формирование двухфазного покрытия (рис. 5). Сплав серебро – медь имеет эвтектический состав, в котором растворимость элементов друг в друге незначительна. Температура эвтектического равновесия системы серебро – медь составляет 781 °С, а концентрация меди – 39,8 ат. %. Предельная растворимость меди в серебре составляет 13,6 ат. %, а предельная растворимость серебра в меди – 4,9 ат. % [19; 20].

Относительная массовая доля фаз и их параметры приведены в табл. 2.

Анализ результатов относительного фазового содержания, представленного в табл. 2, показывает, что параметр кристаллической решетки меди и серебра отличается от параметра кристаллической решетки чистых металлов. Это свидетельствует о присутствии в покрытии твердого раствора медь – серебро. Графит методами рентгенофазового анализа не выявлен.

Просвечивающая электронная дифракционная микроскопия дефектной субструктуры показала, что медь в покрытии располагается преимущественно по границам зерен серебра (рис. 6).

Атомы углерода в этом случае не выявляются, что может свидетельствовать об их обособленном расположении в виде композиций из частиц различного размера, как это было показано выше (рис. 1 и 2).

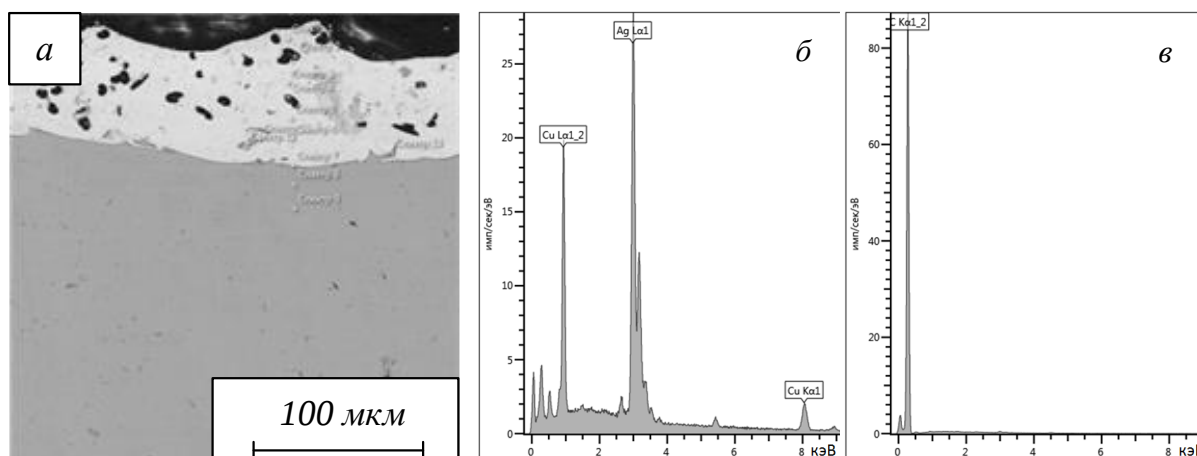


Рис. 4. Сканирующая электронная микроскопия поперечного шлифа поверхности серебро – углерод (а); энергетические спектры, полученные с участков 7 (б) и 4 (в) (на поз. а обозначены локальные точки образца, в которых проведен микроанализ)

Fig. 4. Scanning electron microscopy of the cross-section of the silver-carbon surface (а); energy spectra obtained from sites 7 (б) and 4 (в) (on the pos. а the local points of the sample are indicated, in which a X-ray microanalysis was performed)

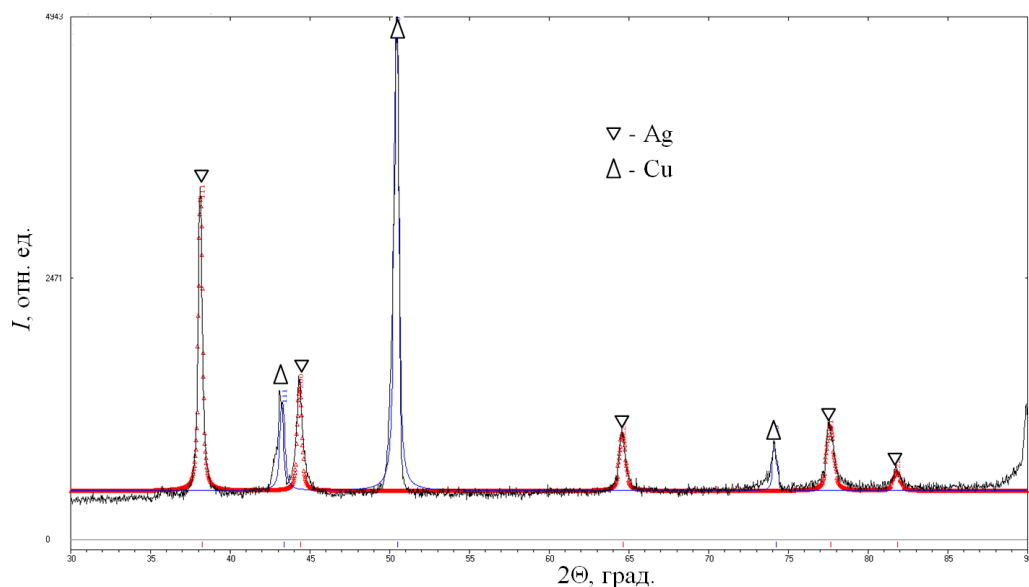


Рис. 5. Рентгенограмма поверхности серебро – углерод после облучения электронным пучком
Fig. 5. X-ray diffraction pattern of the silver-carbon surface after electron beam irradiation

Анализ микроэлектронограммы (рис. 7, б) позволяет утверждать, что данный участок покрытия сформирован зернами серебра (рис. 7, в), в объеме которых присутствуют наноразмерные (10 – 15 нм) частицы графита (рис. 7, з). Частицы графита присутствуют также и на границах зерен серебра (рис. 7, в, з).

На рис. 8 приведены электронно-микроскопические изображения участка покрытия, в котором по границам зерен серебра расположены частицы графита (рис. 8, з, е) и прослойки меди (рис. 8, д). В объеме зерен серебра расположены наноразмерные (12 – 15 нм) частицы графита (рис. 8, в).

Электронно-микроскопическое изображение структуры границы контакта покрытия и подложки приведено на рис. 9. Отчетливо видно формирование переходного слоя толщиной 250 – 300 нм субзеренного строения с размером субзерен, изменяющимся в пределах от 150 до 250 нм (рис. 9, з – е). Фазовый состав переходного слоя представлен медью, серебром и графитом.

Результаты исследований механических свойств рассматриваемой системы показывают, что твердость и модуль Юнга снижаются при

удалении от поверхности к границе контакта покрытия и подложки (рис. 10).

Трибологические свойства рассматриваемой системы после обработки электронным пучком изменяются. Параметр износа поверхности составляет $6,0 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$, что меньше в 12,2 раза параметра износа медного электрода. Коэффициент трения поверхностных слоев равен 0,3 и равен коэффициенту трения медного электрода.

Таким образом, на основании данных изучения фазового состава и структуры поверхности кратное увеличение твердости полученного слоя и износостойкости покрытия можно соотнести с формированием субмикро- и нанокристаллической многофазной структуры вследствие облучения покрытия импульсным электронным пучком.

Выводы

Установлено, что создается неоднородный тонкий поверхностный слой серебро – углерод толщиной 50 – 550 мкм. Графит имеет различную форму, но в основном это скопления в виде пластинок, размеры которых достигают наноразмерного диапазона (10 – 15 нм). В этом слое присутствуют атомы меди, по глубине облуче-

Таблица 1

Данные микрорентгеноспектрального количественного анализа элементного состава поверхности серебро – углерод, определенные «по точкам» на рис. 4, а
Table 1. The data of the X-ray quantitative microanalysis of the elemental composition of the silver-carbon surface, determined "by points" in Fig. 4, a

Элемент	Номер спектра, представленного на рис. 4											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13
Cu	5,6	0	5,6	0	8,9	8,1	37,4	100,0	100,0	17,2	25,6	52,1
Ag	94,4	0	94,4	0	91,1	91,9	62,6	0	0	82,8	74,4	47,9

**Данные элементного содержания и параметров кристаллической решетки поверхности
серебро – углерод после облучения электронным пучком**

Table 2. Data on the elemental content and parameters of the crystal lattice of the silver-carbon surface after electron beam irradiation

Образец	Обнару- женные фазы	Содержание фаз, масс. %	Параметр решетки a , Å	Размер областей когерентного рассеяния, нм	$\Delta d/d$, 10^{-3}
Система (Ag – C)/(медь) + электронно-пучковая обра- ботка	Ag	34,4	4,0743	63,29	1,507
	Cu	65,6	3,6106	34,34	1,032

ния их концентрация возрастает. Методами просвечивающей электронной микроскопии выявлено, что медь присутствует в виде прослоек по границам зерен серебра, а также в виде зерен субмикронных размеров. Замечена локализация углерода в зеренной структуре серебра и меди, а также на их границах. Между поверхностным слоем и медной основой присутствует переходный слой толщиной 250 – 300 нм с субзеренной структурой, размер субзерен составляет 150 – 250 нм.

Модуль упругости и микротвердость по глубине покрытия монотонно уменьшаются. Износостойкость увеличивается в 12 раз по сравнению с основой и составляет $6 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$. Коэффициент трения верхнего слоя и основы составляют 0,3. Высокие твердость и износостойкость упрочненного слоя объясняются формированием субмикро- и нанокристаллической многофазной структуры после электронного импульсного облучения.

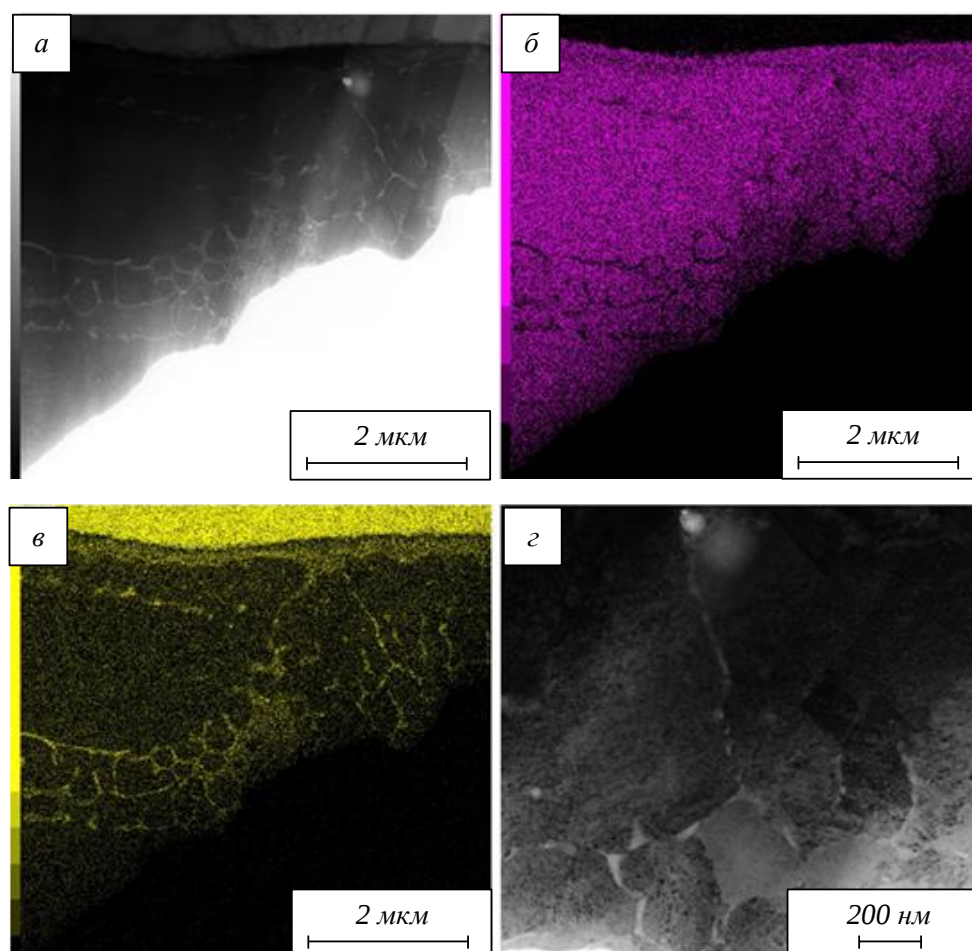


Рис. 6. Электронная микроскопия структуры системы серебро – углерод на медной подложке (а, з), а также изображения участка фольги (б), полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов серебра (б) и меди (в)
Fig. 6. Electron microscopy of the structure of the silver-carbon system on a copper substrate (a, z), as well as images of the foil section (a) obtained in the characteristic X-ray radiation of silver (b) and copper (e) atoms

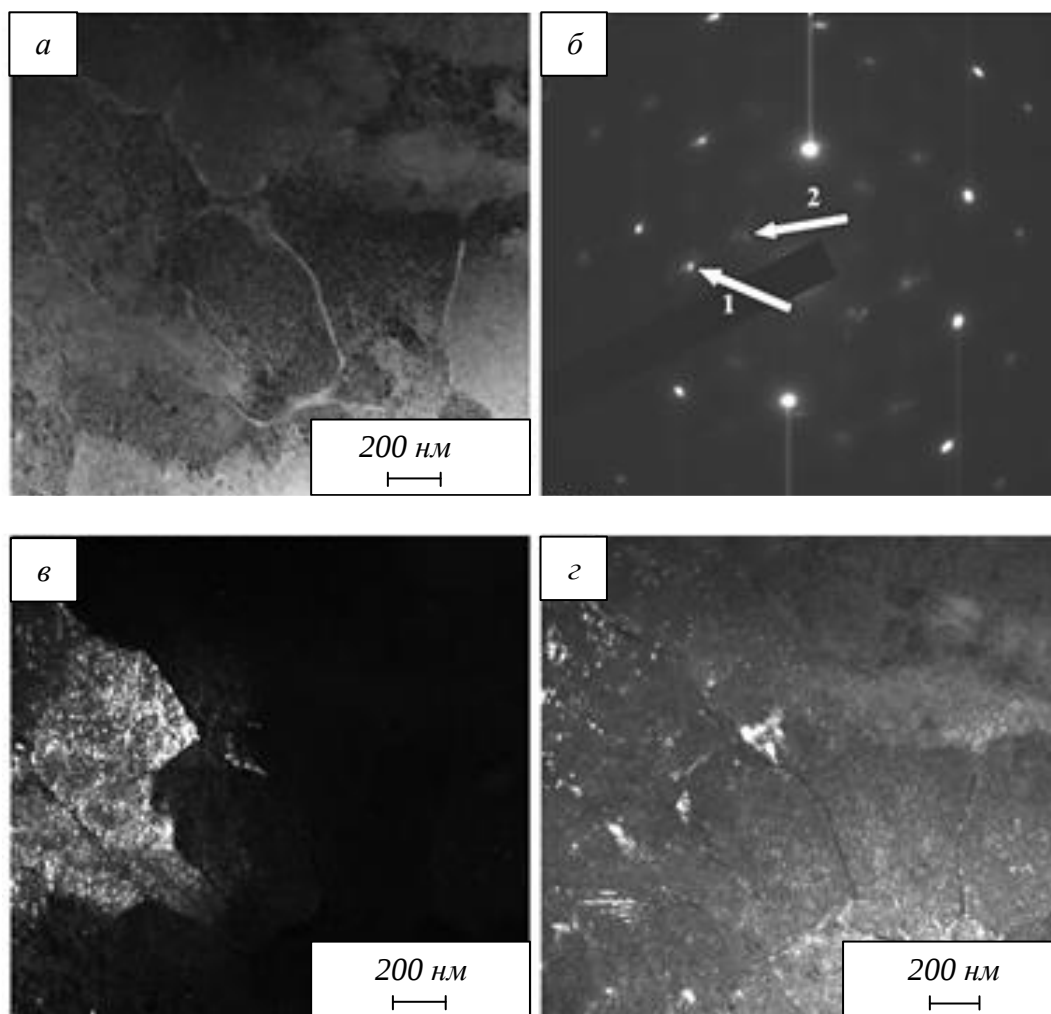


Рис. 7. Светлопольное изображение поверхности серебро – углерод на медном электроде (а); микроэлектроннограмма (б); темнопольные изображения (в, г), полученные в рефлексах $[022]\text{Ag} + [416]\text{C}$ (в) и $[111]\text{Ag} + [111]\text{C}$ (г). На поз. б стрелками показаны рефлексы, в которых получены темнопольные изображения 1 (в) и 2 (г). Просвечивающая электронная дифракционная микроскопия

Fig. 7. Light-field image of the silver-carbon surface on a copper electrode (a); X-ray diffraction pattern (b); dark-field images (v, z) obtained in reflections $[022]\text{Ag} + [416]\text{C}$ (v) and $[111]\text{Ag} + [111]\text{C}$ (z). In pos. б arrows show reflections in which dark-field images 1 (v) and 2 (r) are obtained. Transmission electron diffraction microscopy

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Почетуа В.В., Романов Д.А., Громов В.Е., Филяков А.Д. *Формирование структуры и свойств электровзрывных электроэрозионноустойчивых покрытий на медных контактных переключателях мощных электрических сетей*. Новокузнецк: ООО Полиграфист, 2023:257.
2. Пат. 2380781 С1 РФ № 2008139279/09. Материал для электрических контактов и способ изготовления электрических контактов / В.С. Аркатов, В.В. Васин, Е.Н. Емельянов, А.В. Конаков, В.С. Фадеев, Ю.Л. Чигрин, О.В. Штанов, А.В. Никонов, С.Н. Микушкин, В.С. Минаков. Заявл. 03.10.2008; опубл. 27.01.2010. Бюл. № 3.
3. Luo G., Li P., Hu J., Guo J., Sun Y., Shen, Q. Ag and C addition into Al – Cu matrix composites. *Journal of Materials Science*. 2022;(57):11013–11025.
<http://doi.org/10.1007/s10853-022-07189-6>
4. Sytschev A.E., Vadchenko S.G., Busurina M.L., Boyarchenko O.D., Karpov A.V. High-temperature interaction between carbon fibers and Cu – Ag eutectic alloy. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2022;31:188–194.
<http://doi.org/10.3103/S1061386222040112>
5. Wang J., Hu D., Zhu Y., Guo P. Electrical properties of in situ synthesized Ag-Graphene/Ni composites. *Materials*. 2022;(15(18)):6423.
<https://doi.org/10.3390/ma15186423>
6. Li S., Hao Y., Chen X., Gewirth A.A., Moore J.S., Schroeder C.M. Covalent Ag – C bonding contacts from unprotected terminal acetylenes for molecular junctions. *Nano Letters*. 2020;(20,7):5490–5495.
<https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c02015>

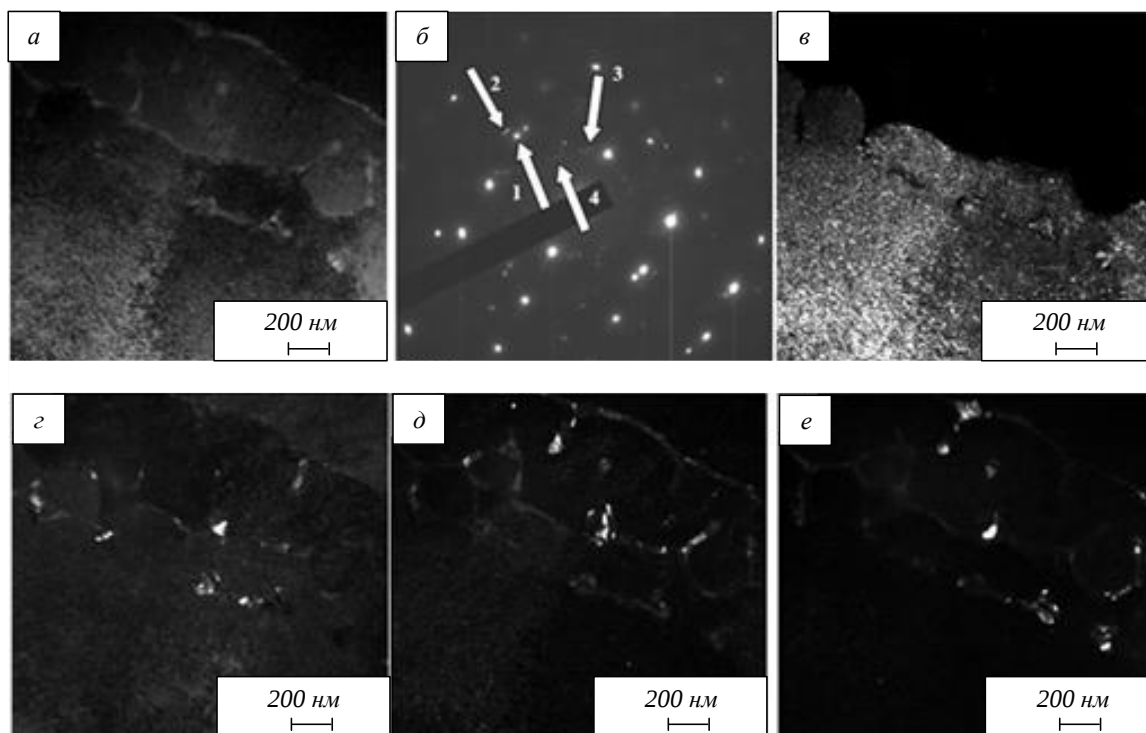


Рис. 8. Светлопольное изображение структуры серебро – углерод на медном катоде (а); микроэлектроннограмма (б); темнопольные изображения (в – е), полученные в рефлексах $[110]C + [311]Ag$ (в), $[112]C$ (г), $[111]Cu$ (д) и $[205]C$ (е).

На поз. б стрелки показывают рефлексы, в которых получены темнопольные изображения 1 – 4 (в – е)

Fig. 8. Light-field image of the silver-carbon structure on a copper cathode (a); X-ray diffraction pattern (b); dark-field images (в – е) obtained in reflections $[110]C + [311]Ag$ (в), $[112]C$ (г), $[111]Cu$ (д) and $[205]C$ (е).

On the pos. б arrows show reflections in which dark-field images 1 – 4 (в – е) are obtained

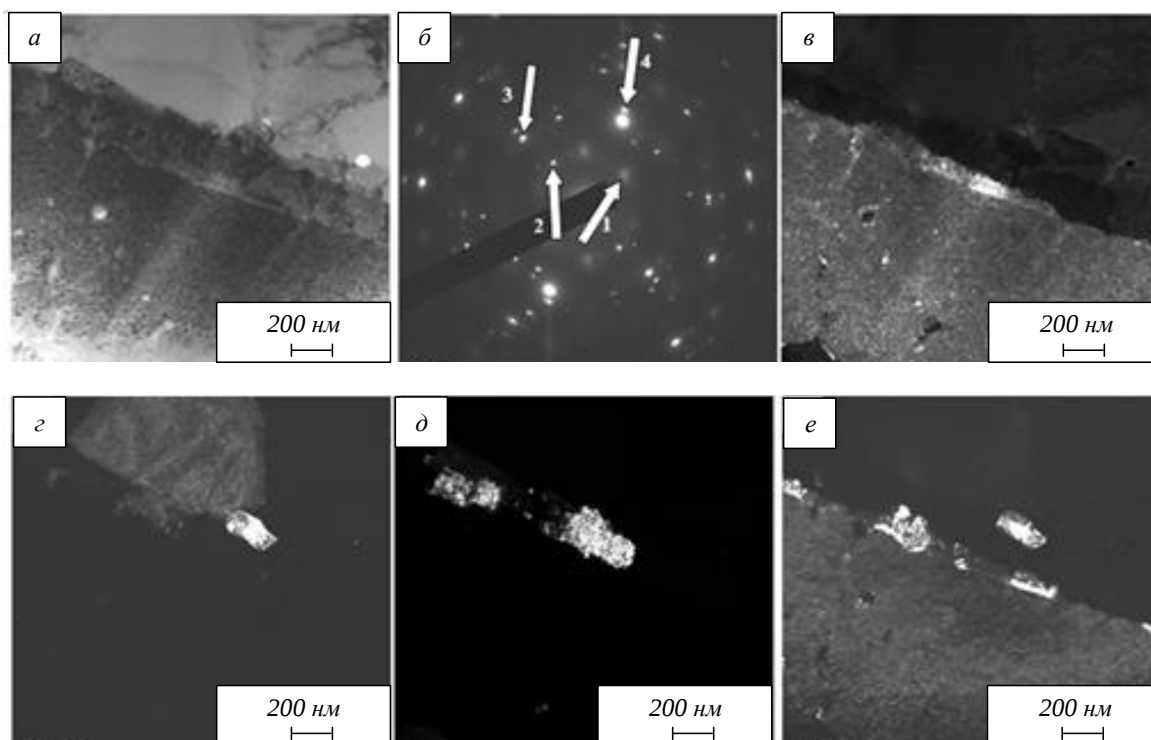


Рис. 9. Светлопольное изображение системы серебро – углерод на медном электроде (а), микроэлектроннограмма (б) и темнопольное изображение, полученное в рефлексе $[111]Ag + [213]C$ (в), $[111]Cu + [111]C$ (г), $[311]Ag + [110]C$ (д) и $[200]Cu + [006]C$ (е). На поз. б стрелками указаны рефлексы, в которых получены темнопольные изображения 1 – 4 (в – е).

Просвечивающая электронная дифракционная микроскопия

Fig. 9. A light-field image of the silver-carbon system on a copper electrode (a), a X-ray diffraction pattern (б) and a dark-field image obtained in the reflection $[111]Ag + [213]C$ (в), $[111]Cu + [111]C$ (г), $[311]Ag + [110]C$ (д) and $[200]Cu + [006]C$ (е).

On the pos. б the arrows indicate reflection in which dark-field images 1 – 4 (в – е) are obtained.

Transmission electron diffraction microscopy

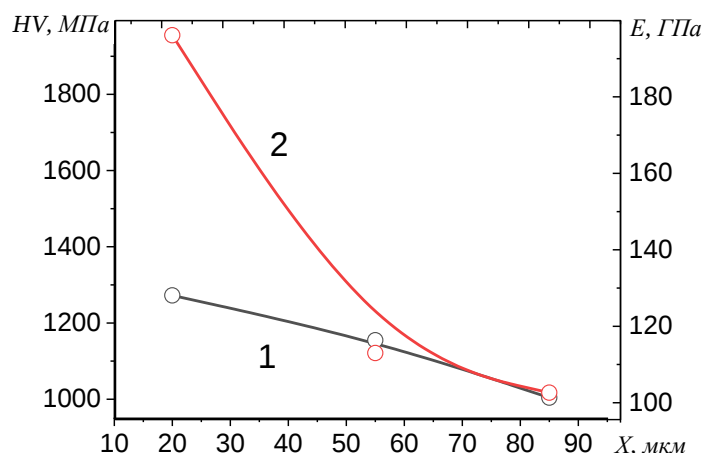


Рис. 10. Зависимости твердости (1) и модуля Юнга (2) от расстояния от поверхности покрытия, облученного импульсным электронным пучком

Fig. 10. Dependences of hardness (1) and Young's modulus (2) on the distance from the surface of the coating irradiated with a pulsed electron beam

7. Fernández S., Molinero A., Sanz D., González J.P., Cruz M., Gandía J.J., Cárabe J. Graphene-based contacts for optoelectronic devices. *Micromachines*. 2020;(11(10)):919. <https://doi.org/10.3390/mi11100919>
8. Romanov D.A., Pochetukha V.V., Sosnin K.V., Moskovskii S.V., Gromov V.E., Bataev V.A., Ivanov Yu.F., Semin A.P. Increase in properties of copper electrical contacts in formation of composite coatings based on Ni – C – Ag – N system. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:947–966. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.040>
9. Gaurav A.K., Chang Y., Wojciech T.O., Moreno-Hernandez I.A., Ledendecker M., Alivisatos A.P. Self-Limiting shell formation in Cu@Ag core-shell nanocrystals during galvanic replacement. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2020;11(13):5318–5323. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.0c01551>
10. Непша Н.И., Веселов А.Д., Савина К.Г., Богданов С.С., Колосов А.Ю., Мясниченко В.С., Сдобняков Н.Ю. Вариабельность структурных превращений в биметаллических наносплавах Cu-Ag. *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2022;14:211–226. EDN: GAZINQ; <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2022.14.211>
11. Mousavi Z., Pourabdoli M. Physical and chemical properties of Ag – Cu composite electrical contacts prepared by cold-press and sintering of silver-coated copper powder. *Materials Chemistry and Physics*. 2022;290:126608. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126608>
12. Aikun L., Ming X., Yang Y., Zhang J., Wang S., Chen Y., Zhou W. Effect of CNTs content on the mechanical and arc-erosion performance of Ag-CNTs composites. *Diamond and Related Materials*. 2022;128:109211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109211>
13. Yakout M., Elbestawi M., Veldhuis S.C. A Review of metal additive manufacturing technologies. *Solid State Phenomena*. 2018;278:1–14. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.278.1>
14. Ivanov Yu.F., Koval N.N., Akhmadeev Yu.H., Uglov V.V., Shugurov V.V., Petrikova E.A., Krysinina O.V., Prokopenko N.A., Azhazha I.I. Structure and properties of multi-layer films of high-entropy metals deposited by the ion-plasma method. *Russian Physics Journal*. 2022;(64):2207–2213. EDN: IRQUAY; <https://doi.org/10.1007/s11182-022-02578-5>
15. Комаров Д.В., Коновалов С.В., Жуков Д.В., Виноградов И.С., Панченко И.А. Анализ современной ситуации в области применения электронно-пучковой обработки различных сплавов. Часть 2. *Ползуновский вестник*. 2022;3:204–215. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028>
16. Chen S., Wang J., Yuan Z., Wang Z., Du D. Microstructure and arc erosion behaviors of Ag-CuO contact material prepared by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;(860):158494. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158494>
17. Li H., Wang X., Hu Z., Liu Y. Based electrical contact material under direct current. *Journal of Electronic Materials*. 2020;49:4730–4740. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08193-9>
18. Ma M., Qu Y., Wang Z., Wang J., Du D. Dynamics evolution and mechanical properties of

the erosion process of Ag – CuO contact materials. *Acta Metallurgica Sinica*. 2022;58(10):1305–1315.

<https://doi.org/10.11900/0412.1961.2021.00498>

19. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди / Под ред. С.В. Шухардина. Москва: Наука, 1979:248.
20. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. В 3-х т. Т. 1. Москва: Машиностроение, 1996:992.

REFERENCES

1. Pochetukha V.V., Romanov D.A., Gromov V.E., Filyakov A.D. Formation of the structure and properties of electroexplosive electroerosion-resistant coatings on copper contacts of switches of high-power electrical networks. Novokuznetsk: OOO Poligrafist.2023:257. (In Russ.).
2. Arkatov V.S., Vasin V.V., Emel'yanov E. N.; Konakov A.V., Fadeev V.S.; Chigrin Yu.L., Shtanov O. V., Nikonov A.V., Mikushkin S. N., Minakov V.S. Material for electrical contacts and method of manufacturing electrical contacts. Pat. 2380781 C1 RF No. 2008139279/09. Byullyuten' izobretenii. 2010, no. 3. (In Russ.).
3. Luo G., Li P., Hu J., Guo J., Sun Y. & Shen, Q. Ag and C addition into Al–Cu matrix composites. *Journal of Materials Science*. 2022;(57):11013–11025. <http://doi.org/10.1007/s10853-022-07189-6>
4. Sytshev A. E., Vadchenko S. G. Busurina M. L., Boyarchenko O. D. & Karpov, A. V. High-Temperature Interaction between Carbon Fibers and Cu–Ag Eutectic Alloy. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2022;31:188–194. <http://doi.org/10.3103/S1061386222040112>
5. Wang J., Hu D., Zhu Y. and Guo P. Electrical Properties of In Situ Synthesized Ag-Graphene/Ni Composites. *Materials*. 2022;(15(18)):6423. <https://doi.org/10.3390/ma15186423>
6. Li S., Hao Y., Chen X., Gewirth A.A., Moore J.S., Schroeder C. M. Covalent Ag–C Bonding Contacts from Unprotected Terminal Acetylenes for Molecular Junctions. *Nano Letters*. 2020;(20,7):5490–5495. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c02015>
7. Fernández S., Molinero A., Sanz D., González J.P., Cruz M., Gandía J.J., Cárabe J. Graphene-Based Contacts for Optoelectronic Devices. *Micromachines*. 2020;(11(10)):919. <https://doi.org/10.3390/mi11100919>
8. Romanov D.A., Pochetukha V.V., Sosnin K.V., Moskovskii S.V., Gromov V.E., Bataev V.A., Ivanov Yu.F., Semin A.P. Increase in properties of copper electrical contacts in formation of composite coatings based on Ni–C–Ag–N system. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:947–966. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.040>
9. Gaurav A.K., Chang Y., Wojciech T. Osowiecki, Moreno-Hernandez I.A., Ledendecker M., Alivisatos A.P. Self-Limiting Shell Formation in Cu@Ag Core–Shell Nanocrystals during Galvanic Replacement. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2020;11(13):5318–5323. <https://doi.org/10.1021/acs.jpclett.0c01551>
10. Nepsha N.I., Veselov A.D., Savina K.G., Bogdanov S.S., Kolosov A.Yu., Myasnichenko V.S., Sdobnyakov N.Yu. Variability of structural transformations in Cu–Ag bimetallic nanoalloys. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*. 2022;14:211–226. (In Russ.). EDN: GAZINQ. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2022.14.211>
11. Mousavi Z., Pourabdoli M. Physical and chemical properties of Ag–Cu composite electrical contacts prepared by cold-press and sintering of silver-coated copper powder. *Materials Chemistry and Physics*.2022;290:126608. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126608>
12. Aikun L., Ming X., Yang Y., Zhang J., Wang S., Chen Y., Zhou W. Effect of CNTs content on the mechanical and arc-erosion performance of Ag–CNTs composites. *Diamond and Related Materials*. 2022;128:109211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109211>
13. Yakout M., Elbestawi M., Veldhuis S.C. A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies. *Solid State Phenomena*. 2018;278:1–14. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.278.1>
14. Ivanov Yu.F., Koval N.N., Akhmadeev Yu. H., Uglov V.V., Shugurov V.V., Petrikova E.A., Krysin O.V., Prokopenko N.A., Azhazha I.I. Structure and Properties of Multi-Layer Films of High-Entropy Metals Deposited by the Ion-Plasma Method. *Russian Physics Journal*. 2022;(64):2207–2213. EDN: IRQUAY; <https://doi.org/10.1007/s11182-022-02578-5>
15. Komarov D.V., Kononov S.V., Zhukov D.V., Vinogradov I.S., Panchenko I.A. Analysis of the current situation in the field of electron beam processing of various alloys. Part 2. *Polzunovskii vestnik*.2022;3:204–215. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2022.03.028>
16. Chen S., Wang J., Yuan, Z., Wang Z., Du D. Microstructure and arc erosion behaviors of Ag–CuO contact material prepared by selective

- laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;(860):158494.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158494>
17. Hangyu Li, Xianhui Wang, Zhudong Hu & Yanfeng Liu. Based Electrical Contact Material Under Direct Current. *Journal of Electronic Materials*. 2020;49:4730–4740.
<https://doi.org/10.1007/s11664-020-08193-9>
 18. Ma M., Qu Y., Wang Z., Wang J., Du D. Dynamics Evolution and Mechanical Properties of the Erosion Process of Ag–CuO Contact Materials. *Acta Metallurgica Sinica*. 2022;58(10):1305–1315.
<https://doi.org/10.11900/0412.1961.2021.00498>
 19. Dual and multicomponent copper-based systems. Ed. / Shukhardin S.V. Moscow: Nauka. 1979:248. (In Russ.).
 20. Lyakishev N.P. *Diagrams of the state of double metal systems. Part 1*. Moscow: Mashinostroenie. 1996:992. (In Russ.).

Сведения об авторах

Денис Анатольевич Романов, д.т.н., заведующий лабораторией электровзрывного напыления высоконадежных покрытий, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: romanov_da@physics.sibsui.ru
ORCID: 0000-0002-6880-2849
SPIN-код: 3930-2963

Станислав Владимирович Московский, к.т.н., старший научный сотрудник научной лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: psk-svm@yandex.ru
ORCID: 0009-0008-8298-3800

Василий Витальевич Почетуха, к.т.н., старший преподаватель кафедры транспорта и логистики, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: v.pochetuha@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0492-6188

Екатерина Степановна Ващук, к.т.н., доцент кафедры экономических и естественно-научных дисциплин, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, филиал в г. Прокопьевск
E-mail: vaschuk@bk.ru
ORCID: 0000-0002-1345-7419
SPIN-код: 9811-5528

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН
E-mail: yufi55@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8022-7958
SPIN-код: 7576-4810

Information about the authors:

Denis A. Romanov, Dr. Sci.(Eng.), Head of the Laboratory of Electroexplosive Spraying of Highly Reliable Coatings, Siberian State Industrial University
E-mail: romanov_da@physics.sibsui.ru
ORCID: 0000-0002-6880-2849
SPIN-код: 3930-2963

Stanislav V. Moskovskii, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Laboratory of Electroexplosive Spraying of Highly Reliable Coatings, Siberian State Industrial University
E-mail: psk-svm@yandex.ru
ORCID: 0009-0008-8298-3800

Vasilii V. Pochetukha, Cand. Sci. (Eng.), Senior lecturer at the Department of Transport and Logistics, Siberian State Industrial University
E-mail: v.pochetuha@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0492-6188

Ekaterina S. Vashchuk, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Economic and Natural Sciences, .F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Prokopyevsk Branch
E-mail: vaschuk@bk.ru
ORCID: 0000-0002-1345-7419
SPIN-код: 9811-5528

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher, Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
E-mail: yufi55@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8022-7958
SPIN-код: 7576-4810

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

Поступила в редакцию 30.10.2023
После доработки 01.07.2024
Принята к публикации 09.07.2024

Received 30.10.2023
Revised 01.07.2024
Accepted 09.07.2024

Оригинальная статья

УДК 66.094.55

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-22-29

**ВЛИЯНИЕ ДИФфуЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ БОР – ХРОМ – ЛАНТАН
НА ЖАРОСТОЙКОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ 4Х5МФ1С**

© 2024 г. Ц. Чжэн^{1, 2}, М. А. Гурьев^{1, 2, 3}, С. Г. Иванов^{1, 2}, Ш. Мэй², А. М. Гурьев^{1, 2}

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

²Уханьский текстильный университет (Китай, 430200, провинция Хубэй, Ухань, ул. ФангЖи, 1)

³Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd. (Китай, 312000, провинция Чжэцзян, Шаосин, уезд Синьчан)

Аннотация. Изучено влияние диффузионного покрытия, состоящего из бора, хрома и редкоземельного элемента лантан, на стойкость стали марки 4Х5МФ1С к высокотемпературному окислению и износу. Толщина диффузионного слоя после добавления хрома и лантана в насыщающий состав увеличилась в 2,2 раза (с 28,2 до 61,5 мкм) по сравнению с однокомпонентным борированием. Это связано с тем, что введение лантана вызывает искажение атомной решетки железа, увеличивает плотность дефектов, тем самым способствуя образованию боридного слоя. В боридном слое без добавления хрома и лантана количество пор и микротрещин больше. После добавления хрома и лантана боридный слой обладает более высокой плотностью и однородностью. В эксперименте по окислению при температуре 800 °С и выдержке в течение 6 часов толщина оксидного слоя образцов с диффузионным покрытием бор – хром – лантан уменьшилась с 68 до 22 мкм относительно однокомпонентного боридного слоя. Анализ оксидного слоя показал, что образцы после комплексного насыщения бором, хромом и лантаном имеют плотный и гладкий оксидный слой, в то время как у борированных в однокомпонентной насыщающей среде образцов наблюдаются трещины и поры. Износ образцов с комплексным диффузионным слоем после насыщения бором, хромом и лантаном имеет меньшую шероховатость, следы износа неглубокие, склонность слоя к сколам значительно уменьшилась. Добавление хрома и лантана в процессе борирования позволяет значительно повысить стойкость стали марки 4Х5МФ1С к окислению при высоких температурах и износостойкость.

Ключевые слова: борирование, микротвердость, износостойкость, диффузия, жаростойкость, редкоземельные элементы, хром, лантан

Для цитирования: Чжэн Ц., Гурьев М.А., Иванов С.Г., Мей Ш., Гурьев А.М. Влияние диффузионного покрытия бор – хром – лантан на жаростойкость и износостойкость стали 4Х5МФ1С. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):22–29. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-22-29](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-22-29)

Original article

**EFFECT OF BORON – CHROMIUM – LANTHANUM
DIFFUSION COATING ON THE HEAT RESISTANCE AND WEAR RESISTANCE OF
4Kh5MF1S STEEL**

© 2024 Q. Zheng^{1, 2}, M. A. Guryev^{1, 2, 3}, S. G. Ivanov^{1, 2}, S. Mei², A. M. Guryev^{1, 2}

¹Polzunov Altai State Technical University (46 Lenin Ave., Barnaul, Altai Territory, 656038, Russia Federation)

²Wuhan Textile University (1 Fangzhi Str., Hubei, Wuhan, 430200, China)

³Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd. (Xinchang, Shaoxing, Zhejiang, 312000, China)

Abstract. The effect of a diffusion coating consisting of boron, chromium and the rare earth element lanthanum on the resistance of 4Kh5MF1S steel to high-temperature oxidation and wear was studied. The thickness of the diffusion layer after the addition of chromium and lanthanum to the saturating composition increased 2.2 times - from 28.2 to 61.5 μm compared with single-component boration. This is due to the fact that the introduction of lanthanum causes distortion of the atomic lattice of iron, increases the density of defects, thereby contributing to the formation of a boride layer. The number of pores and microcracks is greater in the boron layer without the addition of chromium and lanthanum. After the addition of chromium and lanthanum, the boride layer has a higher density and uniformity. In an oxidation experiment at a temperature of 800 °C and exposure for 6 hours, the thickness of the oxide layer of samples with a boron-chromium-lanthanum diffusion coating decreased from 68 to 22 μm relative to a single-component boride layer. The analysis of the oxide layer showed that the samples after complex saturation with boron, chromium and lanthanum have a dense and smooth oxide layer, while the samples borationed in a single-component saturating medium have cracks and pores. The wear of samples with a complex diffusion layer after saturation with boron, chromium and lanthanum has a lower roughness, the wear marks were shallow, and the tendency of the layer to chip significantly decreased. The addition of chromium and lanthanum in the boration process can significantly increase the resistance of Kh5MF1S steel to oxidation at high temperatures and wear resistance.

Keywords: boriding, microhardness, wear resistance, diffusion, heat resistance, rare earth elements, chromium, lanthanum

For citation: Zheng Q., Guryev M.A., Ivanov S.G., Mei S., Guryev A.M. Effect of boron – chromium – lanthanum diffusion coating on the heat resistance and wear resistance of 4Kh5MF1S steel. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):22–29. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-22-29](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-22-29)

Введение

Сталь марки 4X5MФ1С широко используется в производстве горячих штампов и инструмента для экструзии цветных металлов и сплавов, а также рабочих органов породоразрушающего инструмента благодаря своим превосходным механическим свойствам и износостойкости [1; 2]. Однако низкая стойкость стали марки 4X5MФ1С к окислению в условиях высоких температур все еще остается значительной проблемой. Изделия из такой стали, работающие в тяжелых условиях (которые сочетают различные виды износа и воздействие высокотемпературных циклов), часто выходят из строя [3; 4]. Решение этой важной научной проблемы имеет огромное значение для увеличения срока службы горячих штампов и снижения производственных затрат по причине технологических простоев оборудования, вызванных необходимостью частой смены оснастки.

Доказано, что технология диффузионного насыщения бором поверхности горячештампового инструмента значительно повышает стойкость стали к окислению при высоких температурах [5 – 8]. Исследования показали, что в процессе борирования образуется диффузионный слой, состоящий преимущественно из соединений FeB и Fe₂B и обладающий высокими твердостью и износостойкостью [9; 10]. Однако однокомпонентный боридный слой имеет такие недостатки, как наличие пор, неравномерность диффузионного слоя (боридные иглы не плотно расположены друг к другу) и микротрещины, что в условиях трения, сопряженного с высокой температурой, снижает стойкость материала к окислению и из-

носу и приводит к быстрой деградации геометрии инструмента [11; 12].

Для устранения этих недостатков в последние годы использовались процессы комплексного диффузионного насыщения бором совместно с такими элементами, как хром, кремний, алюминий [13 – 15]. Редкоземельный элемент лантан (La) – химически активный редкоземельный металл, сам по себе обладает хорошей термостойкостью и коррозионной стойкостью. Добавки лантана в качестве легирующего элемента в стали и сплавы многих цветных металлов позволяют во многих случаях значительно повысить термостойкость и окислительную стойкость [16]. Кроме того, положительное действие на термо- и окислительную стойкость боридных слоев оказывают добавки хрома и его соединений в боридную смесь с целью получения комплексных борохромированных диффузионных покрытий. В процессе борирования хром может образовывать как собственные стабильные соединения, такие как CrB и Cr₂B, так и легировать бориды железа, что повышает твердость поверхности и износостойкость комплексного боридного покрытия, содержащего хром [17; 18]. Таким образом, одновременное введение лантана и хрома в боридное покрытие позволит значительно улучшить эксплуатационные характеристики комплексного трехкомпонентного боридного слоя по сравнению с одно- и двухкомпонентными покрытиями.

Методика и материалы

В исследовании использована сталь марки 4X5MФ1С следующего состава: 0,32 – 0,45 % C; 0,81 – 1,20 % Si; 0,20 – 0,50 % Mn; 4,75 – 5,50 % Cr;

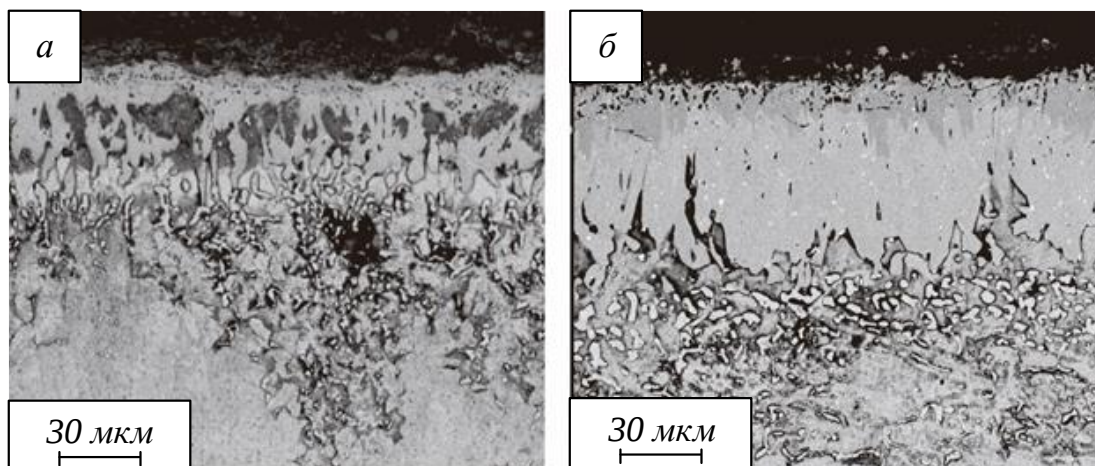


Рис. 1. Микроструктура по сечению боридного слоя образца стали марки 4X5MF1C после борирования (а) и после борирования с лантаном и хромом (б)

Fig. 1. Microstructure of the cross section of the boride layer of a 4X5MF1C steel sample after boration (a) and after boration with lanthanum and chromium (b)

1,10 – 1,30 % Мо; 0,80 – 1,20 % V; остальное железо. Все образцы стали перед насыщением поэтапно обрабатывали наждачной бумагой с зернистостью 320, 800 и 1500 grid, после чего тщательно промывали в воде и сушили в этиловом спирте. Насыщающая среда, используемая в работе, состояла из следующих компонентов: B_4C , La_2O_3 , Cr_2O_3 – в качестве поставщиков активных атомов; KBF_4 – активатор процесса диффузионного насыщения и графита в качестве балластной добавки для предотвращения спекания насыщающей смеси. Насыщающую среду тщательно перемешивали, разбавляли водой до пастообразного состояния и наносили на поверхность образцов толщиной 5 мм. Далее образцы после сушки на воздухе до полного высыхания насыщающей обмазки помещали в печь сопротивления SX2-4-17TP и выдерживали при температуре 950 °C в течение 4 ч.

После извлечения из печи и остывания на воздухе остатки насыщающей среды на образцах удаляли путем замачивания в горячей воде на 15 мин с последующей промывкой. Шлифовку образцов осуществляли на автоматическом шлифовально-полировальном станке DIGIPREP с использованием набора дисков шлифовальной бумаги зернистостью 320, 600, 1000 и 1500 grid. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости использовали воду. Полировку осуществляли на специализированных полировальных кругах с периодической подачей алмазной суспензии зернистостью 9, 6, 3 и 1 мкм. Для травления поверхности шлифов (в течение 3 – 5 с) использовали 6 %-ый раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Микроструктуру диффузионного слоя изучали с помощью оптического микро-

скопа Carl Zeiss Axio Observer и сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA.

Для проведения экспериментов по высокотемпературному окислению образцы после химико-термической обработки и удаления остатков насыщающей обмазки помещали в печь и выдерживали при температуре 800 °C в течение 6 ч. Для определения трибологических свойств образцов использовали машину для испытания на трение и износ UMT-3. Нагрузка составляла 10 Н, частота трения – 5 Гц, амплитуда – 5 мм. В качестве контртела использовали керамические шарики из нитрида кремния Si_3N_4 диаметром 6 мм. Испытания проводили при комнатной температуре в течение 1200 с.

Результаты и обсуждение

Микроструктура стали 4X5MF1C после борирования и диффузионного насыщения бор-хром-лантаном показана на рис. 1.

Существует значительная разница в толщине однокомпонентного и трехкомпонентного боридных слоев: при добавлении хрома и лантана в борировующий состав толщина боридного слоя увеличилась с 32,8 до 61,5 мкм. Это объясняется тем, что лантан относится к f -элементам и, соответственно, обладает высокой электроотрицательностью, химической и диффузионной активностью [17; 18]. Атомный радиус лантана примерно на 40 % больше, чем у атомов железа, что приводит к искажению кристаллической решетки окружающих атомов железа и увеличению плотности дефектов. Повышение плотности дефектов кристаллического строения на поверхности, в свою очередь, способствует повышению адсорбции и скорости диффузии насыщающих атомов, тем самым ускоряя процесс химико-термической обработки [19].

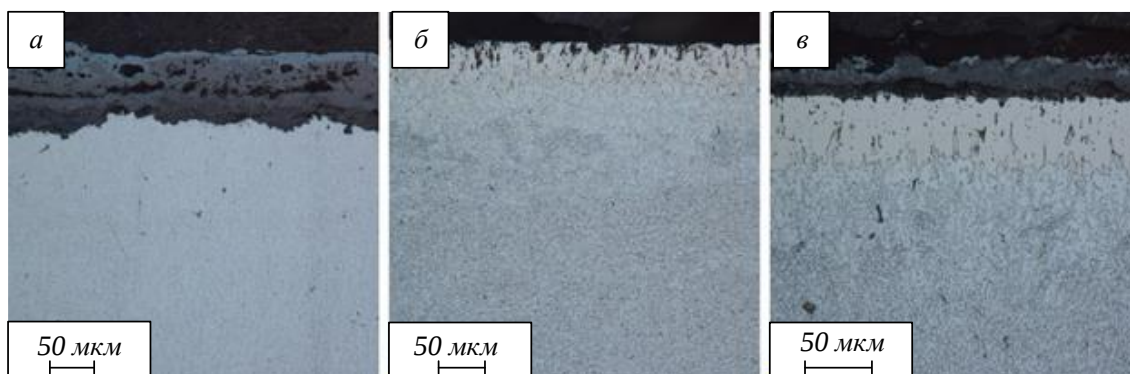


Рис. 2. Морфология поперечного сечения стали марки 4X5MΦ1C (а) и борированных образцов после окисления при 800 °С в течение 6 ч:

б – однокомпонентное борирование; в – комплексное борирование с лантаном и хромом

Fig. 2. Morphology of the cross-section of steel grade 4Kh5MF1S (a) and borated samples after oxidation at 800 °C for 6 hours:

б – single-component boration; в – complex boration with lanthanum and chromium

Диффузионные боридные слои без добавления хрома и лантана имеют больше пор и микротрещин, это снижает общие эксплуатационные характеристики диффузионного слоя. Введение лантана и хрома позволяет улучшить структуру боридного слоя, повысить его плотность и однородность [20 – 22].

На рис. 2 показана морфология поперечного сечения боридных слоев на стали 4X5MΦ1C после высокотемпературного окисления при 800 °С в течение 6 ч.

На образцах стали марки 4X5MΦ1C без борирования толщина окисленного слоя составляет 68 мкм (рис. 2, а). Толщина окисленного слоя на образце с однокомпонентным боридным слоем составляет порядка 25 мкм, при этом в самом боридном слое имеются следы оксидов практически на всей протяженности диффузионного слоя (рис. 2, б). При комплексном трехкомпонентном насыщении стали 4X5MΦ1C толщина окисленного слоя значительно меньше по сравнению с неборированным образцом и составила около 22 мкм. При этом граница окисленного слоя четко очерчена, оксидных включений в диффузионном слое не наблюдается (рис. 2, в).

С точки зрения морфологии оксидный слой на неборированной стали марки 4X5MΦ1C делится на две части и существует вероятность его скалывания. Борированные образцы, в том числе с добавлением хрома и лантана, показали более плотную и гладкую структуру оксидного слоя, при этом на однокомпонентных борированных образцах обнаружены продольные трещины и поры, заполненные оксидами. Такие дефекты становятся каналами диффузии атомов кислорода в глубь материала, чем ускоряют процесс окисления и снижают стойкость.

Хром и лантан способствуют образованию плотной оксидной пленки, содержащей оксиды

типа $(Cr, La)_2O_3$, которые повышают стойкость поверхности при высокотемпературном окислении. Синергия этого многослойного композитного покрытия значительно повышает стойкость стали марки 4X5MΦ1C к окислению при высоких температурах [9].

Трибологические исследования показали, что степень износа борированных образцов и образцов с бор-хром-лантаном составила соответственно $3,79 \cdot 10^{-5}$ и $1,46 \cdot 10^{-5}$ $мм^3 \cdot Н^{-1} \cdot м^{-1}$. Это свидетельствует о том, что добавление хрома и лантана значительно (в 2,6 раза) повышает износостойкость стали марки 4X5MΦ1C.

Как показано на рис. 3, имеются существенные различия в морфологии поверхности трения и износа между борированными образцами и образцами с бор-хром-лантаном. На поверхности износа борированного образца обнаружены глубокие царапины и сколы диффузионного слоя. Царапины образуются из-за скольжения твердых или острых частиц по поверхности образца во время трения, вызывая пластическую деформацию. Поверхность износа диффузионного слоя образцов с бор-хром-лантаном относительно плоская, царапины неглубокие, а сколов практически не обнаруживается. Это связано с тем, что добавление хрома и лантана улучшает структуру боридного слоя, повышает его твердость и пластичность. В свою очередь, уменьшается пластическая деформация поверхности трения, предотвращая сколы и образование микротрещин. Кроме того, хром и лантан при трении могут образовывать плотную оксидную пленку $(Cr, La)_2O_3$, которая обладает высокой износостойкостью и может эффективно снижать скорость износа, при этом предотвращая дальнейшее окисление материала в условиях высокоскоростного трения [21].

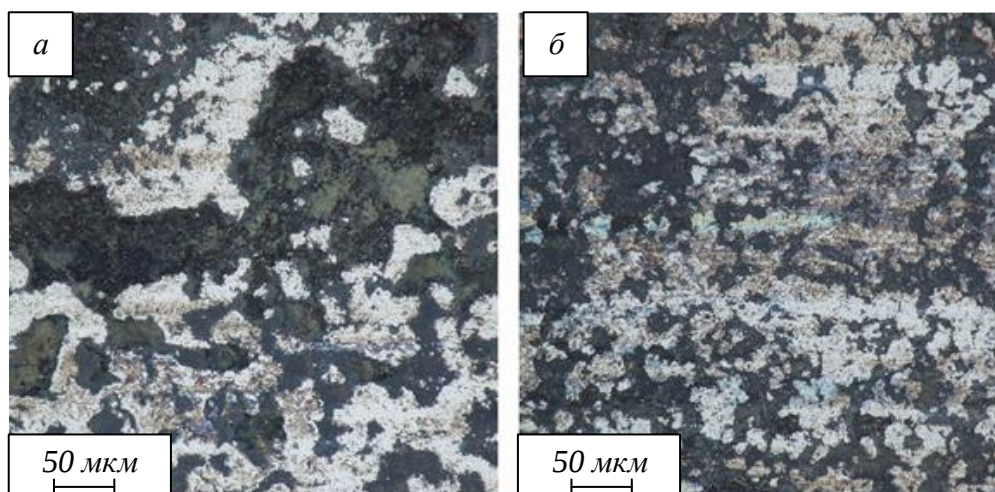


Рис. 3. Изношенная поверхность различных образцов после борирования (а) и после борирования с лантаном и хромом (б)
Fig. 3. The worn surface of various samples after boration (a) and after boration with lanthanum and chromium (b)

Выводы

В результате комплексного диффузионного насыщения стали марки 4Х5МФ1С одновременно бором, хромом и лантаном толщина диффузионного слоя увеличилась в 2,2 раза по сравнению с однокомпонентным борированием. При этом диффузионный слой становится более плотным и однородным. В эксперименте по окислению при температуре 800 °С в течение 6 ч толщина окисленного слоя для неборированной стали марки 4Х5МФ1С составила 68 мкм. При комплексном трехкомпонентном насыщении бором, хромом и лантаном этой же стали толщина окисленного слоя составила 22 мкм, слой более плотный и имеет гладкую границу. Наличие хрома и лантана в боридном слое приводит к формированию оксидной пленки $(\text{Cr}, \text{La})_2\text{O}_3$, которая повышает стойкость к окислению. Эксперименты по определению износостойкости и последующие анализы поверхности износа показали, что поверхность износа образца после комплексного трехкомпонентного насыщения плоская, с неглубокими царапинами, сколы практически отсутствуют по сравнению с образцами, подвергнутыми однокомпонентному борированию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang Z., Zhou M., Jiang Y., Liu Z. Effects of in situ NbC on the microstructure and high-temperature friction wear properties of 4Cr5MoSiV1 steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023; 24: 6159–6173. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.221>
2. Ying J., Bai-Xin D., Jun F., Feng Qiu, Hong-Yu Y., Shi-Li S., Fang C., Qi-Chuan J., Lai-Chang Z. Advance on rock-breaking cutter steels: A review of characteristics, failure modes, molding processes and strengthening technology. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024; 31: 2328–2354. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.195>
3. Геворгян Г.А., Филиппов А.А., Катаев Н.Н., Пачурин Г.В. Термическая обработка стали для оправки повышенной стойкости. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2022;2-1(65):70–73. EDN: JCNLJX. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-2-1-70-73>
4. Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Чжен Ц., Мосоров В.И. Влияние содержания алюминия в обмазке на формирование диффузионного слоя при борировании стали Н13. *Ползуновский альманах*. 2021;3:51–54. EDN: WBJGYT
5. Mishigdorzhiiyn U.L., Dyshenov B.A., Semenov A.P., Ulakhanov N.S., Markhadayev B.E. Prediction of the Thickness of a Boroaluminized Layer Using an Artificial Neural Network. *J. Surf. Investig.* 2024;18,466–473. <https://doi.org/10.1134/S1027451024020344>
6. Feng Z., Duan Y., Cao Y. Qi H., Peng M., Wang X. Corrosion properties of ceramic coating on pure titanium by pack boronizing with Nd₂O₃. *Ceramics International*. 2023;49(10):15101–15113. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.093>
7. Kayali Y., Kenar A. Effect of diffusion annealing on wear and cohesion behaviours of boronized AISI 1040 steel. *Tribology International*. 2023;184:108428. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108428>
8. Yang R., Guo X., Yang H., Qiao J. Tribological behavior of boronized Fe₄₀Mn₂₀Cr₂₀Ni₂₀ high-entropy alloys in high temperature. *Surface and Coatings Technology*. 2023;464:129572. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129572>

9. Türkmen İ., Keddām M. Boronizing of Monel K500 alloy: Microstructural characterization and modeling of boron diffusion. *Materials Characterization*. 2024;464:113995. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113995>
10. Zheng Q., Mei S., Xiao Z., Hu Z., Chen Z., Xu Q., Guryev A., Lygdenov B. Tribological, oxidation and corrosion properties of ceramic coating on AISI H13 steel by rare earth-Cr composite boronizing. *Ceramics International*. 2024;50(6):8760–8776. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.12.193>
11. Ortiz-Domínguez M., Keddām M. Solid Boronizing of AISI 420 Steel: Characterizations and Kinetics Modelling. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2023;59(2):206–219. <https://doi.org/10.1134/S2070205123700338>
12. Emamverdian A.A., Sun Y., Cao C., Pruncu C., Wang Y. Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies)-a review. *Engineering Failure Analysis*. 2021;129:105678. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105678>
13. Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Дев В.Б., Логинова М.В. Влияние состава борсодержащей активной среды в виде обмазки на структуру и свойства диффузионного слоя деталей из титана. *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2022;28(1):60–66. EDN: ADPEHL. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2022-1-60-66>
14. Song T., Liu Q., Liu S., Yang T., Li Q., Xia C., Zhang X. Wear and corrosion resistance behavior of Zr-2.5 Nb by pack carburizing and boronizing. *Surface and Coatings Technology*. 2024;482:130720. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130720>
15. Zhang J., Yuan H., Zheng X., Tu Y., Ran X., Wang W., Wang Q., Lin Y. Preparation and wear resistance of B–Al co-permeation layers on TC4 titanium alloy surface. *Materials Today Communications*. 2024;39:108697. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108697>
16. Qu De-yi, Liu D., Wang Xin-yu, Duan Yong-hua, Peng Ming-jun. Corrosion and wear properties of TB2 titanium alloy borided by pack boriding with La_2O_3 . *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022;32(3):868–881. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)65839-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)65839-4)
17. Günen A., Bölükbaşı Ö.S., Özgürlük Y., Özkan D., Odabaşı O., Somunkıran İ. Effect of Cr addition on properties and tribological behavior at elevated temperature of boride layers grown on borosintered powder metallurgy alloys. *Metals and Materials International*. 2023;29(3):748–766. <https://doi.org/10.1007/s12540-022-01251-3>
18. Gao J., Yan Z., Liu S., Zhao Y., Li T., Tong W. Microstructure and mechanical properties of a Mo alloyed Fe–Cr–B alloy. *Vacuum*. 2023;214:112238. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112238>
19. Fang Hui-min, Xia Lian-sen, Yu Qing-ping, Zhang Guang-sheng. Research on properties and growth kinetics of boride layer of Fe-based powder metallurgy material boriding strengthened with rare earth. *Integrated Ferroelectrics*. 2022;226(1):1–14. <https://doi.org/10.1080/10584587.2022.2061188>
20. Feng Z., Duan Y., Ma L., Zheng S., Li M., Peng M., He Y., Li Y. Microstructure and oxidation behavior of B–Al layers on Ti-6Al-4V alloy by REO-boriding and aluminizing at 700 °C, 800 °C, and 900 °C. *Surface and Coatings Technology*. 2024;226(1):131044. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131044>
21. Kaner S., Kaplan Y., Pamuk Ö., Aksöz S. Production and tribological investigation of Cr borides by boriding of powder metallurgy pure chromium surface. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023;32(3):1017–1024. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07195-4>

REFERENCES

1. Wang Z., Zhou M., Jiang Y., Liu Z. Effects of in situ NbC on the microstructure and high-temperature friction wear properties of 4Cr5MoSiV1 steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023; 24: 6159–6173. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.221>
2. Ying J., Bai-Xin D., Jun F., Feng Qiu, Hong-Yu Y., Shi-Li S., Fang C., Qi-Chuan J., Lai-Chang Z. Advance on rock-breaking cutter steels: A review of characteristics, failure modes, molding processes and strengthening technology. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024; 31: 2328–2354. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.195>
3. Gevorkyan G.A., Filippov A.A., Kataev N.N., Pachurin G.V. Heat treatment of steel for a mandrel of increased durability. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2022;2-1(65):70–73. (In Russ.). EDN: JCNLJX. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2022-2-1-70-73>
4. Lygdenov B.D., Guryev A.M., Zheng Ts., Mosorov V.I. Influence of the aluminum content in the coating on the formation of a diffusion layer during boration of steel H13. *Polzunovsky almanac*. 2021;3:51–54. (In Russ.). EDN: WBJGYT
5. Mishigdorzhyn U.L., Dyshenov B.A., Semenov A.P., Ulakhanov N.S., Markhadayev

- B.E. Prediction of the Thickness of a Boroaluminized Layer Using an Artificial Neural Network. *J. Surf. Investig.* 2024;18,466–473. <https://doi.org/10.1134/S1027451024020344>
6. Feng Z., Duan Y., Cao Y., Qi H., Peng M., Wang X. Corrosion properties of ceramic coating on pure titanium by pack boronizing with Nd₂O₃. *Ceramics International*. 2023;49(10):15101–15113. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.093>
 7. Kayali Y., Kenar A. Effect of diffusion annealing on wear and cohesion behaviours of boronized AISI 1040 steel. *Tribology International*. 2023;184:108428. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108428>
 8. Yang R., Guo X., Yang H., Qiao J. Tribological behavior of boronized Fe₄₀Mn₂₀Cr₂₀Ni₂₀ high-entropy alloys in high temperature. *Surface and Coatings Technology*. 2023;464:129572. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129572>
 9. Türkmen İ., Keddām M. Boronizing of Monel K500 alloy: Microstructural characterization and modeling of boron diffusion. *Materials Characterization*. 2024;464:113995. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113995>
 10. Zheng Q., Mei S., Xiao Z., Hu Z., Chen Z., Xu Q., Guryev A., Lygdenov B. Tribological, oxidation and corrosion properties of ceramic coating on AISI H13 steel by rare earth-Cr composite boronizing. *Ceramics International*. 2024;50(6):8760–8776. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.12.193>
 11. Ortiz-Domínguez M., Keddām M. Solid Boronizing of AISI 420 Steel: Characterizations and Kinetics Modelling. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2023;59(2):206–219. <https://doi.org/10.1134/S2070205123700338>
 12. Emamveridian A.A., Sun Y., Cao C., Pruncu C., Wang Y. Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies)-a review. *Engineering Failure Analysis*. 2021;129:105678. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105678>
 13. Guryev A.M., Ivanov S.G., Guryev M.A., Deev V.B., Loginova M.V. Influence of the composition of a boron-containing active medium in the form of a coating on the structure and properties of the diffusion layer of titanium parts. *News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy*. 2022;28(1):60–66. (In Russ.). EDN: ADPEHL. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2022-1-60-66>
 14. Song T., Liu Q., Liu S., Yang T., Li Q., Xia C., Zhang X. Wear and corrosion resistance behavior of Zr-2.5 Nb by pack carburizing and boronizing. *Surface and Coatings Technology*. 2024;482:130720. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130720>
 15. Zhang J., Yuan H., Zheng X., Tu Y., Ran X., Wang W., Wang Q., Lin Y. Preparation and wear resistance of B–Al co-permeation layers on TC4 titanium alloy surface. *Materials Today Communications*. 2024;39:108697. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108697>
 16. Qu De-yi, Liu D., Wang Xin-yu, Duan Yong-hua, Peng Ming-jun. Corrosion and wear properties of TB2 titanium alloy borided by pack boriding with La₂O₃. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022;32(3):868–881. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)65839-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)65839-4)
 17. Günen A., Bölükbaşı Ö.S., Özgürlük Y., Özkan D., Odabaş O., Somunkıran İ. Effect of Cr addition on properties and tribological behavior at elevated temperature of boride layers grown on borosintered powder metallurgy alloys. *Metals and Materials International*. 2023;29(3):748–766. <https://doi.org/10.1007/s12540-022-01251-3>
 18. Gao J., Yan Z., Liu S., Zhao Y., Li T., Tong W. Microstructure and mechanical properties of a Mo alloyed Fe–Cr–B alloy. *Vacuum*. 2023;214:112238. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112238>
 19. Fang Hui-min, Xia Lian-sen, Yu Qing-ping, Zhang Guang-sheng. Research on properties and growth kinetics of boride layer of Fe-based powder metallurgy material boriding strengthened with rare earth. *Integrated Ferroelectrics*. 2022;226(1):1–14. <https://doi.org/10.1080/10584587.2022.2061188>
 20. Feng Z., Duan Y., Ma L., Zheng S., Li M., Peng M., He Y., Li Y. Microstructure and oxidation behavior of B–Al layers on Ti-6Al-4V alloy by REO-boriding and aluminizing at 700 °C, 800 °C, and 900 °C. *Surface and Coatings Technology*. 2024;226(1):131044. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131044>
 21. Kaner S., Kaplan Y., Pamuk Ö., Aksöz S. Production and tribological investigation of Cr borides by boriding of powder metallurgy pure chromium surface. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023;32(3):1017–1024. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07195-4>

Сведения об авторах

Цюань Чжэн, аспирант, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Уханьский текстильный университет

E-mail: 361870277@qq.com

ORCID: 0000-0002-4596-1302

Михаил Алексеевич Гурьев, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Алтайский государственный технический уни-

верситет им. И.И. Ползунова; *профессор*, Уханьский текстильный университет; *Технический директор*, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd.

E-mail: gurievma@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9191-1787

SPIN-код: 6084-1112

Сергей Геннадьевич Иванов, д.т.н., заведующий ЛМИ ИЦ «ХимБиоМаши», ведущий научный сотрудник НУ, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; *профессор*, Уханьский текстильный университет

E-mail: serg225582@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5965-0249

SPIN-код: 1249-4949

Шунчи Мэй, д.т.н., профессор, директор ключевой лаборатории цифрового текстильного оборудования провинции Хубэй, Уханьский текстильный университет

E-mail: 1533876320@qq.com

ORCID: 0000-0002-9466-2931

SPIN-код: 7350-7179

Алексей Михайлович Гурьев, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой начертательной геометрии и графики, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; *профессор*, Уханьский текстильный университет

E-mail: gurievam@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7570-8877

SPIN-код: 1134-0006

Information about the authors:

Q. Zheng, Postgraduate student, Wuhan Textile University, Polzunov Altai State Technical University

E-mail: 361870277@qq.com

ORCID: 0000-0002-4596-1302

Mikhail A. Guryev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University (Alt-

STU); *Professor*, Wuhan Textile University; *Technical Director*, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd.

E-mail: gurievma@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9191-1787

SPIN-код: 6084-1112

Sergei G. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Head of LMI IC "ChemBioMash", Leading Researcher at SD, I.I. Polzunov Altai State Technical University; *Professor*, Wuhan Textile University

E-mail: serg225582@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5965-0249

SPIN-код: 1249-4949

S. Mei, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan Textile University

E-mail: 1533876320@qq.com

ORCID: 0000-0002-9466-2931

SPIN-код: 7350-7179

Alexey M. Guryev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. Head of department, I.I. Polzunov Altai State Technical University; *Professor*, Wuhan Textile University

E-mail: gurievam@mail.ru

ORCID: 0000-0002-7570-8877

SPIN-код: 1134-0006

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

Поступила в редакцию 20.08.2024

После доработки 30.08.2024

Принята к публикации 04.09.2024

Received 20.08.2024

Revised 30.08.2024

Accepted 04.09.2024

Оригинальная статья

УДК 66.094.55

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-30-36

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В СТАЛИ НА ПАРАМЕТРЫ ДИФФУЗИИ БОРА И ТОЛЩИНУ ДИФФУЗИОННОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ БОРИРОВАНИИ

© 2024 г. М. А. Гурьев^{1, 2, 3}, С. Г. Иванов^{1, 2}, Ц. Чжэн^{1, 2}, А. М. Гурьев^{1, 2}

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

²Уханьский текстильный университет (Китай, 430200, провинция Хубэй, Ухань, ул. ФангЖи, 1)

³Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd. (Китай, 312000, провинция Чжэцзян, Шаосин, уезд Синьчан)

Аннотация. В настоящей работе приведены систематизированные данные о влиянии содержания углерода в стали на параметры диффузии и толщину боридного слоя для большинства используемых в промышленности углеродистых сталей, начиная с углеродистой стали 15 и заканчивая заэвтектическими инструментальными сталями вплоть до У10 включительно. Насыщение поверхности сталей бором проведено при температурах 850, 950 и 1050 °С ранее разработанной и запатентованной насыщающей средой. Повышение содержания углерода в стали приводит к повышению энергии активации диффузии бора, что, в свою очередь, влечет снижение толщины диффузионного слоя. При этом снижение энергии активации носит не монотонный характер и зависит как от содержания углерода в стали, так и от температуры процесса насыщения. Повышение температуры процесса насыщения приводит к понижению энергии активации диффузии бора в среднем на 5 кДж/моль на каждые 100 °С. Повышение содержания углерода приводит к снижению толщины боридного слоя, причем в наибольшей степени это заметно при промышленно применяемых температурных интервалах борирования – от 950 до 1050 °С. Наиболее значительное снижение толщины боридного слоя происходит при содержании углерода в интервале от 0,35 до 0,50 масс. %. В интервалах содержания углерода в стали от 0,15 до 0,35 и от 0,50 до 0,95 масс. % характер снижения толщины боридного слоя можно считать линейным.

Ключевые слова: сталь, борирование, энергия активации, диффузия, углерод, бор, коэффициент диффузии, химико-термическая обработка

Для цитирования: Гурьев М.А., Иванов С.Г., Чжэн Ц., Гурьев А.М. Влияние содержания углерода в стали на параметры диффузии бора и толщину диффузионного покрытия при борировании. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):30–36. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-30-36](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-30-36)

Original article

THE EFFECT OF THE CARBON CONTENT IN STEEL ON PARAMETERS OF BORON DIFFUSION AND THICKNESS OF DIFFUSION COATING DURING BORATION

© 2024 M. A. Guryev^{1, 2, 3}, S. G. Ivanov^{1, 2}, Q. Zheng^{1, 2}, A. M. Guryev^{1, 2}

¹Polzunov Altai State Technical University (46 Lenin Ave., Barnaul, Altai Territory, 656038, Russia Federation)

²Wuhan Textile University (1 Fangzhi Str., Hubei, Wuhan, 430200, China)

³Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd. (Xinchang, Shaoxing, Zhejiang, 312000, China)

Abstract. This paper presents systematized data on the effect of carbon content in steel on the diffusion parameters and thickness of the boride layer for most carbon steels used in industry, starting with carbon steel 15 and ending with hypereutectic tool

steels up to and including U10. Saturation of the steel surface with boron was carried out at temperatures of 850, 950 and 1050 °C using a previously developed and patented saturating medium. An increase in the carbon content in steel leads to an increase in the activation energy of boron diffusion, which in turn leads to a decrease in the thickness of the diffusion layer. At the same time, the decrease in the activation energy is not monotonous and depends on both the carbon content in steel and the temperature of the saturation process. An increase in the temperature of the saturation process leads to a decrease in the activation energy of boron diffusion - on average by 5 kJ/mol for every 100 °C. An increase in the carbon content leads to a decrease in the thickness of the boride layer, and this is most noticeable in the industrially used temperature ranges of boriding - from 950 to 1050 °C. The most significant decrease in the thickness of the boride layer occurs with an increase in the carbon content in the range from 0.35 to 0.50 wt. %. In the ranges of carbon content in steel from 0.15 to 0.35 and from 0.5 to 0.95 wt. %, the nature of the decrease in the thickness of the boride layer can be considered linear.

Keywords: steel, boriding, activation energy, diffusion, carbon, boron, diffusion coefficient, chemical-thermal treatment

For citation: Guryev M.A., Ivanov S.G., Zheng Q., Guryev A.M. Influence of carbon content in steel on boron diffusion parameters and diffusion coating thickness during borizing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):30–36. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)30-36](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)30-36)

Введение

При работе большая часть инструмента, рабочих органов и деталей машин подвергается воздействию повышенных температур, что сопряжено с трением, термической и химической коррозией, и, в свою очередь, приводит к износу, окислению, трещинам и деформации. В итоге наблюдается деградация геометрических параметров работающей детали и выход из строя как детали, так и механизма в целом. Поиск способов повышения эксплуатационных свойств инструмента, рабочих органов и деталей машин и продления срока их службы представляет собой значительный вызов [1 – 3].

Для улучшения производительности и продления срока службы широко применяются методы объемного и поверхностного упрочнения: объемная и поверхностная закалка (в том числе на вторичную твердость), нанесение покрытий методами термического, лазерного и плазменного напыления и т.д. Вышеуказанные методы поверхностной обработки могут повысить твердость и устойчивость к износу инструмента, рабочих органов и деталей машин, однако все они имеют некоторые ограничения, включая плохое сцепление покрытия с основой, сложность управления параметрами процесса и часто – невозможность поверхностного упрочнения сложнопрофильных деталей (в том числе внутренних полостей в таких деталях) в целом. Химико-термическая обработка поверхности является альтернативой методам поверхностного упрочнения напылением и наплавкой [4 – 6]. При этом одним из перспективных и актуальных методов поверхностного упрочнения является борирование. Однако на настоящий момент в литературе имеются лишь точечные данные о применении борирования к некоторым конкретным сталям [7 – 9]. Ведутся попытки систематизировать накопленные данные и вывести определенные зависимости влияния химического

состава насыщаемой стали на механические и эксплуатационные свойства боридных покрытий на них. При использовании таких данных можно с определенной степенью точности прогнозировать результат, получаемый на различных сталях.

Методы исследования

В настоящей работе предприняты попытки систематизировать данные о влиянии содержания углерода в стали на параметры диффузии и толщину боридного слоя для большинства используемых в промышленности углеродистых сталей (табл. 1), начиная с углеродистой стали 15 и заканчивая заэвтектоидными инструментальными сталями вплоть до У10 включительно. Все использованные в работе образцы сталей были подобраны таким образом, чтобы они имели сопоставимый химический состав по другим легирующим элементам (кремний, марганец, сера, фосфор, хром, никель, медь и т.д.). Подбор соответствующих плавок сталей стал возможен благодаря более чем десятилетнему сотрудничеству с предприятиями на базе Центра коллективного пользования и Инжинирингового Центра «ХимБиоМаш» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (АлтГТУ), в результате которого удалось найти и отобрать соответствующие образцы промышленно произведенных сталей с требуемым химическим составом.

Насыщение поверхности сталей бором проводили в камерной печи типа СНОЛ, оснащенной ПИД-регулятором «Термодат 16Е3» при температурах 850, 950 и 1050 °C разработанным и запатентованным составом [10], выдержку при данных температурах осуществляли в течение 2 ч. После окончания выдержки контейнеры с упакованными образцами извлекали из печи и охлаждали на спокойном воздухе до комнатной температуры, после чего осуществляли выбивку образцов. Использо-

Химический состав сталей
Table 1. Chemical composition of steels

Образец	Марка (примерная)	Содержание основных легирующих элементов, масс. %*				
		C	Si	Mn	S	P
1	Сталь 15	0,149	0,179	0,585	0,012	0,012
2	Сталь 20	0,215	0,176	0,575	0,012	0,013
3	Сталь 35	0,365	0,183	0,574	0,012	0,010
4	Сталь 45	0,436	0,184	0,586	0,014	0,013
5	Сталь 45	0,481	0,189	0,578	0,012	0,012
6	Сталь 50	0,503	0,186	0,578	0,013	0,013
7	Сталь 60	0,592	0,187	0,592	0,012	0,012
8	У7А	0,712	0,189	0,245	0,012	0,012
9	У8А	0,803	0,187	0,247	0,011	0,012
10	У9А	0,898	0,183	0,249	0,013	0,011
11	У10А	0,966	0,192	0,245	0,010	0,013

*Содержания меди и никеля находились в пределах 0,03 – 0,04 масс. %.

ли образцы КСУ тип 1 по ГОСТ 9454 – 78. Количество одинаковых образцов для каждой экспериментальной точки – 3 шт. После извлечения из контейнера образцы промывали в теплом мыльном растворе и высушивали в этиловом спирте.

Борирование – это процесс реакционной диффузии, который можно разделить на два этапа. Первый этап – образование активных атомов бора в насыщающей среде, их диффузия к насыщаемой поверхности и адсорбция на ней. Этот этап занимает относительно небольшую долю времени процесса борирования. Второй этап – это процесс диффузии активных атомов бора или их групп из поверхностных слоев материала в его объем. Повышение температуры позволяет ускорить процесс генерации активных атомов бора насыщающей средой и одновременно снизить энергию активации диффузии активных атомов. Это ускоряет диффузию бора и увеличивает толщину борированного слоя [11 – 13].

Согласно уравнению Аррениуса, связь между временем борирования, толщиной борированного слоя и коэффициентом роста выражается следующим уравнением [14 – 16]:

$$h^2 = 2D\tau, \quad (1)$$

где h – толщина борированного слоя, мкм; D – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – время борирования, с.

Из уравнения Аррениуса с учетом коэффициента диффузии D , абсолютной температуры T , К, активационной энергии диффузии Q , Дж/моль, газовой постоянной $R = 8,314$ Дж/(моль·К), и константы диффузии D_0 , $\text{м}^2/\text{с}$, можно получить следующее уравнение:

$$\ln D = \ln D_0 - Q/RT. \quad (2)$$

Результаты и обсуждение

Из уравнений (1) и (2) можно получить значения коэффициента диффузии при различных температурах насыщения и содержаниях углерода (табл. 2) (индекс при D обозначает абсолютную температуру: $D_{1123} = 850$ °С; $D_{1223} = 950$ °С; $D_{1323} = 1050$ °С).

Как видно из таблицы, по мере возрастания концентрации углерода в сталях коэффициент диффузии бора в них уменьшается, что объяснимо тем, что в процессе диффузии бор вынужден вытеснять углерод из поверхности насыщаемого материала вглубь. Это, в свою очередь, приводит к возрастанию энергетических затрат на процесс диффузии бора в кристаллической решетке железа и, как следствие, – к росту энергии активации диффузии бора, что сопровождается замедлением процесса диффузии и снижением толщины слоя боридов. Данный факт подтверждается многими авторами [17 – 19], при этом отмечается, что помимо снижения толщины слоя боридов имеются также и положительные аспекты: слой становится более плотным и компактным в силу того, что по мере повышения содержания углерода и легирующих элементов в стали формируются боридные иглы одинаковой длины. Кроме того, повышение содержания легирующих элементов, в том числе и углерода в стали, как отмечается в работах [20; 21], приводит к повышению механических характеристик боридного покрытия, прежде всего – его твердости.

Коэффициенты диффузии бора при различных содержаниях углерода в стали
Table 2. Diffusion coefficients of boron at different carbon contents in steel

Содержание углерода в стали, масс. %	Коэффициент диффузии, м ² /с		
	D_{1123}	D_{1223}	D_{1323}
0,149	$5,88 \cdot 10^{-11}$	$2,69 \cdot 10^{-10}$	$9,08 \cdot 10^{-10}$
0,215	$5,26 \cdot 10^{-11}$	$2,29 \cdot 10^{-10}$	$7,75 \cdot 10^{-10}$
0,365	$5,00 \cdot 10^{-11}$	$1,83 \cdot 10^{-10}$	$5,40 \cdot 10^{-10}$
0,436	$4,33 \cdot 10^{-11}$	$1,45 \cdot 10^{-10}$	$4,27 \cdot 10^{-10}$
0,481	$4,08 \cdot 10^{-11}$	$1,40 \cdot 10^{-10}$	$4,00 \cdot 10^{-10}$
0,503	$3,63 \cdot 10^{-11}$	$1,12 \cdot 10^{-10}$	$3,03 \cdot 10^{-10}$
0,592	$3,43 \cdot 10^{-11}$	$8,38 \cdot 10^{-11}$	$2,64 \cdot 10^{-10}$
0,712	$3,34 \cdot 10^{-11}$	$6,08 \cdot 10^{-11}$	$2,45 \cdot 10^{-10}$
0,803	$3,35 \cdot 10^{-11}$	$6,62 \cdot 10^{-11}$	$2,37 \cdot 10^{-10}$
0,898	$3,53 \cdot 10^{-11}$	$7,02 \cdot 10^{-11}$	$1,98 \cdot 10^{-10}$
0,966	$3,72 \cdot 10^{-11}$	$7,25 \cdot 10^{-11}$	$2,00 \cdot 10^{-10}$

Как видно из рис. 1, повышение содержания углерода в стали приводит к росту энергии активации диффузии бора, что, в свою очередь, влечет снижение толщины диффузионного слоя. При этом снижение энергии активации носит не монотонный характер и зависит как от содержания углерода в стали, так и от температуры процесса насыщения. Например, при температуре насыщения 850 °С, считающейся минимально возможной температурой для процесса борирования [7; 16], энергия активации диффузии бора изменяется с 116 кДж/моль при содержании углерода в стали порядка 0,15 масс. % до 121 кДж/моль при содер-

жании углерода в стали порядка 0,75 масс. %. Начиная с содержания углерода в стали на уровне 0,8 масс. % наблюдается тренд на снижение энергии активации. Похожие тренды наблюдаются и при других температурах насыщения бором, при этом кривые изменения энергии активации имеют несколько перегибов, в частности, в интервале содержаний углерода в стали с 0,35 до 0,50 масс. % и с 0,7 до 0,8 масс. %. Повышение температуры процесса насыщения приводит к понижению энергии активации диффузии бора в среднем на 5 кДж/моль на каждые 100 °С.

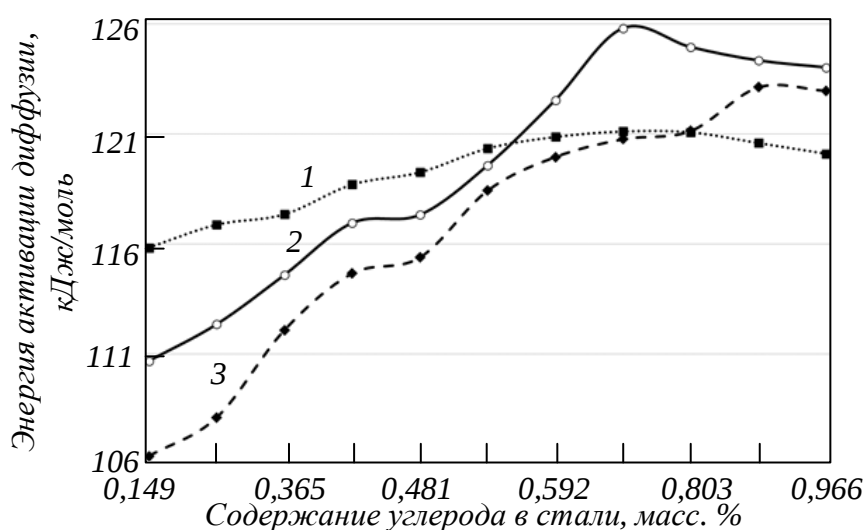


Рис. 1. Влияние содержания углерода в стали на энергию активации диффузии бора при температурах борирования 850, 950 и 1050 °С (1 – 3)

Fig. 1. Effect of carbon content in steel on the activation energy of boron diffusion at boriding temperatures 850, 950 and 1050 °С (1 – 3)

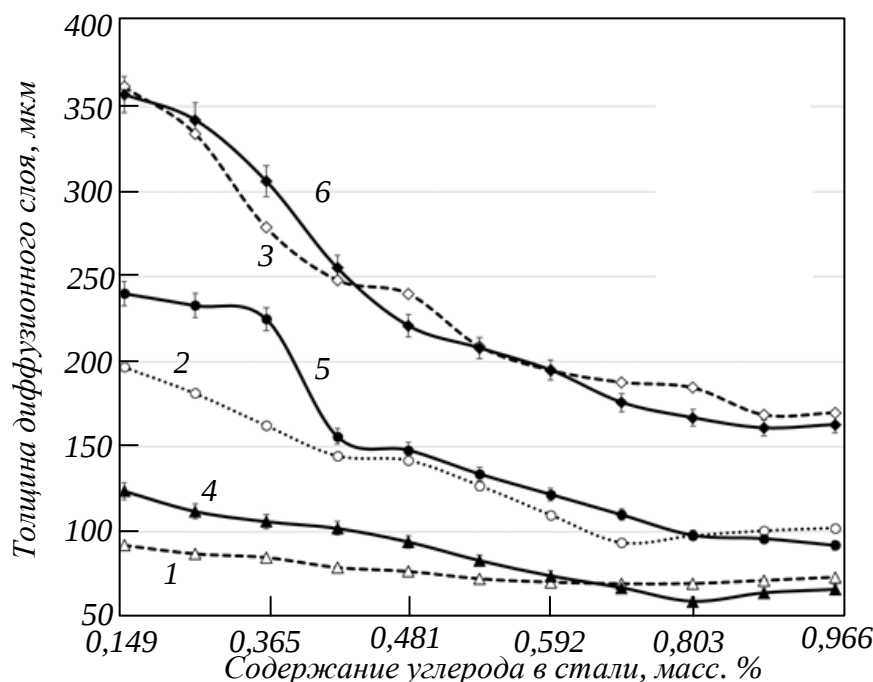


Рис. 2. Влияние содержания углерода в стали на толщину слоя боридов при температурах борирования 850 °С (1, 4), 950 °С (2, 5) и 1050 °С (3, 6):

1 – 3 – расчет; 4 – 6 – эксперимент

Fig. 2. Effect of carbon content in steel on the thickness of the boride layer at boriding temperatures 850 °C (1, 4), 950 °C (2, 5) and 1050 °C (3, 6):

1 – 3 – calculation; 4 – 6 – experiment

На рис. 2 приведены расчетные (1 – 3) и экспериментально определенные (4 – 6) толщины диффузионного слоя при температурах процесса насыщения 850, 950 и 1050 °С. Расчет толщины слоя боридов проводился согласно выражениям (1) и (2). Экспериментальное определение толщины слоя боридов осуществляли на поперечных микрошлифах соответствующих образцов стали после процесса насыщения при помощи программного пакета «ThixoMet PRO» и оптического микроскопа «Carl Zeiss Axio Observer Z1m». За соответствующее значение толщины слоя боридов брали среднее арифметическое 200 измерений толщины слоя на дистанции 1 мм.

Выводы

Анализ графиков распределения толщины слоя боридов в зависимости от содержания в стали углерода позволяет сделать вывод о том, что повышение содержания углерода однозначно приводит к снижению толщины боридного слоя. В наибольшей степени это заметно при промышленно применяемых температурных интервалах борирования – от 950 до 1050 °С. Наиболее значительное снижение толщины боридного слоя происходит при повышении содержания углерода в интервале от 0,35 до 0,50 масс. %. В интервалах содержания углерода в стали от 0,15 до 0,35 и от 0,50 до 0,95 масс. % характер снижения толщины боридного слоя можно считать практически линейным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Emamverdian A.A., Sun Y., Cao C., Pruncu C., Wang Y. Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies)-a review. *Engineering Failure Analysis*. 2021;129(18): 105678. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105678>
- Widomski P., Gronostajski Z. Comprehensive review of methods for increasing the durability of hot forging tools. *Procedia Manufacturing*. 2020;47:349–355. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.280>
- Ghalehbandi S.M., Biglari F. Predicting damage and failure under thermomechanical fatigue in hot forging tools. *Engineering Failure Analysis*. 2020;113:104545. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104545>
- Ворошнин Л.Г. Многокомпонентные диффузионные покрытия. Минск: Наука и техника, 1981:296.
- ASM International Handbook Comitee. ASM Handbook. Vol. 5. Surface Engineering. 1994:2535. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(00\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00006-2)
- Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справочник / Г.В. Борисенко, Л.А. Васильев, Л.Г. Ворошнин, и др. Москва: Металлургия, 1981:424.

7. Ворошнин Л.Г. *Борирование промышленных сталей и чугунов*. Минск: Научная думка, 1981:205.
8. Kulka M., Pertek A., Klimek L. The influence of carbon content in the borided Fe-alloys on the microstructure of iron borides. *Materials Characterization*. 2006;56(3):232–240. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2005.11.013>
9. Мельник П.И. Диффузионное насыщение железа и твердофазные реакции в сплавах. Москва: Металлургия, 1993:128.
10. Пат. 2345175 РФ. Способ упрочнения деталей из конструкционных и инструментальных сталей / А.М. Гурьев, С.Г. Иванов, Б.Д. Лыгденов, С.А. Земляков, О.А. Власова, Е.А. Кошелева, М.А. Гурьев; Заявл. 03.04.2007; опубл. 27.01.2009. Бюл. № 3.
11. Бокштейн Б.С., Бокштейн С.З., Жуховицкий А.А. *Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах*. Москва: Металлургия, 1974:280.
12. Пригожин И., Дефэй Р. *Химическая термодинамика* / Пер. с англ. Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2010:533.
13. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А. Введение в физику поверхности. Москва: Наука, 2006:490.
14. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. *Физика твердого тела*. 3-е изд. Москва: Высшая школа, 2000:494.
15. Ролдугин В.И. *Физикохимия поверхности*. Долгопрудный: ИД "Интеллект", 2008:568.
16. ASM International Handbook Committee. ASM Handbook. Volume 4. Heat Treating. 1991:2173.
17. Lin G., Zhang Z., Qiu Z., Luo X., Wang J., Zhao F. Boronizing mechanism of cemented carbides and their wear resistance. *Intern. J of Refractory Metals and Hard Materials*. 2013;41:351–355. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.05.008>
18. Delai O., Xia C., Shiqiang L. Growth kinetics of the FeB/Fe₂B boride layer on the surface of 4Cr5MoSiV1 steel: experiments and modelling. *J of Materials Research and Technology*. 2021;11:1272–1280. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.109>
19. Mathew M., Rajendrakumar P. Optimization of process parameters of boro-carburized low carbon steel for tensile strength by Taguchi method with grey relational analysis. *Materials & Design*. 2011;32:3637–3644. <https://doi.org/10.1007/s12588-015-9128-x>
20. Pertek A., Kulka M. Two-step treatment carburizing followed by boriding on medium-carbon steel. *Surface and Coatings Technology*. 2003;173:309–314. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.11.016>
21. Yu L., Chen X., Khor K.A., Sundararajan G. FeB/Fe₂B phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics. *Acta Materialia*. 2005;53:2361–2368. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.01.043>

REFERENCES

1. Emamverdian A.A., Sun Y., Cao C., Pruncu C., Wang Y. Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies)-a review. *Engineering Failure Analysis*. 2021;129(18):105678. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105678>
2. Widomski P., Gronostajski Z. Comprehensive review of methods for increasing the durability of hot forging tools. *Procedia Manufacturing*. 2020;47:349–355. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.280>
3. Ghalehbandi S.M., Biglari F. Predicting damage and failure under thermomechanical fatigue in hot forging tools. *Engineering Failure Analysis*. 2020;113:104545. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104545>
4. Voroshnin L.G. *Multicomponent diffusion coatings*. Minsk: Science and Technology, 1981:296. (In Russ.).
5. ASM International Handbook Committee. ASM Handbook. Vol. 5. Surface Engineering. 1994:2535. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(00\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(00)00006-2)
6. *Chemical and thermal treatment of metals and alloys: Handbook* / G.V. Borisenok, L.A. Vasiliev, L.G. Voroshnin, etc. Moscow: Metallurgiya, 1981:424. (In Russ.).
7. Voroshnin L.G. *Boration of industrial steels and cast iron*. Minsk: Naukova dumka, 1981:205. (In Russ.).
8. Kulka M., Pertek A., Klimek L. The influence of carbon content in the borided Fe-alloys on the microstructure of iron borides. *Materials Characterization*. 2006;56(3):232–240. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2005.11.013>
9. Melnik P.I. *Diffusion saturation of iron and solid-phase reactions in alloys*. Moscow: Metallurgy, 1993:128. (In Russ.).
10. Method of hardening parts made of structural and tool steels / Guryev A.M., Ivanov S.G., Lygdenov B.D., Zemlyakov S.A., Vlasova O.A., Kosheleva E.A., Guryev M.A. Pat. 2345175 RF. *Byulleten' izobretenii*. 2009, no. 3. (In Russ.).
11. Bokshtein B.S., Bokshtein S.Z., Zhukhovitsky A.A. Thermodynamics and kinetics of diffusion in solids. Moscow: Metallurgy, 1974:280. (In Russ.).

12. Prigozhin I., Defey R. *Chemical thermodynamics* / Trans. Eng. Moscow: Binom. Laboratory of Knowledge, 2010:533. (In Russ.)
13. Oura K., Lifshits V.G., Saranin A.A. *Introduction to surface physics*. Moscow: Nauka, 2006:490. (In Russ.).
14. Pavlov P.V., Khokhlov A.F. *Solid state physics*. 3rd ed. Moscow: Higher School, 2000:494. (In Russ.).
15. Roldugin V.I. *Physical chemistry of the surface*. Dolgoprudny: Intel-lect Publishing House, 2008:568. (In Russ.).
16. ASM International Handbook Committee. *ASM Handbook*. Vol. 4. Heat Treating. 1991:2173.
17. Lin G., Zhang Z., Qiu Z., Luo X., Wang J., Zhao F. Boronizing mechanism of cemented carbides and their wear resistance. *Intern. J of Refractory Metals and Hard Materials*. 2013;41:351–355.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2013.05.008>
18. Delai O., Xia C., Shiqiang L. Growth kinetics of the FeB/Fe₂B boride layer on the surface of 4Cr5MoSiV1 steel: experiments and modelling. *J of Materials Research and Technology*. 2021;11:1272–1280.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.109>
19. Mathew M., Rajendrakumar P. Optimization of process parameters of boro-carburized low carbon steel for tensile strength by Taquchi method with grey relational analysis. *Materials & Design*. 2011;32:3637–3644.
<https://doi.org/10.1007/s12588-015-9128-x>
20. Pertek A., Kulka M. Two-step treatment carburizing followed by boriding on medium-carbon steel. *Surface and Coatings Technology*. 2003;173:309–314.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.11.016>
21. Yu L., Chen X., Khor K.A., Sundararajan G. FeB/Fe₂B phase transformation during SPS pack-boriding: Boride layer growth kinetics. *Acta Materialia*. 2005;53:2361–2368.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.01.043>

Сведения об авторах

Михаил Алексеевич Гурьев, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; профессор, Уханьский текстильный университет; ведущий инженер, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd.
E-mail: gurievma@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9191-1787
SPIN-код: 6084-1112

Сергей Геннадьевич Иванов, д.т.н., заведующий ЛМИ ИЦ «ХимБиоМаш», ведущий научный сотрудник

НИИ, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; профессор, Уханьский текстильный университет
E-mail: serg225582@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5965-0249
SPIN-код: 1249-4949

Цюань Чжэн, аспирант, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Уханьский текстильный университет
E-mail: 361870277@qq.com
ORCID: 0000-0002-4596-1302

Алексей Михайлович Гурьев, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой начертательной геометрии и графики, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; профессор, Уханьский текстильный университет
E-mail: gurievam@mail.ru
ORCID: -0002-7570-8877
SPIN-код: 1134-0006

Information about the authors:

Mikhail A. Guryev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, I.I. Polzunov Altai State Technical University (AltSTU); Professor, Wuhan Textile University; Lead Engineer, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co., Ltd.
E-mail: gurievma@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9191-1787
SPIN-код: 6084-1112

Sergei G. Ivanov, Dr. Sci. (Eng.), Head of LMI IC "ChemBioMash", Leading Researcher at SD, I.I. Polzunov Altai State Technical University; Professor, Wuhan Textile University
E-mail: serg225582@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5965-0249
SPIN-код: 1249-4949

Q. Zheng, Postgraduate student, Wuhan Textile University, Polzunov Altai State Technical University
E-mail: 361870277@qq.com
ORCID: 0000-0002-4596-1302

Alexey M. Guryev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. Head of department, I.I. Polzunov Altai State Technical University; Professor, Wuhan Textile University
E-mail: gurievam@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7570-8877
SPIN-код: 1134-0006

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

Поступила в редакцию 20.08.2024
 После доработки 02.09.2024
 Принята к публикации 04.09.2024

Received 20.08.2024
 Revised 02.09.2024
 Accepted 04.09.2024

Оригинальная статья

УДК 378.124

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-37-46

ОТ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ ДО ТЕХНОЛОГИЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ. КАФЕДРЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОЛОГИИ СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ИНДУСТРИАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА 90 ЛЕТ

© 2024 г. Е. Н. Темлянцева, С. Г. Коротков, А. А. Уманский, М. В. Темлянцев

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

Аннотация. Кафедра теплоэнергетики и экологии празднует 90-летие своего существования. Она является одной из старейших базовых кафедр Сибирского государственного индустриального университета. Приведены сведения из истории становления и развития кафедры. Рассмотрены основные вехи развития кафедры, сведения об учебно-методической и научной работе, достижениях ее сотрудников, студентов и выпускников. Спектр направлений поисковых, фундаментальных и прикладных научных исследований, проводимых работниками кафедры, охватывает решение научно-практических задач. В 2023 – 2024 уч. г. совместно с работодателями, представителями металлургических, горных и теплоэнергетических предприятий Кузбасса разработаны новые образовательные программы высшего образования по направлениям: «Экология и природопользование», профиль «Геоэкология и эффективное управление природными ресурсами» и «Техносферная безопасность», профиль «Инженерная защита окружающей среды и природоподобные технологии». Свой юбилей коллектив кафедры встречает полный сил, творческих идей и перспективных направлений развития.

Ключевые слова: кафедра теплоэнергетики и экологии, научные исследования, учебный процесс, достижения

Для цитирования: Темлянцева Е.Н., Коротков С.Г., Уманский А.А., Темлянцев М.В. От металлургических печей до технологий устойчивого развития. Кафедре теплоэнергетики и экологии Сибирского государственного индустриального университета 90 лет. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):37–46. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-37-46](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-37-46)

Original article

FROM METALLURGICAL FURNACES TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT TECHNOLOGIES. DEPARTMENT OF THERMAL POWER ENGINEERING AND ECOLOGY SIBIRIAN STATE INDUSTRIAL UNIVERSITY THE UNIVERSITY IS 90 YEARS OLD

© 2024 E. N. Temlyantseva, S. G. Korotkov, A. A. Umansky, M. V. Temlyantsev

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

Abstract. The Department of Thermal Power Engineering and Ecology celebrates the 90th anniversary of its existence. It is one of the oldest basic departments of the Siberian State Industrial University. The information from the history of the formation and development of the department is given. The main milestones of the department's development, information about educational, methodological and scientific work, achievements of its staff, students and graduates are considered. The range of directions of exploratory, fundamental and applied scientific research conducted by the staff of the department covers the solution of scientific and practical tasks. In 2023-2024 academic year. together with employers, representatives of metallurgical, mining and thermal power

enterprises of Kuzbass, new educational programs of higher education have been developed in the following areas: "Ecology and nature management" profile "Geoecology and effective management of natural resources" and "Techno-sphere safety" profile "Engineering environmental protection and environmental technologies". The staff of the department celebrates its anniversary full of energy, creative ideas and promising areas of development.

Keywords: Department of Thermal Power Engineering and Ecology, scientific research, educational process, achievements

For citation: Temlyantseva E.N., Korotkov S.G., Umansky A.A., Temlyantsev M.V. From metallurgical furnaces to sustainable development technologies. The Department of Thermal Power Engineering and Ecology of the Siberian State Industrial University is 90 years old. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):37–46. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-37-46](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-37-46)

Кафедра теплоэнергетики и экологии (ранее носила названия кафедры «Металлургических печей», «Металлургических печей и теплогазоснабжения», «Теплотехники печей и газоочистки», «Теплофизики и промышленной экологии») основана в далеком 1934 г. и является одной из старейших базовых кафедр университета, заложивших фундамент и преумножающих потенциал его развития.

Вехи

Начало было не простым и ответственным. Кафедра металлургических печей создавалась как общетехническая, за ней были закреплены дисциплины «Металлургические печи», «Топливо и огнеупоры», «Общая теплотехника», «Гидравлика», «Контрольно-измерительные приборы». При кафедре работали исследовательские лаборатории по топливу и огнеупорам, а первым ее руководителем был доцент М.С. Спиридонов (1934 – 1939 гг.) [1; 2].

В период 1940 – 1962 гг. кафедрой руководил кандидат технических наук, доцент Иван Савельевич Назаров. Талантливый ученый, педагог и администратор И.С. Назаров сформировал на кафедре научный задел и педагогические традиции [3; 4].

Во время Великой отечественной войны И.С. Назаров вошел в группу ученых Сибирского металлургического института (СМИ), которая решала задачи, связанные с переводом КМК на оборонные заказы, проектированием и выбором печей для термической обработки бронелиста, повышением производительности обжиговых печей для увеличения объемов производства динаса и шамота [1 – 4].

В 1955 г. организован первый набор студентов по специальности «Металлургические печи». С этого момента кафедра стала специальной, выпускающей. В 1960 г. состоялся первый выпуск 14 инженеров-теплотехников, четверо из них – Э.Р. Брувер, Ю.Ф. Бердюгин, Я.П. Калу-

гин, В.С. Стариков защитили впоследствии кандидатские и докторские диссертации.

В 1957 г. И.С. Назаров возглавил работу по организации редакции и типографии для выпуска нового журнала «Известия высших учебных заведений. Черная металлургия», став первым его главным редактором.

Под руководством и при непосредственном участии И.С. Назарова на кафедре металлургических печей был создан мощный парк полупромышленных камерных печей скоростного нагрева, на базе которого были проведены масштабные эксперименты в активно развивающемся в то время научном направлении (скоростном нагреве стали). Назаровым были предложены и осуществлены на практике конструкции электрических безынерционных печей. Уникальные эксперименты по исследованию трещинообразования, окисления и обезуглероживания стали при скоростном нагреве послужили основой кандидатских и докторских диссертационных исследований сотрудников кафедры В.С. Старикова, Е.И. Корочкина и др. [4 – 9]

В 1959 г. кафедра металлургических печей выделила из своего состава часть преподавателей для подготовки специалистов по автоматизации металлургического производства, которую возглавил (образовав новую кафедру автоматизации металлургического производства) д.т.н., профессор П.М. Масловский [6].

С 1962 по 1974 гг. кафедрой заведовал доцент Евгений Иванович Корочкин. Под его руководством были реконструированы и переоснащены лаборатории механики газов, теплопередачи и другие, закончено строительство и оборудование лаборатории металлургических печей. Рост объемов производства металлургических предприятий обострил экологические проблемы загрязнения атмосферного воздуха и предопределил актуальность и востребованность специалистов в области пылеулавливания и очистки газов промышленных печей и агрегатов. Для подготовки кадров для решения таких

задач в 1982 г. открыта новая специальность «Улавливание и утилизация пылей и газов» [6].

Профессиональный опыт Е.В. Корочкина был направлен на развитие образовательного процесса, решение проблем педагогики высшей школы, внедрение ЭВМ и информатизации в учебный процесс. В период с 1960 по 1974 гг. подготовлено 334 специалиста-теплотехника [6].

В 1974 г. кафедре поручено организовать подготовку инженеров по специальности «Теплогасоснабжение и вентиляция» [6].

В 1982 г. кафедра теплогасоснабжения и вентиляции стала самостоятельной и впоследствии вошла в состав строительного факультета. На новую кафедру перешли работать опытные специалисты (Л.И. Ускова, О.Я. Логунова, А.И. Кореньков, З.В. Нойкос, В.И. Иванов) [6].

С 1974 по 2002 гг. кафедрой заведовал профессор Геннадий Иосифович Черныш. В 70 – 80-е годы резко возросла потребность в подготовке высококвалифицированных педагогических кадров для собственных нужд (рис. 1, 2). Кафедра стремительно развивалась, увеличивался штат профессорско-преподавательского состава, требовались металлурги-теплотехники – кандидаты и доктора наук, специалисты в области теории и конструкций металлургических печей [6].

Для решения этой задачи Г.И. Чернышом в аспирантуру на родственную кафедру Уральско-

го политехнического института, которой в то время заведовал профессор Ю.Г. Ярошенко, были направлены выпускники Сибирского металлургического института Н.А. Драничников, В.П. Зайцев, Н.И. Трофимов, В.М. Павловец, А.К. Соловьев, М.Н. Башкова. Под чутким руководством Юрия Гавриловича СМИчи успешно защитили кандидатские диссертации и, вернувшись в родные стены, составили основной костяк кафедры [6].

В этот период на кафедре велась подготовка инженеров по специальности «Теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей», по двум специализациям «Теплофизические основы конструирования и эксплуатация промышленных печей» и «Промышленная экология». Мощный импульс развития получила экологическая тематика прикладных научных исследований [6].

На время руководства кафедрой Г.И. Чернышом пришелся один из самых нелегких для высшего профессионального образования и России в целом период 90-х годов (рис. 3). Несмотря на сложные социально-экономические изменения в стране, отток кадров из высшей школы, Геннадию Иосифовичу удалось сохранить высокий кадровый потенциал кафедры, многолетние традиции, преумножить ее достижения [6].



Рис. 1. Сотрудники кафедры, 1984 г. (слева направо):
П.Г. Белоусов, В.В. Стерлигов, Е.И. Корочкин, Г.И. Черныш, К.А. Черепанов,
В.С. Стариков, Н.И. Трофимов, Г.В. Самохвалов
Fig. 1. Staff of the department, 1984 (from left to right):
P.G. Belousov, V.V. Sterligov, E.I. Kurochkin, G.I. Chernysh, K.A. Cherepanov,
V.S. Starikov, N.I. Trofimov, G.V. Samokhvalov



Рис. 2. Состав кафедры, конец 80-х г. (слева направо, сверху вниз):

В.М. Павловец, Ю.Е. Михайленко, В.И. Ливенец, А.К. Соловьев, В.В. Стерлигов,
Н.А. Драничников, Ю.П. Галицкий, В.Г. Воронцов, В.П. Зайцев, Н.И. Трофимов,
А.П. Перфильев, С.Н. Михайлец, К.А. Черепанов, В.В. Легаева, Г.М. Коровкина,
Г.И. Черныш, Т.А. Михайличенко, Н.В. Курганова, Г.В. Самохвалов

Fig. 2. The composition of the department, the end of the 80s (from left to right, from top to bottom): V.M. Pavlovets, Yu.E. Mikhailenko, V.I. Livenets, A.K. Solovyov, V.V. Sterligov, N.A. Dranichnikov, Yu.P. Galitsky, V.G. Vorontsov, V.P. Zaitsev, N.I. Trofimov, A.P. Perfiliev, S.N. Mikhaylets, K.A. Cherepanov, V.V. Legaeva, G.M. Korovkina, G.I. Chernysh, T.A. Mikhaylichenko, N.V. Kurganova, G.V. Samokhvalov

В 1995 г. доцентом кафедры В.С. Стариковым в диссертационном совете Уральского государственного технического университета была успешно защищена докторская диссертация на тему «Форсированные энергосберегающие технологии нагрева стальных заготовок в металлургических печах».

В 2000 г. профессором кафедры К.А. Черепановым в диссертационном совете при Иркутском государственном техническом университете была защищена докторская диссертация на тему «Разработка научных и практических основ ресурсосберегающих технологий переработки и утилизации твердых дисперсных отходов горно-рудной и металлургической промышленности (на примере Кузбасса)».

С 2002 по 2020 гг. кафедрой руководил к.т.н., доцент Сергей Георгиевич Коротков (рис. 4 – 6). Это период диверсификации образовательных программ, расширения спектра направлений подготовки специалистов для реального сектора экономики. В 2003 г. проведен первый набор, а в 2008 г. первый выпуск инженеров по новой специальности «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов», специализация «Переработка комплексного и техногенного сырья» [6].

В 2009 г. на базе специальности «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов» в СибГИУ создана кафедра техногенных и вторичных ресурсов, которую возглавила д.т.н., профессор Е.П. Волынкина [8; 9].

В 2011 г. организована подготовка бакалавров и магистров по направлению «Металлургия», профили «Теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей» и «Металлургия техногенных и вторичных ресурсов», начат прием студентов на заочную форму обучения. В 2011 г. начата подготовка бакалавров по направлению «Техносферная безопасность», профиль «Инженерная защита окружающей среды». В 2012 г. открыта подготовка бакалавров по направлениям: «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Промышленная теплоэнергетика» (по очной, заочной и очно-заочной формам подготовки); «Экология и природопользование», профиль «Экология». Открыта магистратура по направлению: «Экология и природопользование», профиль «Ресурсосбережение и утилизация отходов» [8; 9].

В 2007 г. доцентом Е.П. Волынкиной защищена докторская диссертация в диссертационном совете при Государственном технологи-



Рис. 3. Сотрудники кафедры и коллеги, 1996 г. (слева направо, сверху вниз):

В.М. Павловец, Ю.Е. Михайленко, Г.И. Черныш, Н.А. Драничников, С.Н. Михайлец, Г.В. Самохвалов, А.И. Кореньков, С.Г. Коротков, В.Н. Михайлец, В.С. Стариков, Н.П. Черныш, О.Б. Громова, Т.А. Михайличенко, Е.В. Медведская, Н.В. Курганова, Т.Л. Лобочева, Г.П. Ивойлова, Г.М. Коровкина

Fig. 3. Staff of the department and colleagues, 1996 (from left to right, from top to bottom):

V.M. Pavlovets, Yu.E. Mikhailenko, G.I. Chernysh, N.A. Dranichnikov, S.N. Mikhailets, G.V. Samokhvalov, A.I. Korenkov, S.G. Korotkov, V.N. Mikhailets, V.S. Starikov, N.P. Chernysh, O.B. Gromova, T.A. Mikhailichenko, E.V. Medvedskaya, N.V. Kurganova, T.L. Lobacheva, G.P. Ivoylova, G.M. Korovkina

ческом университете «Московский институт стали и сплавов» на тему «Развитие концепции управления отходами и разработка методологии ее реализации на металлургическом предприятии». В этом же году доцентом кафедры М.В. Темлянцева защищена докторская диссертация в диссертационном совете при Сибирском государственном индустриальном университете на тему «Развитие металлургических основ теории и ресурсосберегающей технологии тепловой обработки стали».

В 2016 г. доцентом А.В. Феоктистовым защищена докторская диссертация в диссертационном совете при Сибирском федеральном университете на тему «Развитие теории тепловой работы и технологических основ ресурсосбережения в твердотопливных низкошахтных печах».

В 2017 г. доцентом Н.В. Журавлевой защищена докторская диссертация в диссертационном совете при Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС» на тему «Обоснование, разработка и развитие методов оценки влияния добычи и переработки углей Кузнецкого угольного бассейна на экологическое состояние природной среды».

С 2020 г. по настоящее время кафедрой руководит кандидат технических наук, доцент Елена Николаевна Темлянцева (рис. 7).

В 2023 г. в СибГИУ стартовал стратегический проект «Технологии устойчивого развития». Основная цель проекта – стать университету к 2028 г. одним из российских лидеров подготовки инженерных и управленческих кадров, проведения научных исследований и реализации практической деятельности в области промышленной экологии, декарбонизации экономики, устойчивого развития производственных и финансовых секторов на основе создания сетевой модели взаимодействия с ведущими центрами компетенций.

Современными вызовами и предпосылками реализации такого проекта стали:

1) Указ Президента РФ от 26 октября 2023 г. № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации».

2) Указ Президента Российской Федерации от 02.11.2023 № 818 «О развитии природоподобных технологий в Российской Федерации».

3) Мировые тренды борьбы с климатическими изменениями на основе декарбонизации экономики и формирование рынка обращения углеродных единиц.



Рис. 4. Кафедра теплофизики и промышленной экологии, 2002 г. (слева направо, сверху вниз):

Ю.Е. Михайленко, В.М. Павловец, В.И. Ливенец, М.В. Темлянцец, Н.В. Темлянцец, В.М. Динельт, А.С. Михайленко, Н.А. Драничников, Г.В. Самохвалов, С.Г. Коротков, Т.А. Михайличенко, Е.П. Волынкина, Е.Н. Темлянцева, И.В. Гладких, Е.В. Медведская, Е.Н. Мизгирева, Г.М. Коровкина, Н.В. Курганова

Fig. 4. Department of Thermophysics and Industrial Ecology, 2002 (from left to right, from top to bottom):

Yu.E. Mikhailenko, V.M. Pavlovets, V.I. Livenets, M.V. Temlyantsev, N.V. Temlyantseva, V.M. Dinelt, A.S. Mikhailenko, N.A. Dranichnikov, G.V. Samokhvalov, S.G. Korotkov, T.A. Mikhaylichenko, E.P. Volynkina, E.N. Temlyantseva, I.V. Gladkikh, E.V. Medvedskaya, E.N. Mizgireva, G.M. Korovkina, N.V. Kurganova



Рис. 5. Кафедра теплофизики и промышленной экологии, 2009 г. (слева направо, сверху вниз):

А.К. Соловьев, Н.А. Драничников, С.Г. Коротков, В.И. Ливенец, М.В. Темлянцец, В.М. Павловец, В.В. Стерлигов, К.А. Черепанов, В.В. Хузеев, Е.В. Медведская, Т.А. Михайличенко, Л.Б. Павлович, Е.Н. Мизгирева, С.А. Григорьева, О.О. Медведская, Н.В. Курганова, Е.Н. Темлянцева

Fig. 5. Department of Thermophysics and Industrial Ecology, 2009 (from left to right, from top to bottom):

A.K. Solovyov, N.A. Dranichnikov, S.G. Korotkov, V.I. Livenets, M.V. Temlyantsev, V.M. Pavlovets, V.V. Sterligov, K.A. Cherepanov, V.V. Guzeev, E.V. Medvedskaya, T.A. Mikhailichenko, L.B. Pavlovich, E.N. Mizgireva, S.A. Grigorieva, O.O. Medvedskaya, N.V. Kurganova, E.N. Temlyantseva



Рис. 6. Коллектив кафедры теплоэнергетики и экологии, 2014 г. (слева направо, сверху вниз):
К.И. Домнин, Е.М. Мизгирева, А.С. Водолеев, С.Л. Семенов, А.Е. Аникин, В.В. Стерлигов, А.К. Соловьев, М.В. Темлянцева, С.Г. Коротков, В.М. Павловец, В.И. Ливенец, В.В. Хузеев, В.И. Шляров, А.Г. Брюхов, А.С. Михайленко, С.А. Григорьева, Л.А. Самигулина, О.С. Андреева, Е.Н. Темлянцева, Д.А. Шадринцева, Т.А. Михайличенко, Е.П. Волынкина, Н.В. Курганова, Л.Б. Павлович, Л.Н. Водолеева, Е.В. Медведская

Fig. 6. The staff of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, 2014 (from left to right, from top to bottom):
K.I. Domnin, E.M. Mizgireva, A.S. Vodoleev, S.L. Semenov, A.E. Anikin, V.V. Sterligov, A.K. Solovyov, M.V. Temlyantsev, S.G. Korotkov, V.M. Pavlovets, V.I. Livenets, V.V. Khuzeev, V.I. Shlyarov, A.G. Bryukhov, A.S. Mikhailenko, S.A. Grigorieva, L.A. Samigulina, O.S. Andreeva, E.N. Temlyantseva, D.A. Shadrintseva, T.A. Mikhaylichenko, E.P. Volynkina, N.V. Kurganova, L.B. Pavlovich, L.N. Vodoleeva, E.V. Medvedskaya



Рис. 7. Коллектив кафедры теплоэнергетики и экологии, 2019 г. (слева направо, сверху вниз):
К.И. Домнин, А.С. Водолеев, Н.В. Журавлева, А.К. Соловьев, С.Г. Коротков, М.В. Темлянцева, В.М. Павловец, В.В. Стерлигов, М.В. Стерлигов, Е.В. Медведская, О.Д. Прохоренка, Т.А. Михайличенко, О.А. Медведская, Е.Н. Темлянцева, Д.А. Шадринцева, Л.П. Басченко

Fig. 7. The staff of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, 2019 (from left to right, from top to bottom):
K.I. Domnin, A.S. Vodoleev, N.V. Zhuravleva, A.K. Solovyov, S.G. Korotkov, M.V. Temlyantsev, V.M. Pavlovets, V.V. Serligov, M.V. Sterligov, E.V. Medvedskaya, O.D. Prokhorenka, T.A. Mikhailichenko, O.A. Medvedskaya, E.N. Temlyantseva, D.A. Shadrintseva, L.P. Baschenko

4) Интенсивное развитие секвестрационной индустрии.

5) Повестка и тренды ESG (environmental – окружающая среда, social – социальное развитие, governance – корпоративное управление).

6) Актуальность улучшения экологической обстановки в Новокузнецке и Кузбассе (объемы накопившихся техногенных отходов и техногенно-нарушенных земель составляют более 150 000 га, темпы их прироста – до 4 млрд т в год, ежегодно суммарный объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу составляет порядка 1600 тыс. т, значительную долю в общей массе выбросов в атмосферный воздух составляют парниковые газы, в том числе метан – 58,5 %).

7) Повестка Научно-образовательного центра мирового уровня «Кузбасс – Донбасс».

8) Наличие в Кузбассе значительных объемов и площадей техногенных отходов и техногенно-нарушенных земель.

9) Запросы технологических партнеров.

10) Необходимость опережающей подготовки специалистов в области природоподобных технологий с развитыми навыками экологического мышления.

Кафедра теплоэнергетики и экологии стала одним из основных ресурсных центров реализации этого проекта. В 2023 – 2024 уч. г. совместно с работодателями, представителями металлургических, горных и теплоэнергетических предприятий Кузбасса разработаны новые образовательные программы высшего образования по направлениям: «Экология и природопользование» профиль «Геоэкология и эффективное управление природными ресурсами» (основной концепт программы – подготовка выпускника, обладающего знаниями, навыками, компетенциями в области геоэкологии, экономически эффективного и экологически безопасного использования природных ресурсов) и «Техносферная безопасность» профиль «Инженерная защита окружающей среды и природоподобные технологии» (основной концепт программы – подготовка выпускника, обладающего знаниями, навыками, компетенциями в области создания и применения природоподобных технологий для защиты окружающей среды от техногенного воздействия). В сентябре 2024 г. осуществлен набор первокурсников на новые направления подготовки.

Разработанные образовательные программы предполагают освоение новых учебных дисциплин, формирующих багаж знаний в области эколого-климатической повестки и декарбонизации экономики (в частности «Метеорология и климатология», «Биоценоз природных и техногенных экосистем», «Природоподобные технологии», «Геоинформационные системы», «Ос-

новы экологического проектирования», «Экономика природопользования и природоохранной деятельности» и другие). Наряду с теоретическими знаниями образовательный трек предполагает погружение обучающихся в проектную деятельность по реальным запросам технологических партнеров.

В рамках реализации образовательной программы бакалавры осваивают основную программу профессионального обучения 13271 «Лаборант по анализу газов и пыли». Это дает обучающимся возможность получить дополнительную квалификацию, повысить свои конкурентные преимущества при трудоустройстве. Особенностью организации практик (ознакомительной, по профессии и технологической) является прохождение их в цикле обучения на различных предприятиях горной, металлургической отраслей и теплоэнергетики. Такой подход позволяет обучающимся осуществить осознанный выбор наиболее интересной для них сферы приложения своих компетенций. Преддипломная практика проходит на предприятии, соответствующем тематике выпускной квалификационной работы.

В 2024 г. лицензирована программа СПО 20.02.01 «Экологическая безопасность природных комплексов».

Мы сегодня

В настоящее время профессорско-преподавательский состав кафедры следующий (рис. 8): пять докторов наук, профессоров (М.В. Темлянцева, А.С. Водолеев, А.В. Феоктистов, В.И. Мурко, Н.В. Журавлева), девять кандидатов наук, доцентов (Е.Н. Темлянцев, С.Г. Коротков, В.В. Стерлигов, Т.А. Михайличенко, В.М. Павлов, А.К. Соловьев, О.Д. Прохоренко, Л.П. Башенко; В.Б. Костерев); три старших преподавателя (Е.В. Медведская, И.Н. Савина, О.Г. Модзелевская); преподаватель (Е.М. Запольская); учебно-вспомогательный персонал: заведующий лабораториями М.В. Стерлигов, ведущий инженер К.И. Домнин, два инженера первой категории К.В. Беляев, Д.А. Старикова.

За последние 5 лет профессорско-преподавательским составом кафедры опубликовано более 400 научных и учебно-методических трудов, в том числе 100 статей в журналах из перечня ВАК, 10 монографий и учебных пособий, 19 патентов, выполнено 13 НИОКР по договорам и грантам различного уровня на общую сумму 16 млн рублей. Выпуск бакалавров и магистров составил 353 человек. В 2024 – 2025 уч. г. контингент обучающихся по направлениям подготовки кафедры составляет 389 человек.



Рис. 8. Коллектив кафедры теплоэнергетики и экологии, 2024 г. (слева направо, сверху вниз):
М.В. Стерлигов, К.И. Домнин, К.В. Беляев, С.Г. Коротков, В.М. Павловец, М.В. Темлянцева, А.К. Соловьев,

Л.П. Башченко, Т.А. Михайличенко, Н.В. Журавлева, Е.В. Медведская, Д.А. Старикова
Fig. 8. The staff of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, 2024 (from left to right, from top to bottom):

М.В. Sterligov, K.I. Domnin, K.V. Belyaev, S.G. Korotkov, V.M. Pavlovets, M.V. Temlyantsev, A.K. Solovyov,
A.S. Vodoleev, O.D. Prokhorenka, E.M. Zapolskaya, E.N. Temlyantseva,
L.P. Bashchenko, T.A. Mikhaylichenko, N.V. Zhuravleva, E.V. Medvedskaya, D.A. Starikova

Спектр направлений поисковых, фундаментальных и прикладных научных исследований, проводимых работниками кафедры, охватывает решение научно-практических задач в следующих областях: разработка новых теплотехнологий и повышения энергоэффективности существующих, совершенствование конструкции промышленных печей теплотехнических аппаратов и агрегатов различного назначения, окомкование железорудного сырья в металлургии, повышение стойкости футеровок тепловых агрегатов, окисление, обезуглероживание сталей при нагреве под обработку давлением, высокотемпературной газовой коррозии чугунов, теория и технология теплогенерации с применением водоугольного топлива, промышленная экология, рекультивация и ремедиация нарушенных земель, пылеулавливание и очистка промышленных газов, рециклинг и переработка промышленных отходов.

Особая гордость кафедры – выпускники. За всю историю кафедры подготовлено более 2300 специалистов, бакалавров и магистров. Многие из них стали руководителями промышленных предприятий и органов власти различных уровней, известными учеными, политическими деятелями, успешными бизнесменами и предпринимателями, внесли существенный вклад в развитие города Новокузнецк, Кузбасса и России (основатель и генеральный директор ЗАО «Калугин» д.т.н. Я.П. Калугин, заведующий лабораторией экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики СО РАН им. Кутателадзе в.н.с, д.т.н. В.И. Попов, генеральный директор ОАО «Амурсталь» С.И. Сафонов, управляющий директор ОАО «Новокузнецкий металлур-

гический комбинат» Г.В. Мохов, директор департамента по работе с персоналом ООО «Гурьевск-Сталь» А.Г. Абраменко, руководитель спасательного центра по югу Кузбасса, президент городской ассоциации туристов Р.Э. Брувер, руководитель администрации Центрального района г. Новокузнецка Н.Ю. Маслов, председатель комитета охраны окружающей среды и природных ресурсов Администрации г. Новокузнецка И.Н. Савина и многие другие) [7 – 9].

Свой юбилей коллектив кафедры встречает полный сил, творческих идей и перспективных направлений развития.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берлин А.Б. *Сибирский металлургический институт. Дела и люди*. Новокузнецк: изд. СМИ, 1992:224.
2. *Сибирский государственный индустриальный университет: Страницы истории*. Кемерово: Кузбассвузиздат, 2002:160 с.
3. Самохвалов Г.В., Черныш Г.И. Кафедра теплофизики и промышленной экологии. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2000;8:5–6.
4. Самохвалов Г.В., Коротков С.Г. Кафедре теплофизики и промышленной экологии СибГИУ – 70 лет. *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. 2004;13:9–12.
5. Кулагин Н.М., Кулаков С.М., Воскресенский В.А. и др. *СМИ – СибГИУ. 75 лет*.

Хроника. Люди. События: очерки истории СибГИУ. Кемерово: Кузбасс, 2005:304 с.

6. *Кафедра теплофизики и промышленной экологии СибГИУ. 75 лет в образовании и науке* / Под. ред. М.В. Темлянцева, С.Г. Короткова, В.В. Стерлигова. Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2009:163.
7. Паэгле Н. *Яков Калугин.* Екатеринбург: Сократ, 2014:400.
8. Коротков С.Г., Волынкина Е.П., Темлянцев М.В., Галевский Г.В. Кафедре теплоэнергетики и экологии СибГИУ – 80 лет. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2014;3(9):3–11.
9. Коротков С.Г., Темлянцев М.В., Стерлигов В.В. 85 лет в системе высшего образования. К юбилею кафедры теплоэнергетики и экологии СибГИУ. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2019;3(29):3–13.

REFERENCES

1. Berlin A.B. *Siberian Metallurgical Institute. Business and people.* Novokuznetsk: izd. SMI, 1992:224. (In Russ.).
2. *Siberian State Industrial University: The pages of history.* Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2002:160 s. (In Russ.).
3. Samokhvalov G.V., Chernysh G.I. Department of Thermophysics and Industrial Ecology. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2000;8:5–6. (In Russ.).
4. Samokhvalov G.V., Korotkov S.G. Kafedre teplofiziki i promyshlennoy ekologii SibGIU – 70 let. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi seksii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii.* 2004;13:9–12. (In Russ.).
5. Kulagin N.M., Kulakov S.M., Voskresenskii V.A. at all. *Voskresensky V.A. and others. Media – Si-bGIU. 75 years old. The chronicle. People. Events: essays on the history of SibGIU.* Kemerovo: Kuzbass, 2005:304. (In Russ.).
6. Temlyantsev M.V., Korotkov S.G., Sterligov V.V. ed. *Department of Thermophysics and Industrial Ecology of SibGIU. 75 years in education and science.* Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2009:163. (In Russ.).
7. Paegle N. *Yakov Kalugin.* Ekaterinburg: Sokrat, 2014:400. (In Russ.).
8. Korotkov S.G., Volynkina E.P., Temlyantsev M.V., Galevskii G.V. The Department of Thermal Power Engineering and Ecology of SibGIU is 80 years old. *Bulletin of the Siberian State Industrial University.* 2014;3(9):3–11. (In Russ.).
9. Korotkov S.G., Temlyantsev M.V., Sterligov V.V. 85 years in the higher education system. To the anniversary of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology of SibGIU. *Bulletin of the Siberian State Industrial University.* 2019;3(29):3–13. (In Russ.).

Сведения об авторах

Елена Николаевна Темлянцева, к.т.н., доцент, заведующая кафедрой теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru
SPIN-код: 9096-4256

Сергей Георгиевич Коротков, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: kafedra-TEE@yandex.ru

Александр Александрович Уманский, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: umanskii@bk.ru
SPIN-код: 2374-4553

Михаил Викторович Темлянцев, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0001-7985-5666
SPIN-код: 6169-5458

Information about the authors:

Elena N. Temlyantseva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Acting Head of the Chair “Thermal Power and Ecology”, Siberian State Industrial University
E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru
SPIN-код: 9096-4256

Sergei G. Korotkov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Thermal Power and Ecology”, Siberian State Industrial University
E-mail: kafedra-TEE@yandex.ru

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

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0001-7985-5666
SPIN-код: 6169-5458

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

Поступила в редакцию 21.08.2024
 После доработки 29.08.2024
 Принята к публикации 01.09.2024

Received 21.08.2024
 Revised 29.08.2024
 Accepted 01.09.2024

Краткое сообщение

УДК 621:538.911:538.951

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-47-52

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ
РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ Э90ХАФ ПРИ НАГРЕВЕ ПОД ПРОКАТКУ**

© 2024 г. А. В. Пимахин, Т. Н. Осколкова, А. С. Симачев, М. В. Темлянцев,
Е. Н. Темлянцева, Е. М. Запольская

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

Аннотация. Представлены результаты лабораторных исследований процессов обезуглероживания рельсовой стали марки Э90ХАФ при нагреве до температур 800 – 1250 °С. Глубину видимого обезуглероженного слоя стали определяли металлографическим методом. При проведении лабораторных экспериментов использовали образцы размером 10 × 10 × (2 ÷ 26) мм. Нагрев образцов проводили в электрической печи сопротивления СУОЛ-0,25.1/12,5-И1 с нагревателями из карбида кремния в атмосфере воздуха. Нагрев проводили до температур 800, 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 и 1250 °С и выдерживали при постоянной температуре в течение 10, 30 и 50 мин. Установлены и научно обоснованы температурные интервалы, для которых характерна различная динамика формирования обезуглероженного слоя. В температурном интервале 800 – (1000 ÷ 1050) °С наблюдается увеличение глубины видимого обезуглероженного слоя от 0 до 0,15 ÷ 0,24 мм. При температурах (1000 ÷ 1050) – 1200 °С и времени выдержки 30 и 50 мин происходит формирование обезуглероженного слоя глубиной до 0,57 и 0,72 мм, увеличение температур более 1200 – 1250 °С сопровождается его снижением до 0,40 и 0,52 мм. Для времени выдержки 10 мин при температурах 1200 – 1250 °С глубина обезуглероженного слоя стабилизируется на уровне 0,27 мм. Полученные данные рекомендуются для разработки металлосберегающих температурных режимов нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах при производстве рельсовой продукции с регламентированной глубиной видимого обезуглероженного слоя.

Ключевые слова: рельсовая сталь, нагрев под прокатку, обезуглероживание стали

Для цитирования: Пимахин А.В., Осколкова Т.Н., Симачев А.С., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н., Запольская Е.М. Исследование процессов обезуглероживания рельсовой стали Э90ХАФ при нагреве под прокатку. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):47–52. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-47-52](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-47-52)

Short report

**INVESTIGATION OF DECARBURIZATION PROCESSES E90HAF RAIL STEEL WHEN
HEATED FOR ROLLING**

© 2024 A. V. Pimakhin A.V., T. N. Oskolkova, A. S. Simachev, M. V. Temlyantsev,
E. N. Temlyantseva, E. M. Zapol'skaya

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

Abstract. The results of laboratory studies of decarburization processes of E90HAF grade rail steel when heated to temperatures of 800 – 1250 °C. are presented. The depth of the visible decarbonized steel layer was determined by metallographic method. During laboratory experiments, samples with a size of 10-10 (2 ÷ 26) mm were used. The samples were heated in an electric furnace of resistance SUOL-0.25.1/12.5-I1 with silicon carbide heaters in an air atmosphere. Heating was carried out to temperatures of 800, 850, 900, 950, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200

and 1250 °C and kept at a constant temperature for 10, 30 and 50 minutes. Temperature ranges have been established and scientifically substantiated, for which different dynamics of the formation of a decarbonized layer are characteristic. In the temperature range of 800 – (1000 ÷ 1050) °C, an increase in the depth of the visible carbonized layer is observed from 0 to 0.15 – 0.24 mm. At temperatures (1000 ÷ 1050) – 1200 °C and a holding time of 30 and 50 minutes. A decarbonized layer is formed with a depth of up to 0.57 and 0.72 mm, an increase in temperatures of more than 1200 – 1250 °C is accompanied by its decrease to 0.4 and 0.52 mm. For a holding time of 10 minutes at temperatures of 1200 – 1250 °C, the depth of the decarbonized layer is stabilized at 0.27 mm. The obtained data are recommended for the development of metal-saving temperature regimes for heating continuously cast blanks in methodical furnaces in the production of rail products with a regulated depth of the visible decarbonized layer.

Keywords: rail steel, heating for rolling, decarburization of steel

For citation: Pimakhin A.V., Oskolkova T.N., Simachev A.S., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N., Zapol'skaya E.M. Investigation of decarburization processes of E90AF rail steel during heating for rolling. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):47–52. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-47-52](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-47-52)

Железнодорожные рельсы для стран с развитой сетью железных дорог являются металлопродукцией, имеющей стратегическое значение [1]. Их качество предопределяет безопасность железнодорожных перевозок, пропускную и провозную способность линий, расходы на содержание пути [2; 3]. Тенденции повышения нагрузок на ось и грузонапряженности в грузовом железнодорожном движении, увеличения скоростей пассажирских поездов приводят к расширению сортамента рельсовой продукции, повышению требований к качеству, комплексу эксплуатационных свойств рельсов и совершенствованию технологий их производства [4 – 8].

Одним из дискуссионных вопросов является влияние обезуглероженного слоя на эксплуатационные свойства рельсов. Формирование обезуглероженного слоя в основном происходит при нагреве непрерывнолитых заготовок в методических печах [9]. Это связано с взаимодействием углерода, содержащимся в стали, с окислительной атмосферой печи. При прокатке происходит трансформация обезуглероженного слоя в результате пластической деформации металла и взаимодействия с воздушной атмосферой. Глубина видимого обезуглероженного слоя в конечной металлопродукции предопределяется интенсивностью процессов окисления (угара) стали. Практический интерес представляют металлосберегающие режимы нагрева, обеспечивающие минимизацию глубины обезуглероженного слоя в рельсовой металлопродукции [10; 11]. Для разработки таких режимов необходима информация о кинетике процессов окисления и обезуглероживания для сталей соответствующих марок, а также о температурно-временных условиях нагрева. В развитие работ [12, 13] проведено исследование процессов обезуглероживания рельсовой стали марки Э90ХАФ (содержание элементов, % (по массе): 0,83 – 0,95 С; 0,75 – 1,25 Мн; 0,25 – 0,60 Si; 0,20 – 0,60 Cr; 0,08 – 0,15 V; 0,010 – 0,020 N; менее 0,020 Р; менее 0,020 S; менее 0,004 Al), применяемой для производства

дифференцированно термоупрочненных рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости категории ДТЗ70ИК [7; 12].

Для определения глубины видимого обезуглероженного слоя применяли металлографический метод. При проведении лабораторных экспериментов использовали образцы размером 10 × 10 × (23 ÷ 26) мм. Образцы нагревали до температур 800 – 1250 °C (интервал 50 °C) в электропечи сопротивления. После нагрева проводили выдержку продолжительностью 10, 30 и 50 мин [12].

Зависимость глубины δ видимого обезуглероженного слоя исследуемой марки стали от температуры t и времени τ выдержки (при постоянной температуре) построена по результатам экспериментальных данных (рис. 1). Представлена микроструктура (рис. 2) обезуглероженных слоев в образцах при времени выдержки 50 мин и различных температурах нагрева.

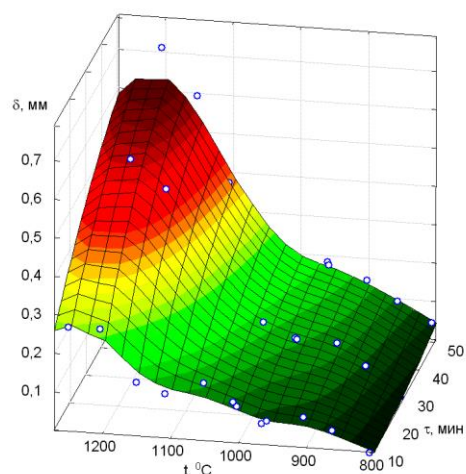


Рис. 1. Зависимость глубины δ видимого обезуглероженного слоя исследуемой марки стали от температуры t и времени τ выдержки

Fig. 1. The dependence of the depth δ of the visible decarbonized layer of the studied steel grade on the temperature t and the holding time τ

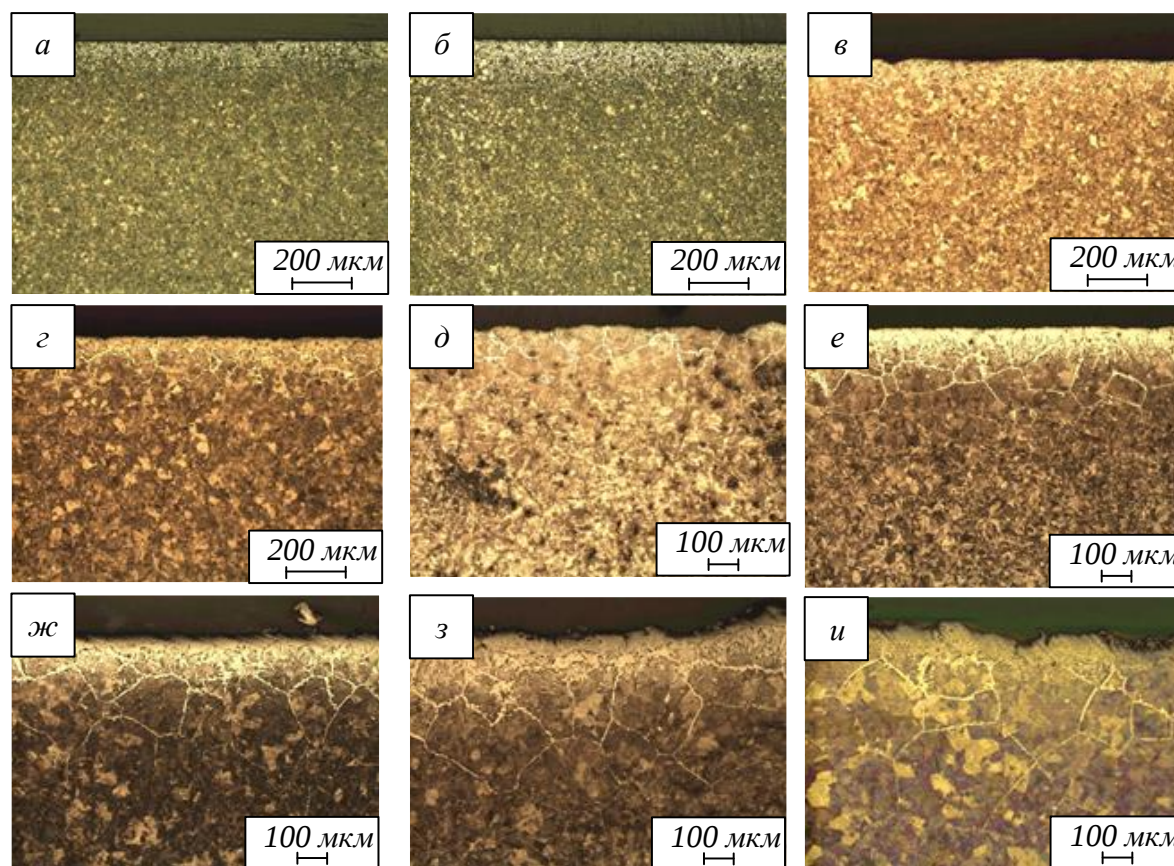


Рис. 2. Микроструктура обезуглероженных слоев в образцах при времени выдержки 50 мин. и температурах нагрева 855 (а), 900 (б), 959 (в), 1001 (г), 1051 (д), 1104 (е), 1151 (ж), 1204 (з) и 1250 °C (и)

Fig. 2. Microstructure of decarbonized layers in samples at a holding time of 50 min. and heating temperatures of 855 (а), 959 (в), 1001 (г), 1051 (д), 1104 (е), 1151 (ж), 1204 (з) and 1250 °C (и)

Анализ данных показывает, что на графике зависимости глубины обезуглероженного слоя от температурно-временного фактора можно выделить три характерные области (медленный и интенсивный рост, снижение глубины). В температурном интервале 800 – (1000 ÷ 1050) °C наблюдается увеличение параметра δ от 0 до 0,15 – 0,24 мм. При температурах (1000 ÷ 1050) – 1200 °C и времени выдержки 30 и 50 мин происходит формирование обезуглероженного слоя глубиной до 0,57 и 0,72 мм. Увеличение температур более 1200 – 1250 °C сопровождается снижением величины δ до 0,40 и 0,52 мм. Для времени выдержки 10 мин при температурах 1200 – 1250 °C глубина обезуглероженного слоя стабилизируется на уровне 0,27 мм.

Для всех исследованных температурных интервалов увеличение времени выдержки приводит к росту величины δ . Наиболее сильно этот эффект проявляется при температуре 1150 °C: при времени выдержки 10 мин, величина δ составляет 0,14 мм, а при 50 мин – 0,6 мм (то есть в 4,3 раза больше).

Наличие характерных интервалов связано с особенностями химического состава рельсовой стали марки Э90ХАФ, микролегированной ванадием и азотом, а также с кинетикой протека-

ния процессов окисления и обезуглероживания. В области температур 800 – (1000 ÷ 1050) °C присутствие карбонитридов ванадия V(C, N) до их растворения способствует замедлению процессов обезуглероживания [14 – 16]. Однако, в этом температурном интервале скорость протекания процессов обезуглероживания несколько превышает скорость процессов окисления, в связи с этим глубина обезуглероженного слоя непрерывно увеличивается.

Далее с ростом температуры происходит растворение карбонитридов ванадия [17] и интенсификация процессов обезуглероживания. При температурах (1000 ÷ 1050) – 1200 °C скорость процессов обезуглероживания значительно выше, чем окисления. В связи с этим глубина обезуглероженного слоя увеличивается достаточно интенсивно, а рост продолжительности выдержки способствует этому явлению.

В третьем интервале при температурах 1200 – 1250 °C разность скоростей процессов окисления и обезуглероживания становится меньше, это приводит к снижению глубины видимого обезуглероженного слоя, так как он, окисляясь, переходит в окалину.

Выводы

Исследована кинетика высокотемпературного обезуглероживания рельсовой стали марки Э90ХАФ. Установлены и научно обоснованы температурные интервалы, для которых характерна различная динамика формирования обезуглероженного слоя. Полученные данные рекомендуются для разработки металлосберегающих температурных режимов нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах при производстве рельсовой продукции с регламентированной глубиной видимого обезуглероженного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Karl-Otto Edel, Grigori Budnitzki, Thomas Schnitzer. *Schienenfehler 1. Beanspruchung und Schädigung von Eisenbahnschienen*. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2021:606. <http://doi.org/10.1007/978-3-662-58660-0>
- Шур Е.А. *Повреждения рельсов*. Москва: Интекст. 2012:192.
- Воробьева Е.Е., Ходырев Ю.А. Анализ выхода остродефектных рельсов на Восточно-Сибирской железной дороге. *Транспортная инфраструктура Сибирского региона*. 2019;1:424–429.
- Yuriev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubanikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. Structure and Properties of Lengthy Rails after Extremely Long-Term Operation. *Materials Research Forum LLC*. 2021:187. <https://doi.org/10.21741/9781644901472>; EDN:RDMSOE.
- Konieczny J., Labisz K. Structure and properties of the S49 rail after a long term outdoor exposure. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022;16(2):280–290. <http://doi.org/10.12913/22998624/147275>; EDN: HSXFSS.
- Panab R., Chen Y., Lan H., Shiju E.; Ren R. Investigation into the microstructure evolution and damage on rail at curved tracks. *Wear*. 2022;504–505:204420. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204420>; EDN: OVAQDV.
- Полевой Е.В., Юнин Г.Н., Головатенко А.В., Темлянцев М.В. Новейшие разработки рельсовой продукции в АО «ЕВРАЗ ЗСМК». *Сталь*. 2019;7:55–58.
- Polevoi E.V., Yunin G.N., Temlyantsev M.V. differential heat treatment of rails by means of rolling heat. *Steel in Translation*. 2016;46(10):692–700.
- Темлянцев М.В., Гаврилов В.В., Корнева Л.В., Сюсюкин А.Ю., Темлянцев Н.В. Нагрев под прокатку непрерывно литых заготовок рельсовой электростали. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2005;6:51–53.
- Темлянцев М.В., Колотов Е.А., Сюсюкин А.Ю., Гаврилов В.В. Разработка технологии нагрева рельсовых заготовок в методической печи с шагающими балками. *Сталь*. 2006;12:33–35.
- Kanematsu Y., Uehigashi N., Matsui M., Noguchi S. Influence of a decarburised layer on the formation of microcracks in railway rails: on-site investigation and twin-disc study. *Wear*. 2022;504–505:204427. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204427>; EDN: WPLUPV.
- Пимахин А.В., Осолкова Т.Н., Кузнецова О.В., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н., Запольская Е.М. Исследование угара рельсовой стали Э90ХАФ при нагреве под прокатку. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;2(48):136–140.
- Темлянцев М.В., Старииков В.С., Темлянцев Н.В., Сюсюкин А.Ю. Исследование окисления и обезуглероживания сталей для рельсов и рельсовых накладок при нагреве под прокатку. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2004;8:36–38.
- Langneborg R., Hutchinson B., Siweski T., Zajac S. *The role of vanadium in microalloyed steels*. Sweden, Swerea KIMAB. 2014:95.
- Lagneborg R., Siwecki T., Zajac S., Hutchinson B. The Role of Vanadium in Microalloyed Steels. *Scand. J. of Metallurgy*. 1999;28 (5):186–241
- Smirnov L.A., Dobuzhskaya A.B., Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Belokurova E.V. Transport steels microalloyed with vanadium and nitrogen. *Steel in Translation*. 2020;50 (6):407–414.
- Odesskii P.D., Smirnov L.A., Parshin V.A., Kirichkov A.A. Nitrogen as a microalloying element in steel for metallic structures. *Steel in Translation*. 2015;45:5:378–389.

REFERENCES

- Karl-Otto Edel, Grigori Budnitzki, Thomas Schnitzer. *Schienenfehler 1. Beanspruchung und Schädigung von Eisenbahnschienen*. Wiesbaden: Springer Vieweg. 2021:606. <http://doi.org/10.1007/978-3-662-58660-0>
- Shur E.A. *Damage to the rails*. Moscow: Intext. 2012:192. (In Russ.).
- Vorob'eva E.E., Khodyrev Yu.A. Analysis of the output of severely defective rails on the East Siberian Railway. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona*. 2019;1:424–429. (In Russ.).
- Yuriev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubanikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. *Structure and Properties of Lengthy Rails after Extremely Long-Term Operation*. Materials Research Forum LLC. 2021:187.

- <https://doi.org/10.21741/9781644901472>;
EDN:RDMSOE.
5. Konieczny J., Labisz K. Structure and properties of the S49 rail after a long term outdoor exposure. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2022;16(2):280–290. <http://doi.org/10.12913/22998624/147275>;
EDN: HSXFSS.
 6. Panab R., Chen Y., Lan H., Shiju E.; Ren R. Investigation into the microstructure evolution and damage on rail at curved tracks. *Wear*. 2022;504-505:204420. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204420>;
EDN: OVAQDV.
 7. Polevoi E.V., Yunin G.N., Golovatenko A.V., Temlyantsev M.V. The latest developments in rail products at EVRAZ ZSMK JSC. *Stal'*. 2019;7:55-58. (In Russ.).
 8. Polevoi E.V., Molokanov R.N., Borisov A.S., Yunusov A.M., Bessonova O.V. The experience of EVRAZ ZSMK in the production of rails for heavy traffic for export. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2024;6:18–20. (In Russ.).
 9. Temlyantsev M.V., Gavrilov V.V., Korneva L.V., Syusyukin A.Yu., Temlyantsev N.V. Heating for rolling continuously cast billets of electric rail steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2005;6:51–53. (In Russ.).
 10. Temlyantsev M.V., Kolotov E.A., Syusyukin A.Yu., Gavrilov V.V. Development of technology for heating rail billets in a methodical furnace with walking beams. *Stal'*. 2006;12:33–35. (In Russ.).
 11. Kanematsu Y., Uehigashi N., Matsui M., Noguchi S. Influence of a decarburised layer on the formation of microcracks in railway rails: on-site investigation and twin-disc study. *Wear*. 2022;504–505:204427. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204427>;
EDN: WPLUPV.
 12. Pimakhin A.V., Oskolkova T.N., Kuznetsova O.V., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N., Zapol'skaya E.M. Investigation of carbon monoxide of e90haf rail steel during heating for rolling. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;2 (48):136–140. (In Russ.).
 13. Temlyantsev M.V., Starikov V.S., Temlyantsev N.V., Syusyukin A.Yu. Investigation of oxidation and decarburization of steels for rails and rail plates during heating under rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2004;8:36–38. (In Russ.).
 14. Langneborg R., Hutchinson B., Siweski T., Zajac S. The role of vanadium in microalloyed steels. Sweden, Swerea KIMAB. 2014:95.
 15. Lagneborg R., Siwecki T., Zajac S., Hutchinson B. The Role of Vanadium in Microalloyed Steels. *Scand. J. of Metallurgy*. 1999;28 (5):186–241
 16. Smirnov L.A., Dobuzhskaya A.B., Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Belokurova E.V. Transport steels microalloyed with vanadium and nitrogen. *Steel in Translation*. 2020;50 (6):407–414.
 17. Odesskii P.D., Smirnov L.A., Parshin V.A., Kirichkov A.A. Nitrogen as a microalloying element in steel for metallic structures. *Steel in Translation*. 2015;45:5:378–389.

Сведения об авторах

Александр Васильевич Пимахин, ведущий специалист по дополнительному профессиональному образованию Центра дополнительного профессионального образования, Сибирский государственный индустриальный университет

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

E-mail: oskolkovatiana@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-1310-1284

SPIN-код: 9969-4805

Артем Сергеевич Симачев, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: simachev_as@mail.ru

Михаил Викторович Темлянец, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0001-7985-5666

SPIN-код: 6169-5458

Елена Николаевна Темлянцева, к.т.н., доцент, заведующая кафедрой теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

SPIN-код: 9096-4256

Екатерина Михайловна Запольская, преподаватель кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8098-5895

SPIN-код: 7302-2751

Information about the authors:

Aleksandr V. Pimakhin, a leading specialist in additional professional education at the Center for Additional Professional Education, Siberian State Industrial University

Tat'yana N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

E-mail: oskolkovatiana@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-1310-1284

SPIN-код: 9969-4805

Artem S. Simachev, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Acting Head of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology*, Siberian State Industrial University
E-mail: simachev_as@mail.ru

Mikhail V. Temlyantsev, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology*, Siberian State Industrial University
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0001-7985-5666
SPIN-код: 6169-5458

Elena N. Temlyantseva, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Acting Head of the Chair “Thermal Power and Ecology”*, Siberian State Industrial University
E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru
SPIN-код: 9096-4256

Ekaterina M. Zapol'skaya, *Lecturer of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology*, 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 21.08.2024

После доработки 29.08.2024

Принята к публикации 01.09.2024

Received 21.08.2024

Revised 29.08.2024

Accepted 01.09.2024

Оригинальная статья

УДК 622.749

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-53-65

**РАЗРАБОТКА И РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННЫХ УГОЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В СИБИРСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ИНДУСТРИАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

© 2024 г. В. И. Мурко, Ю. Е. Прошунин, М. В. Темлянцев, Е. Н. Темлянцева,
К. В. Беляев

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

Аннотация. Статья посвящена юбилею кафедры теплоэнергетики и экологии (90 лет). Приводятся научные результаты, полученные в области инновационных угольных технологий, в том числе при участии сотрудников кафедры. Основные исследования выполнены в экспериментальной лаборатории, созданной при реализации проекта «Разработка технологии и создание пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса, работающего на отходах углеобогащения». Разработаны технико-экономические обоснования создания миниТЭЦ на отходах углеобогащения обогатительных фабрик АО «УК «Кузбассразрезуголь» и других угольных компаний, перевода угольных котлов котельных на водоугольное топливо и бизнес-план по созданию технологического комплекса по частичной замене пылеугольного топлива водоугольным топливом, приготовленным из угольных шламов ОФ, на теплоэнергетических объектах ЕВРАЗ ЗСМК. Представлены основные технологические направления, развиваемые Центром инновационных угольных технологий (ЦИУТ) СибГИУ в области углеобогащения и переработки угля, которые связаны с экологически безопасными способами утилизации тонкодисперсных угольных шламов с использованием технологий водоугольного топлива и окускования (брикетирования), дообогащения методом масляной грануляции, а также принципиально новые – ожижение угля путем экстремальных механохимических и электрофизических воздействий на водоугольную суспензию. Описаны результаты по разработке и созданию локальных энергоисточников путем использования газификации бурых и низкометаморфизированных каменных углей. Показана возможность экологически чистой утилизации золошлаковых отходов и породных отвалов обогатительных фабрик. Представлены разработки уникального оборудования ЦИУТ (бикамерная вибромельница, реактор-смеситель, фильтры грубой и тонкой очистки, насос-активатор, адиабатическая вихревая камера сжигания и др.) для приготовления и эффективного сжигания водоугольного топлива на основе угля и тонкодисперсных угольных шламов.

Ключевые слова: инновационные угольные технологии, отходы углеобогащения, водоугольное топливо, угольный шлам, масляная грануляция, газификация водоугольной суспензии, газификация кускового угля, международное сотрудничество

Благодарности: авторы выражают признательность специалистам Центра инновационных угольных технологий Сибирского государственного индустриального университета и ООО «Научно-производственный центр "Сибэкотехника"» за предоставленные материалы.

Финансирование: Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00728).

Для цитирования: Мурко В.И., Прошунин Ю.Е., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н., Беляев К.В. Разработка и развитие инновационных угольных технологий в Сибирском государственном индустриальном университете. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):53–65. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-53-65](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-53-65)

Original article

CREATION AND DEVELOPMENT OF INNOVATIVE COAL TECHNOLOGIES AT THE SIBERIAN STATE INDUSTRIAL UNIVERSITY

© 2024 V. I. Murko, Y. E. Proshunin, M. V. Temlyantsev, E. N. Temlyantseva, K. V. Belyaev

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

Abstract. The article is dedicated to the anniversary of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology (90 years). The scientific results obtained in innovative areas of technology, including with the participation of the department staff, are presented. The main studies were carried out in the experimental laboratory created during the implementation of the high-tech project "Development of technology and creation of a pilot model of an operating energy-generating complex operating on coal washing waste". Feasibility studies have been developed for the creation of a mini CHPP on coal washing waste from the washing plants of JSC «Kuzbassrazrezugol» and other southern enterprises, the transfer of coal boilers of boiler houses of washing plants (WPP) to water-coal fuel and a business plan for the creation of technological complexes for partial replacement of pulverized coal fuel with water-coal fuel prepared from southern WPP sludge at the thermal power facilities of EVRAZ ZSMK. The article presents the main technological directions developed by the Center of Innovative Coal Technologies (CICT) of SibSIU in the field of coal beneficiation and coal processing related to environmentally friendly methods of utilization of fine coal sludge (FCS) using coal-water fuel (CWF) technologies and agglomeration (briquetting), additional enrichment, oil granulation method, as well as a fundamentally new one - coal oxidation using extreme mechanomechanical and electrophysical effects on coal-water suspension chemistry. The article describes the results of development and creation of local energy sources using gasification of brown and low-metamorphosed hard coals. The possibility of utilization of environmentally friendly ash and slag waste and rock dumps of enrichment plants is shown. The developments of unique equipment of the Central Institute of High Technologies (bi-chamber vibratory mill, reactor-mixer, coarse and fine filters, pump-activator, adiabatic vortex combustion chamber, etc.) for heating and efficient combustion of coal-water fuel based on both coal and FCS are presented. Within the framework of international scientific and technical cooperation, the Institute of High Technologies of the Academy of Sciences of Heilongjiang and the Heilongjiang University of Science and Technology have been signed.

Keywords: Department anniversary, innovative coal technologies, coal enrichment waste, coal-water fuel, coal sludge, oil granulation, gasification of coal-water suspension, gasification of coal

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the colleagues of the Center of Innovative Coal Technologies and the Scientific and Production Center "Sibecotechnika" for providing the materials for the article.

Funding: The work was carried out with the support of the Russian Science Foundation No. 23-29-00728.

For citation: Murko V.I., Proshunin Y.E., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N., Belyaev K.V. Creation and development of innovative coal technologies at the Siberian State Industrial University. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):53–65. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-53-65](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-53-65)

Введение

Защита окружающей среды от загрязнений промышленных предприятий, рациональная и безопасная добыча, транспортировка и потребление ископаемых топлив очень важны для Кемеровской области – Кузбасса, ведь от них зависят здоровье граждан, численность населения, а также эффективность экономической деятельности региона. В настоящее время особое внимание уделяется развитию технологий, способствующих росту угледобычи, повышению эффективности перера-

ботки угля и снижению негативного воздействия угольной отрасли на окружающую среду. Сибирский государственный индустриальный университет во взаимодействии с научно-исследовательскими институтами и организациями (ВНИИГидроуголь, Новокузнецкое отделение института ВНИИПИгидротрубопровод, ООО НПЦ «Сибэко-техника») успешно развивает тематику экологически чистых угольных технологий. Главным достижением в этой области можно считать успешную реализацию в 2010 – 2012 гг. совместно с



Рис. 1. Экспериментальная лаборатория СибГИУ

Fig. 1. SibGIU Experimental Laboratory

ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой» высокотехнологичного проекта «Разработка технологии и создание пилотного образца автоматизированного энергогенерирующего комплекса, работающего на отходах углеобогащения». В рамках этого проекта была создана экспериментальная лаборатория (рис. 1), позволяющая исследовать в стендовых условиях процессы приготовления, гидротранспортирования, хранения и сжигания водоугольных суспензий, полученных на основе различного сырья (угля, промпродукта, угольных шламов). Созданная лаборатория позволяет также решать научно-технологические задачи в области обогащения угля и других полезных ископаемых, переработки золошлаковых отходов. Фактически в настоящее время в СибГИУ создан научно-технологический кластер по комплексному использованию угля и продуктов его переработки с получением новых продуктов: водоугольного топлива, углеуголемасляной суспензии, углемасляного гранулята, комбинированных топливных и технологических брикетов, полукокса, генераторного и синтез-газа, угольной нефти и др. [1 – 3].

Указанные выше научные направления реализуются созданным в университете Центром инновационных угольных технологий (ЦИУТ).

Лабораторное оснащение Центра включает в себя оборудование:

- для обогащения угля и угольных шламов;
- для переработки угля, включая его дробление и классификацию;
- для приготовления суспензионного водоугольного топлива (ВУТ) как на основе рядового угля и его отсевов, промпродукта, так и тонкодисперсных отходов углеобогащения (бикамерная вибромельница, реактор-смеситель, фильтры грубой и тонкой очистки, насос-активатор);
- для гидротранспортирования полученного «жидкого» угля по трубопроводу и его хранения в емкостях;
- для получения углемасляного гранулята и, на его основе, углеводомаляной суспензии;
- для получения брикетов на основе угля, тонкодисперсных отходов углеобогащения, углемасляного гранулята и др.;
- для сжигания полученных видов топлива в котельной установке с топливной адиабатической камерой слоевого и вихревого типов;
- для глубокой переработки углеводомаляной суспензии с получением синтетической угольной нефти;
- получения твердеющей закладки на основе породы углеобогатительных фабрик и золошла-

Характеристика топлива, приготовленного на основе фильтр-кеков ОФ
Table 1. Characteristics of fuel prepared on the basis of filter cakes OF

Показатель	Ед. изм.	Технологические комплексы				
		ОФ «Кедровская»	ОФ «Коксовая-Бачатская»	ОФ «Краснобродская-Коксовая»	ОФ «Энергетическая»	
		28.09.2021.	13.10.2021	18.10.2021	06.10.2021	26.10.2021
Грансостав						
0,355 – 1,0 мм	%	0,4	0,1	0,3	0,5	–
0,250 – 0,355 мм	%	0,3	0,7	1,5	0,7	0,1
0,071 – 0,250 мм	%	14,9	23,3	21,4	17,4	13,6
0 – 0,071 мм		84,4	75,9	76,8	81,4	86,3
Массовая доля твердой фазы	%	58,3	58,5	57,8	57,7	58,3
Зольность твердой фазы	%	29,3	22,0	25,3	21,2/21,2	21,2
Эффективная вязкость при скорости сдвига 81 с ⁻¹	мПа·с	356	119	148	252	341
Низшая теплота сгорания	ккал/кг (МДж/кг)	3026 (12,6)	3482 (14,5)	3206 (13,4)	3483 (14,5)	3525 (14,7)
Энергоемкость приготовления	кВт·ч/т	15,0	15,0	15,0	не более 10,0	15,0
Себестоимость приготовления / в т.ч. стоимость добавки	руб./т	450/150	450/150	450/150	не более 400/150	450/150

ковых отходов (ЗШО), золы угольных теплоэлектростанций (ТЭЦ), государственных районных электростанций (ГРЭС) и котельных, в том числе при сжигании ВУТ;

– для получения гидросмеси на основе породы и ЗШО для заполнения выработанных карьеров при их рекультивации.

Центр имеет современную углехимическую лабораторию, а также пользуется аналитическим оборудованием центра коллективного пользования «Материаловедение», где проводятся различные виды анализа углей и продуктов их переработки [4].

Основные результаты

При участии работников и студентов кафедры теплоэнергетики и экологии на базе ЦИУТ проводятся исследования в рамках выполняемых грантов и хоздоговоров.

Ниже представлены основные научные и практические результаты разработки и внедрения по различным направлениям.

Утилизация тонкодисперсных угольных шлаков

Для решения проблемы накопления токсичных тонких угольных шламов на обогатительных фабриках предложена технология приготовления и сжигания ВУТ, полученного на основе тонкодисперсных отходов углеобогащения. В качестве

примера в табл. 1 и 2 представлены результаты приготовления и сжигания ВУТ ОФ АО УК «Кузбассразрезуголь».

Разработанные технология и оборудование для утилизации угольных шламов путем приготовления на их основе водоугольного топлива и его сжигания вихревым способом обеспечивают:

- необходимые структурно-реологические характеристики;
- статическую стабильность;
- высокую эффективность сжигания с уровнем вредных выбросов существенно ниже допустимых значений [5].

По результатам выполненных исследований разработано предварительное технико-экономическое заключение создания котельного модуля на ВУТ производительностью 7,56 МВт (6,5 Гкал/ч), собственной миниТЭЦ мощностью 6 и 12 МВт и строительства альтернативной котельной на ВУТ взамен угля мощностью 11,223 МВт (9,65 Гкал/ч). В указанных исследованиях активное участие принимали студенты кафедры В.В. Вишняк и Е.К. Щеголев, которые успешно выступили на молодежном XI Инновационном Конвенте «Кузбасс: образование, наука, инновации» [6].

На АО УК «Кузбассразрезуголь» предусматривается внедрение рассматриваемой технологии при строительстве новых объектов по обогащению угля.

Результаты сжигания опытных партий ВУТ, приготовленного на основе фильтр-кеков ОФ
Table 2. The results of burning experimental batches of VUT prepared on the basis of filter cakes OF

Наименование параметра	Ед. изм.	Фактическое значение					
		ОФ «Кедровская»	ОФ «Коксовая-Бачатская»		ОФ «Краснобродская-Коксовая»	ОФ «Энергетическая»	
		15.10.2021	15.10.2021	26.10.2021	19.10.2021	19.10.2021	26.10.2021
Низшая теплота сгорания	ккал/кг (МДж/кг)	3026 (12,16)	3482 (14,57)	-	3206 (13,42)	3483 (14,58)	3483 (14,58)
Расход ВУТ	кг/ч	77	65	-	75	70	75
Давление ВУТ	атм. (МПа)	2,0 (0,20)	1,8 (0,18)	-	1,9 (0,19)	2,0(0,20)	2,0 (0,20)
Давление сжатого воздуха	атм. (МПа)	2,0(0,20)	1,8 (0,18)	-	1,9 (0,19)	2,0(0,20)	2,0(0,20)
Температура в топке	°С	1050	1050	-	1050	1100	1100
Температура газов на входе в котел	°С	500	500	-	500	650	620
Температура воды на входе в котел	°С	86	78	-	71	88	73
Температура воды на выходе из котла	°С	53	45	-	38	54	40
Расход воды через котел	м³/ч	4,8	4,8	-	4,8	4,8	5,0
Теплопроизводительность топки	ккал/ч	0,158	0,158	-	0,158	0,163	0,165
Температура перед циклоном	°С	167	194	192	183	198	184
Разрежение перед циклоном (статическое)	кгс/м²	-53,6	-57,7	-63,8	-51,1	-70,16	-50,73
Скорость газа перед циклоном	м/с	23,1	25,6	22,9	24,5	28,5	20,7
Расход газов							
перед циклоном	м³/ч	2607	2890	2589	2766	3222	2337
при нормальных условиях	нм³/ч	1621	1693	1506	1607	1875	1358
Содержание в дымовых газах							
O ₂	%	18,4	17,2	17,6	17,5	17,7	17,3
RO ₂	%	2,3	3,4	3,0	3,2	3,0	3,3
CO	мг/м³	86,1/375*	356/375*	170,5	161,8/375*	187,5/375*	235,2
NO	мг/м³	56,1/750*	54,9/750*	70,56	79,8/750*	79,8/750*	64,3
NO ₂	мг/м³	0/750*	2,0/750*	0	2,0/750*	2,0/750*	0
SO ₂	мг/м³	8,0/1200*	0/1200*	0	8,0/1200*	0/1200*	0
* – нормативы удельных выбросов (ГОСТ Р50831 – 95).							

Другим важным направлением утилизации угольных шламов является строительство технологических комплексов по приготовлению ВУТ при обогатительных фабриках с гидротранспортной доставкой полученного топлива на близлежащую угольную ТЭЦ (ГРЭС). Для реализации

указанного направления разработан бизнес-план по частичной замене пылеугольного топлива водоугольным топливом, доставленным гидротранспортом Западно-Сибирской ТЭЦ. При этом на промплощадке Западно-Сибирской ТЭЦ оборудуется участок приема и хранения ВУТ с насос-

ной станцией подачи топлива в существующие котлы. Существенными положительными факторами этого проекта помимо высокой экономичности (снижение стоимости топлива при замене 1 т угля на эквивалентное количество ВУТ составляет 700 руб.) являются отсутствие необходимости замены тягодутьевого оборудования ввиду только частичной замены пылеугольного топлива водоугольным (до 25 – 30 % по калорийности) и снижение вредных выбросов в дымовых газах (NO_x) до 30 %.

Одним из направлений утилизации угольных шламов является окускование с получением на их основе брикетного топлива [7; 8]. Существующая технология брикетирования с применением связующих веществ существенно повышает себестоимость процесса, поэтому использование рассматриваемой технологии для брикетирования угольных шламов экономически нецелесообразно. Большое внимание в Центре было уделено технологии брикетирования угольных шламов без использования связующих веществ [9].

Влажность a , при которой шлам переходит в относительно сыпучее состояние и создаются предпосылки для его переработки, составляет порядка 14 – 15 % [10]. Исследованиями по брикетированию угольных шламов углей различной стадии метаморфизма, проведенными специалистами СибГИУ и ООО НПЦ «Сибэкотехника», показано, что для получения прочных брикетов без использования связующих веществ влажность исходной шихты, подаваемой в брикетный пресс, должна составлять 15 – 20 %. С учетом исходной влажности угольного шлама, составляющей 20 – 45 %, разработана технологическая схема брикетирования, отличительной особенностью которой является возврат в голову процесса части высушенных брикетов (рис. 2). Таким образом, обеспечивается требуемая влажность исходной шихты для получения качественных брикетов. Кроме того, разработана технологическая линия безопасной термической сушки брикетов, изготовленных из угольных шламов с высоким выходом летучих веществ (рис. 3).

Фильтр-кек с площадки хранения подается погрузчиком в приемное устройство ленточного конвейера, которым доставляется в смеситель-брикетировщик. Одновременно из промежуточного бункера отсева сухих брикетов часть отсева подается обратно в смеситель-брикетировщик, а другая их часть подается в бункер топлива для работы теплогенератора с получением горячего агента для сушила. Сырые спрессованные брикеты вибропитателем подаются на ленточное сушило, работа которого основана на омывании

(обтекании) высушиваемых брикетов потоком сушильного агента. Одновременно на ленточное сушило подается сушильный агент.

Высушенные брикеты ленточным конвейером передаются в бункер готовых брикетов; далее брикеты направляются потребителю.

В качестве сушильного агента применяется смесь дымовых газов теплогенератора и отработанного сушильного агента. Эта смесь имеет температуру не выше 200 °С и пониженную концентрацию кислорода.

Сушильный агент циркулирует по замкнутому контуру (рис. 3). Соответствующая количеству добавляемых дымовых газов часть сушильного агента сбрасывается через дымовую трубу в атмосферу, а основная масса смешивается с дымовыми газами теплогенератора, температура смеси доводится до 200 °С и эта смесь направляется в качестве рабочего сушильного агента в сушильный агрегат. В теплогенераторе в качестве топлива используется ВУТ, приготовленное из фильтр-кека обогатительной фабрики. В дымовую трубу дымососом подается только часть отработанного сушильного агента.

Для предотвращения загрязнения атмосферы при возможном пылении, а также при непредвиденном выделении летучих веществ из брикетов (например, при отказе контролирующих приборов и повышении температуры сверх 220 °С), сушильный агрегат дополнительно оборудуется аспирационной системой. Аспирационный поток направляется в топку теплогенератора в качестве дутьевого воздуха. Пыль и непредвиденно выделившиеся летучие вещества содержатся в дутьевом воздухе в ничтожно малых концентрациях, поэтому исключаются пожаро- и взрывоопасность, но при попадании в пространство топки угольная пыль и возможно содержащиеся в воздухе летучие вещества угля неизбежно сгорят. Таким образом, исключается загрязнение атмосферы при работе сушильного агрегата, предлагаемая схема сушки обеспечивает взрыво- и пожаробезопасную сушку брикетов из угольных отходов марки Г.

Для обеспечения рабочих параметров сушильного агента дымовые газы теплогенератора смешиваются с отработанным сушильным агентом. Управление процессом смешивания отработанного сушильного агента с горячими газами теплогенератора осуществляется по температуре сушильного агента на входе в сушилку. Заданное значение температуры поддерживается регулированием количеств сжигаемого топлива в теплогенераторе или сбрасываемого в трубу отработанного сушильного агента [11].

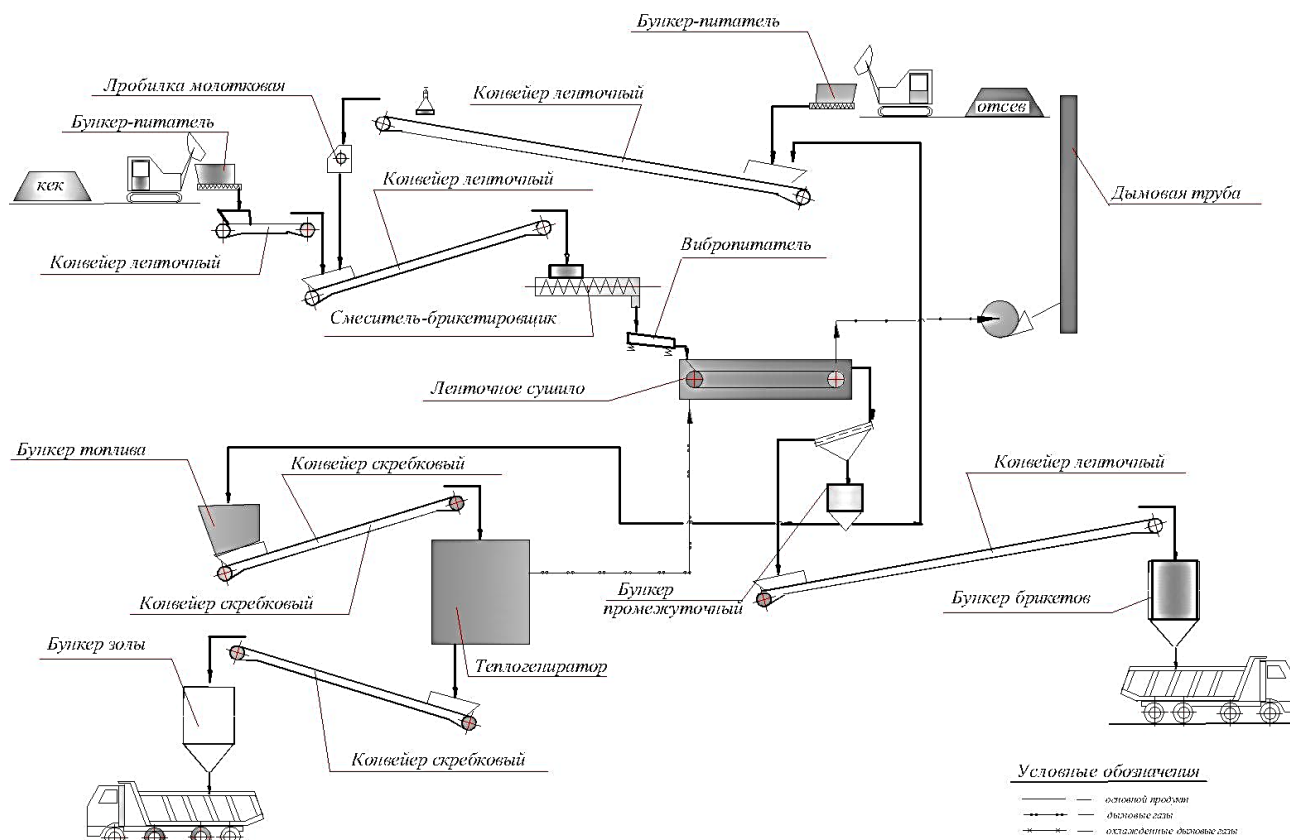


Рис. 2. Технологическая схема брикетирования угольных шламов без связующих веществ
Fig. 2. Technological scheme of briquetting coal sludge without binders

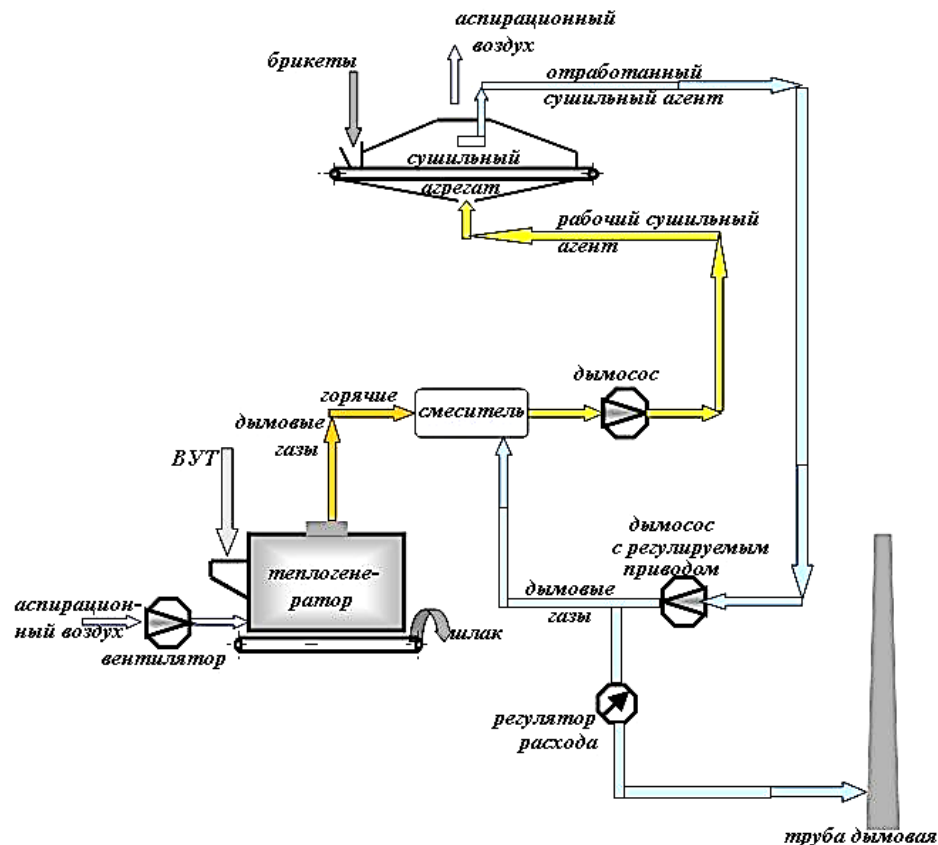


Рис. 3. Схема термической сушки брикетов
Fig. 3. Scheme of thermal drying of briquettes

Таким образом, выполненными исследованиями подтверждено, что одним из перспективных направлений переработки отходов является брикетирование шламов без применения связующих добавок.

Альтернативным решением, развиваемым в ЦИУТ, является применение для дообогащения тонких угольных шламов углемасляной грануляции. Эти исследования проводились с участием студентов кафедры Е.А. Глобиной, Н.С. Бобровникова, А.С. Кулаковского. Материалы исследований по этой теме были опубликованы в научных журналах [12]. Экспериментами подтверждена возможность обогащения тонких угольных шламов методом масляной грануляции с получением малозольного (порядка 10 %) гранулята (при исходной зольности шламов 30 % и более). Предварительные исследования показали возможность получения из масляного гранулята топливных брикетов, которые обладают необходимой механической прочностью для их дальнейшего транспортирования и использования потребителем. Процесс брикетирования позволяет снизить влажность получаемого масляного гранулята в два – три раза и отказаться от процесса обезвоживания брикетов. Показано, что добавка к углю до 8 % масляного агента изменяет коксуюемость в лучшую сторону, увеличивая механическую прочность и снижая выход коксовой мелочи [13].

Газификация кускового угля марок Б2 и Д

Для решения проблемы использования низкосортных и малокалорийных углей предложена технология переработки угля в местах его добычи с использованием процесса газификации добываемого полезного ископаемого и получением конкурентноспособных продуктов с высокой добавленной стоимостью, в том числе углеводородного газа, жидких смолистых веществ, полукочка [14; 15]. При этом образующийся твердый остаток (шлак) не выбрасывается с газами в атмосферу, а организованно выгружается в специальный накопитель [16]. Учитывая наличие значительного количества местных теплопотребителей, целесообразна организация локальных экологически чистых теплоисточников без создания дорогостоящих теплотрасс.

На основе проведенных экспериментальных исследований предложена технология слоевой газификации кускового угля, в которой в качестве газифицирующего агента используются воздух и водяной пар (паровоздушная газификация). Исследования проводились на разработанном и изготовленном экспериментальном образце газогенератора с использованием углей марок Б2 и Д. Герметичность полости газификатора достигнута

специальной конструкцией загрузочного и разгрузочного устройств. В процессе газификации был получен топливный газ с теплотой сгорания до 7,0 МДж/м³, который может эффективно сжигаться в топке водогрейного или парового котла. Исследования проводились с участием студентов кафедры В.В. Вишняка и Е.К. Щеголева. На основании проведенных исследований были разработаны и изготовлены полупромышленные образцы газификаторов непрерывного действия слоевого типа с тепловой производительностью по газу 1,5 МВт (рис. 4) [16].

Ожижение угля путем экстремальных механохимических и электрофизических воздействий на водоугольную суспензию

В рамках выполнения гранта РНФ № 23-29-00728 была разработана и создана установка для ожижения угля путем экстремальных механохимических и электрофизических воздействий на водоугольную суспензию (ВУС).

Стендовая установка состоит из двух блоков: подготовки и механохимической обработки и обработки ВУС электроимпульсными разрядами. Важным усовершенствованием установки является совмещение блоков подготовки и механохимической обработки ВУС и блока обработки ВУС электроимпульсными разрядами на единой технологической площадке.

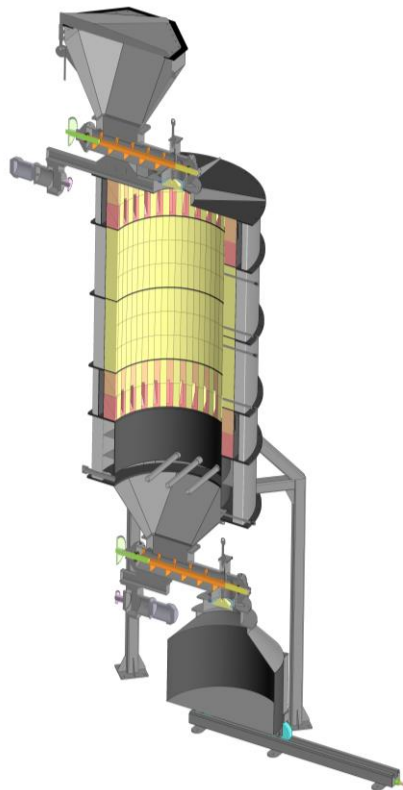


Рис. 4. Общий вид слоевого газификатора
Fig. 4. General view of the layered gasifier

Блок подготовки и механохимической обработки ВУС включает емкость с мешалкой для предварительного смешивания измельченного угля с водным раствором реагента-пластификатора (при необходимости) и реагентом-растворителем, насос-кавитатор, разделительную емкость, емкость для сбора обработанного продукта, запорную арматуру [17].

Блок обработки ВУС электроимпульсными разрядами содержит источник высоковольтных импульсов, узел обработки суспензии с разрядной камерой, насос перекачки ВУС через узел обработки с измерительным участком (расход, давление), сборную емкость. Конструкция разрядной камеры выполнена таким образом, чтобы обеспечить максимально возможный объем прокачиваемой через камеру пробы суспензии.

Исследованиями установлено, что при подготовке ВУС возможно снизить ее зольность до 2,0 – 2,5 % на сухую массу с использованием метода масляной грануляции, при этом крупность частиц составляет не более 50 мкм. Были проведены эксперименты по обработке образцов ВУС разрядами сериями по 10 и 20 мин при частоте следования импульсов 2 – 3 имп./с и расходе ВУС 0,2 м³/ч. После обработки отобраны пробы газа, которые исследованы на газовом хроматографе. Полученные результаты показали, что при обработке ВУС электроимпульсным способом выделены оксид углерода СО и водород в соотношении около 1:1, что соответствует синтез-газу [18]. Отмечено также снижение содержания органической массы угля после обработки.

Полученные результаты позволяют осуществить наиболее полный перевод органической массы ВУС в газожидкую фазу.

Перспективные технологические направления по переработке угля

Наиболее перспективными технологическими направлениями переработки угля являются:

- получение сверхчистых угольных концентратов с зольностью менее 2,0 – 2,5 %;
- газификация водоугольных суспензий с зольностью более 20 %;
- увеличение эффективности влияния пылеугольного топлива, вдуваемого в домны за счет применения полукокса, полученного из бурых углей;
- трансформация углей низкой стадии метаморфизма в угли высокой стадии метаморфизма;
- газификация жидких продуктов коксования с получением синтез-газа.

Международное сотрудничество

Центр инновационных угольных технологий осуществляет международное научно-

техническое сотрудничество с институтами и университетами Китая. В рамках международной деятельности в 2024 году было подписано два соглашения о сотрудничестве в области научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с Институтом высоких технологий Академии наук провинции Хэйлунцзян (г. Харбин) и Хэйлунцзянским научно-техническим университетом.

В рамках подписанных Соглашений с китайскими партнерами ведутся научно-исследовательские работы, направленные на улучшение структурно-реологических характеристик ВУС [19]. На созданной с участием сотрудников ЦИУТ пилотной установке в цехе приготовления ВУС углехимического комбината г. Хэган (провинция Хэйлунцзян, КНР) были проведены испытания работы экспериментального образца насоса-активатора. Насос-активатор конструкции ООО НПЦ «Сибэкотехника» был изготовлен на Кузнецком экспериментальном механическом заводе в г. Новокузнецк. Принцип работы аппарата заключается в обработке поступающей водоугольной суспензии путем воздействия сдвигового деформирования на жидкую структуру в зазоре 0,5 мм между двумя перфорированными (неподвижным и подвижным) дисками при относительной частоте вращения 1500 об./мин. Результаты испытаний показали, что эффективная вязкость ВУС (при средней массовой доле твердой фазы 65,6 %) при однократном проходе через насос-активатор снижается до 37,3 % (от 365 до 229 мПа·с, при скорости сдвига 100 с⁻¹). Кроме того, установлено, что срединный диаметр частиц угля в ВУС при проходе через насос-активатор снижается на 16,7 % (с 87,6 до 73 мкм), а стабильность суспензии повышается более чем в два раза. Положительные результаты позволили приступить к разработке промышленного образца насоса-активатора производительностью не менее 40 м³/ч [20].

Заключение

Научно-техническая деятельность ЦИУТ, сотрудников кафедры «Теплоэнергетика и экология» и ООО НПЦ «Сибэкотехника» направлена на создание современных и эффективных инновационных угольных технологий. В процессе проведения научно-исследовательских работ активное участие принимают студенты кафедры. За последние годы опубликовано более 10 научных статей, издано 2 учебных пособия и 2 монографии, сделано более 15 докладов на Всероссийских и Международных научно-технических конференциях. Подготовлена и защищена 1 кандидатская диссертация по теме «Совершенствование технологии сжигания водоугольного топ-

лива в теплогенераторах малой и средней мощности», специальность 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика (Карпенко В.И).

Осуществляется активное международное научно-техническое сотрудничество с институтами и университетами Китая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перекрест Н.В., Затеякин О.А. Теоретические подходы к определению понятия устойчивого развития горнодобывающего предприятия. *Вестник СибГИУ*. 2023;1(43):116–126.
2. Zhang Yuxing, Xu Zhiqiang, Liu Dinghua, Chen Yang, Zhao Wei, Ren Guanlin. The influence of water occurrences in CWSs made of lignite and bituminous coal on slurring performances. *Powder Technology*. 2022;398:117150. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117150>
3. Kundu T., Das S.K., Biswal D.K., Angadi S.I. Mineral Beneficiation and Processing of Coal. *Clean Coal Technologies*. 2021;1–38. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68502-7_1
4. Мурко В.И., Протопопов Е.В., Темлянцев М.В., Чаплыгин В.В., Литвинов Ю.А., Волков М.А. Разработка и создание инновационного научно-образовательного кластера по комплексному использованию угля и продуктов его переработки. В кн.: *Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2019. Труды XII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Новокузнецк, 28–30 ноября 2019 года, под общ. ред. С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева*. Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2019:48–53.
5. Мурко В.И., Федяев В.И., Карпенко В.И., Шаньшин А.Е., Мухтаров А.Т. О возможности использования тонкодисперсных отходов углеобогащения ОФ «Энергетическая» в качестве основы для котельного топлива. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2020;13(6):667–668. EDN: MJCVGB. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0254>
6. Вишняк В.В., Щеголев Е.К. Разработка технологических решений локальных тепловых источников на основе слоевых газогенераторов непрерывного действия. В кн.: *Кузбасс: образование, наука, инновации. Материалы XI Инновационного конвента, Кемерово, 08 февраля 2023 года*. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2023:17–19.
7. Wang N., Shen R., Wen Z., De Clercq D. Life cycle energy efficiency evaluation for coal development and utilization. *Energy*. 2019;179:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.111>
8. Guo Pibin, Kong Juan, Guo Yanshan, Liu Xiuli. Identifying the influencing factors of the sustainable energy transitions in China. *Journal of Cleaner Production*. 2019 215:757–766. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.107>
9. Баранова М.П. Трансформация органической массы низкосортных углей и отходов углеобогащения. В кн.: *Енисейская теплофизика. Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 28 – 31 марта 2023 года*. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023:480–482. EDN PGWFGV
10. Zhang Y., Xu Z., Tu Y., Wang Y., Li J. Study on properties of coal-sludge-slurry prepared by sludge from coal chemical industry. *Powder Technology*. 2020;366:552–559. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.03.005>
11. Xiao J., Wang S., Duan X., Ye S., Wen J., Zhang Z. Rheological models for temperature and concentration dependencies of coal water slurry. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2022;42(4):1185–1203. <https://doi.org/10.1080/19392699.2019.1696780>
12. Глобина Е.А., Бобровников Н.С., Мурко В.И., Кулаковский А.С. Совершенствование технологии обогащения угольных шламов с получением различных товарных продуктов. В кн.: *Инновационный конвент "Кузбасс: образование, наука, инновации". Материалы XII Инновационного конвента, Кемерово, 08 февраля 2024 года*. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2024:23–26. EDN: KIOTVN
13. Filippov S.P., Keiko A.V. Coal gasification: at the crossroad. technological factors. *Thermal Engineering*. 2021;68:209–220. <https://doi.org/10.1134/S0040601521030046>
14. Oh Gunung, Ra Ho Won, Yoon Sung Min, Mun Tae Young, Seo Myung Won, Lee Joe-Goo, Yoon Song Jun. Syngas production through gasification of coal water mixture and power generation on dual-fuel diesel engine. *Journal of the Energy Institute*. 2019;92(2): 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.01.009>
15. Xin L., An M., Feng M., Li K., Cheng W., Liu W., Hu X., Wang Z., Han L. Study on pyrolysis characteristics of lump coal in the context of underground coal gasification. *Energy*. 2021;237:121626. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121626>
16. Вишняк В.В., Карпенко В.И., Мурко В.И. Обоснование создания локальных тепловых источников на основе угольных газогенера-

- торов непрерывного действия. В кн.: *Енисейская теплофизика: Тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 28 – 31 марта 2023 года / Отв. за выпуск Д.В. Платонов*. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2023:29–31. EDN: TBILYW
17. Shadrin E.Yu., Anufriev I.S., Butakov E.B., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Maltsev L.I., Sharypov O.V. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. *Fuel*. 2021;303:121182. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121182>
 18. Nussupbekov R., Khassenov A.K., Karabekova D.ZH., Nussupbekov U.B., Stoev M., Bolatbekova M.M. Coal pulverization by electric pulse method for water coal fuel. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2019;4(96):80–84. EDN XXGTGX. <https://doi.org/10.31489/2019Ph4/80-84>.
 19. Qian X., Wang D., Wang J., Chen S. Resource curse, environmental regulation and transformation of coal-mining cities in China. *Resources Policy*. 2019;74:101447. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101447>
 20. Мурко В.И., Федяев В.И., Карпенко В.И., Вежан В.Г., Яо Л., Ли Д., Жень Л., Чжоу Г. Результаты обработки водоугольной суспензии насосом-активатором. В кн.: *Углекислотная и экология Кузбасса: XII Международный российско-казахстанский симпозиум. Сборник тезисов докладов, Кемерово, 03 – 06 июля 2023 года*. Кемерово: Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук, 2023:64. EDN: DFPTWL
- ### REFERENCES
1. Perekrest N.V., Zatepyakin O.A. Theoretical approaches to defining the concept of sustainable development of a mining enterprise. *Bulletin of SibGIU*. 2023;1(43):116–126. (In Russ.).
 2. Zhang Yuxing, Xu Zhiqiang, Liu Dinghua, Chen Yang, Zhao Wei, Ren Guanlin. The influence of water occurrences in CWSs made of lignite and bituminous coal on slurring performances. *Powder Technology*. 2022;398:117150. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117150>
 3. Kundu T., Das S.K., Biswal D.K., Angadi S.I. Mineral Beneficiation and Processing of Coal. *Clean Coal Technologies*. 2021;1–38. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68502-7_1
 4. Murko V.I., Protopopov E.V., Temlyantsev M.V., Chaplygin V.V., Litvinov Yu.A., Volkov M.A. Development and creation of an innovative scientific and educational cluster for the integrated use of coal and its processing products. In: *Automation systems in education, science and production. AS'2019: Proceedings of the XII All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation)*, Novokuznetsk, November 28 – 30, 2019, S.M. Kulakov, L.P. Myshlyaev eds. Novokuznetsk: Publishing House of the SibGIU Center, 2019:48–53. (In Russ.).
 5. Murko V.I., Fedyaev V.I., Karpenok V.I., Shanshin A.E., Mukhtarov A.T. On the possibility of using fine-dispersed waste from the enrichment of Energeticheskaya as a basis for boiler fuel. *Journal of the Siberian Federal University. Engineering and technology*. 2020;13(6):667–668. (In Russ.). EDN: MJCVGB. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0254>
 6. Vishnyak V.V., Shchegolev E.K. Development of technological solutions for local thermal sources based on continuous-acting layered gas generators. In: *Kuzbass: education, science, innovation: Materials of the XI Innovation Convention, Kemerovo, February 08, 2023*. Kemerovo: Kemerovo State University, 2023:17–19. (In Russ.).
 7. Wang N., Shen R., Wen Z., De Clercq D. Life cycle energy efficiency evaluation for coal development and utilization. *Energy*. 2019;179:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.111>
 8. Guo Pibin, Kong Juan, Guo Yanshan, Liu Xiuli. Identifying the influencing factors of the sustainable energy transitions in China. *Journal of Cleaner Production*. 2019 215:757–766. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.107>
 9. Baranova M.P. Transformation of organic matter of low-grade coals and coal washing waste. In: *Yenisei thermal physics. Abstracts of the I All-Russian scientific conference with international participation, Krasnoyarsk, March 28 – 31, 2023*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2023:480–482. (In Russ.). EDN PGWFGV
 10. Zhang Y., Xu Z., Tu Y., Wang Y., Li J. Study on properties of coal-sludge-slurry prepared by sludge from coal chemical industry. *Powder Technology*. 2020;366:552–559. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.03.005>
 11. Xiao J., Wang S., Duan X., Ye S., Wen J., Zhang Z. Rheological models for temperature and concentration dependencies of coal water slurry. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2022;42(4):1185–1203. <https://doi.org/10.1080/19392699.2019.1696780>

12. Globina E.A., Bobrovnikov N.S., Murko V.I., Kulakovskiy A.S. Improving the technology of coal sludge enrichment to produce various commercial products. In: *The Innovation Convention "Kuzbass: education, science, innovation": Materials of the XII Innovation Convention, Kemerovo, February 08, 2024*. Kemerovo: Kemerovo State University, 2024:23–26. (In Russ.). EDN: KIOTVN
13. Filippov S.P., Keiko A.V. Coal Gasification: At the Crossroad. Technological Factors. *Thermal Engineering*. 2021;68:209–220. <https://doi.org/10.1134/S0040601521030046>
14. Oh Gunung, Ra Ho Won, Yoon Sung Min, Mun Tae Young, Seo Myung Won, Lee Joe-Goo, Yoon Song Jun. Syngas production through gasification of coal water mixture and power generation on dual-fuel diesel engine. *Journal of the Energy Institute*. 2019;92(2): 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.01.009>
15. Xin L., An M., Feng M., Li K., Cheng W., Liu W., Hu X., Wang Z., Han L. Study on pyrolysis characteristics of lump coal in the context of underground coal gasification. *Energy*. 2021;237:121626. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121626>
16. Vishnyak V.V., Karpenko V.I., Murko V.I. Justification for the creation of local thermal sources based on continuous coal-fired gas generators. In: *Yenisei thermophysics: Abstracts of the I All-Russian Scientific Conference with international participation, Krasnoyarsk, March 28 – 31, 2023 / Ed. for the issue of D.V. Platonov*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2023:29–31. (In Russ.). EDN: TBILYW
17. Shadrin E.Yu., Anufriev I.S., Butakov E.B., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Maltsev L.I., Sharypov O.V. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. *Fuel*. 2021;303:121182. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121182>
18. Nussupbekov R., Khassenov A.K., Karabekova D.ZH., Nussupbekov U.B., Stoev M., Bolatbekova M.M. Coal pulverization by electric pulse method for water coal fuel. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2019;4(96):80–84. EDN XXGTGX. <https://doi.org/10.31489/2019Ph4/80-84>
19. Qian X., Wang D., Wang J., Chen S. Resource curse, environmental regulation and transformation of coal-mining cities in China. *Resources Policy*. 2019;74:101447. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101447>
20. Murko V.I., Fedyaev V.I., Karpenko V.I., Important V.G., Yao L., Li D., Zheni L., Zhou G. Results of treatment of coal-water suspension with a pump activator. In: *Coal Chemistry and Ecology of Kuzbass: XII International Russian-Kazakh Symposium. Collection of abstracts, Kemerovo, 03 – 06 July 2023*. Kemerovo: Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2023:64. (In Russ.). EDN: DFPTWL

Сведения об авторах

Василий Иванович Мурко, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, директор Центра инновационных угольных технологий, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: sib_eco@mail.ru
SPIN-код: 1092-6052

Юрий Евгеньевич Прошунин, д.т.н., профессор кафедры открытых горных работ и электромеханики, директор Института горного дела и геосистем, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: proshunin_ue@mail.ru
SPIN-код: 3991-6628

Михаил Викторович Темлянец, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0001-7985-5666
SPIN-код: 6169-5458

Елена Николаевна Темлянцева, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru
SPIN-код: 9096-4256

Кирилл Вадимович Беляев, магистрант кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: belkir1976@mail.ru

Information about the authors:

Vasily I. Murko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Director of the Center of Innovative Coal Technologies, Siberian State Industrial University
E-mail: sib_eco@mail.ru
SPIN-код: 1092-6052

Yuri E. Proshunin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Opencast Mining and Electromechanics, Director of the Institute of Mining and Geosystems, Siberian State Industrial University
E-mail: proshunin_ue@mail.ru
SPIN-код: 3991-6628

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0001-7985-5666

SPIN-код: 6169-5458

Elena N. Temlyantseva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

SPIN-код: 9096-4256

Kirill V. Belyaev, Graduate student of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

E-mail: belkir1976@mail.ru

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

Поступила в редакцию 02.09.2024

После доработки 06.09.2024

Принята к публикации 09.09.2024

Received 02.09.2024

Revised 06.09.2024

Accepted 09.09.2024

Оригинальная статья

УДК 502.52(210):502.13

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-66-76

**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В КАЧЕСТВЕ
УДОБРЕНИЙ И РЕКУЛЬТИВАНТА**

© 2024 г. А. С. Водолеев, М. В. Темлянцева, И. С. Семина, К. И. Домнин

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

Аннотация. Представлена информация об осадках сточных вод (ОСВ) городских очистных сооружений как о перспективном нетрадиционном ресурсе для питания растений и их применения в рекультивации техногенно-нарушенных земель. Приведен обзор использования осадков сточных вод в агротехнике возделывания сельскохозяйственных культур и в качестве почвоулучшителя при проведении рекультивации в России и за рубежом, приведены агротехнические характеристики ОСВ. Осадки сточных вод являются твердыми коммунальными и промышленными отходами, которые накапливаются на иловых площадках очистных сооружений и в отвалах. В них содержатся в значительной массе элементы минерального питания (азот, калий, фосфор, кальций и другие), что делает их ценными удобрениями для выращивания сельскохозяйственных культур. Их использование может значительно сокращать или заменять введение в почву других удобрений. При использовании осадков сточных вод в качестве удобрений необходимо учитывать содержание тяжелых металлов, нормативы которых в разных странах отличаются. Наиболее жесткие требования разработаны в Норвегии, особенно к такому элементу, как кадмий. Описаны результаты полевых исследований по рекультивации отходов железорудного обогащения и железосодержащих шламов металлургического производства. Отмечено отсутствие самозарастания техногенных территорий, вызванное высокой фитотоксичностью отходов металлургического производства. В результате размещения ОСВ улучшены физические и агрохимические характеристики поверхностного слоя рекультивированных участков хвосто- и шламохранилищ, обеспечено появление на них травяного покрова, начиная с первого года размещения этого почвоулучшителя. За счет поглощения выщелачиваемых металлов в органоминеральные комплексы использование ОСВ позволяет снизить токсичность материала в железосодержащих отходах. Обоснована экологическая и экономическая целесообразность использования органических отходов городских очистных сооружений в сельскохозяйственной и рекультивационной практиках.

Ключевые слова: осадки сточных вод, техногенно-нарушенные земли, хвостохранилище, шламохранилище, рекультивация, тяжелые металлы, фитотоксичность железосодержащих отходов, почвоулучшители

Для цитирования: Водолеев А.С., Темлянцева М.В., Семина И.С., Домнин К.И. Возможности использования осадков сточных вод в качестве удобрений и рекультиванта. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):66–76. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-66-76](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-66-76)

Original article

**POSSIBILITIES OF USING SEWAGE SLUDGE AS FERTILIZERS AND
RECLAMATION AGENTS**

© 2024 A. S. Vodoleev, M. V. Temlyantsev, I. S. Semina, K. I. Domnin

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

Abstract. The article presents information on sewage sludge (WWS) of municipal treatment facilities as a promising non-traditional resource for plant nutrition and their use in the reclamation of technogenically disturbed lands.

An overview of the use of sewage sludge in agricultural technology for cultivating agricultural crops and as a soil improver during reclamation in Russia and abroad is given, and agrotechnical characteristics of sewage sludge are given. Sewage sludge is solid municipal and industrial waste that accumulates on sludge beds of treatment facilities and in dumps. They contain significant amounts of mineral nutrition elements such as nitrogen, potassium, phosphorus, calcium, etc., which makes them valuable fertilizers for growing crops. Their use can significantly reduce or replace the introduction of other fertilizers into the soil. When using sewage sludge as fertilizer, it is necessary to take into account the content of heavy metals, the standards of which differ in different countries. The most stringent requirements for their content have been developed in Norway, especially for such an element as cadmium. The results of the author's field research on the reclamation of iron ore processing waste and iron-containing sludge from metallurgical production are described. The absence of self-overgrowth of technogenic areas, caused by the high phytotoxicity of metallurgical waste, was noted. As a result of the placement of WWS, the physical and agrochemical characteristics of the surface layer of the reclaimed areas of the tailings and sludge storage ponds were improved, and the appearance of grass cover on them was ensured, starting from the first year of placement of this soil improver. Due to the absorption of leachable metals into organomineral complexes, the use of WWS makes it possible to reduce the toxicity of the material on iron-containing waste. The environmental and economic feasibility of using organic waste from urban wastewater treatment plants in agricultural and reclamation practices is substantiated.

Keywords: sewage sludge, technogenically disturbed lands, tailings storage facility, sludge storage facility, reclamation, heavy metals, phytotoxicity of iron-containing waste, soil improvers

For citation: Vodoleev A.S., Temlyantsev M.V., Semina I.S., Domnin K.I. Possibilities of using sewage sludge as fertilizers and reclamation agent. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):66–76. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-66-76](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-66-76)

Введение

В настоящее время в результате хозяйственной деятельности человека в биосферу поступает огромное количество различных загрязнителей, в том числе и тяжелых металлов (ТМ). Почва – одна из ключевых составляющих биосферы, которая часто служит буфером, предотвращая или ограничивая загрязнение других элементов биосферы. Проникновение тяжелых металлов в биосферу приводит к их накоплению в почве в концентрациях, значительно превышающих фоновые значения, что снижает плодородность почвы и негативно влияет на животный и растительный мир и в итоге на человека. Загрязнение почв наносит также и экономический ущерб, так как сельскохозяйственная продукция, полученная с техногенных территорий, часто содержит ТМ и запрещена к реализации. В результате ухудшения качества земель из-за потери гумуса сельскохозяйственная деятельность на таких территориях становится невозможной или нецелесообразной [1; 2]. Чтобы компенсировать эти потери, необходимо добавлять вещества в почву в виде органических удобрений. В сельском хозяйстве чаще всего используют продукты жизнедеятельности животных, торф, компосты и другие. Кроме того, можно использовать озерный ил (сапропель) и твердые коммунальные и промышленные отходы (осадки сточных вод (ОСВ)).

Торф – это разлагающиеся растительные остатки, которые скапливаются в болотах. Он представлен волокнистой или пластичной массой

черного или бурого цвета. Низинный торф обычно используется в качестве удобрения, но его применение в чистом виде неэффективно.

Озерный ил (сапропель) – это современные иловые отложения пресноводных водоемов, которые разлагаются под слоем воды. Его химический состав зависит от места отбора и может содержать от 10 до 85 % органического вещества, а также азот (до 6 %), фосфор (0,25 – 5,16 %), кальций (0,98 – 41,00 %) и другие вещества. Внесение сапропеля в почву ведет к увеличению содержания гумуса, азота, фосфора, калия и кальция, улучшает агрегатный состав, водно-физические и химические свойства, а также активизирует деятельность почвенных микроорганизмов. Все это приводит к увеличению плодородия почв и урожайности сельскохозяйственных культур. Особенно рекомендуется применять сапропели на бедных песчаных почвах, поскольку они содержат большое количество илистых частиц. В результате, сапропели могут значительно улучшить качество почвы.

Осадки сточных вод – это твердые коммунальные и промышленные отходы, которые накапливаются на иловых площадках очистных сооружений и в отвалах. В России ежегодно образуется около 2,6 млн т ОСВ, содержащих в среднем 25 % сухого вещества, 0,50 % общего азота, 0,40 % P_2O_5 , 0,02 % K_2O , 15,00 % органического вещества. По своему воздействию на плодородие почв и урожайность сельскохозяйственных культур схожи с другими органическими

удобрениями. Однако, ОСВ могут содержать значительное количество тяжелых металлов, поступающих из стоков промышленных предприятий. Рекомендуется вносить ОСВ в дозе 4 – 6 т/га в год или 15 т/га раз в три года.

Бытовые сточные воды содержат значительные количества таких веществ как азот, калий, фосфор, кальций и другие, которые являются ценными удобрениями для сельскохозяйственных культур. Поэтому использование сточных вод и образующихся при их очистке осадков может сокращать или заменять введение в почву других удобрений. За рубежом в зависимости от региональных геоэкологических особенностей стран в агропроизводстве используют от 10 до 90 % накапливающихся ОСВ, в среднем в Западной Европе от 30 до 40 % [3].

ОСВ в сельском хозяйстве

В Великобритании свыше 40 % образующихся осадков сточных вод применяется в сельском хозяйстве [4]. При этом одной из главных проблем, связанных с их размещением в почве, является наличие загрязняющих веществ, среди которых можно выделить тяжелые металлы (ТМ) и патогенные микроорганизмы.

Принятие решения о почвенном размещении ОСВ базируется на результатах тщательного изучения их состава и свойств [5 – 7]. Когда речь идет об утилизации осадков сточных вод в сельском хозяйстве, необходимо учитывать не только содержание твердых частиц, но и уровень общего и аммонийного азота, фосфора, калия, кальция и органических загрязнителей [8 – 13]. Американские специалисты считают, что только те ОСВ, у которых содержание твердых частиц менее 30 % и не превышает ПДК по содержанию пестицидов, ароматических углеводородов и тяжелых металлов, могут быть использованы в качестве удобрения [14 – 16].

В штате Калифорния (США) были разработаны нормы внесения ОСВ при выращивании сельскохозяйственных культур, учитывая фитотоксичность ТМ [17]. Многолетние полевые опыты в Японии на песчано-суглинистых и песчаных почвах показали улучшение физико-химических свойств почв и незначительное накопление меди и ТМ [18].

В Норвегии установлены жесткие требования к использованию ОСВ в сельском хозяйстве, в том числе ограничения на содержание Cd, Pb, Hg и Zn [19]. Аналогичные нормы установлены и для озеленения (рекультивации). В таблице представлены данные о предельно допустимом содержании металлов в ОСВ, используемые в качестве удобрения в сельском хозяйстве в различных странах [20]. Там же приведены средние

результаты исследования химического состава ОСВ г. Новокузнецка.

Осадки сточных вод г. Новокузнецк в соответствии с требованиями к содержанию тяжелых металлов пригодны не только для озеленения, но и для сельского хозяйства. На первое место выходит фоновое содержание металлов на территории планируемого размещения ОСВ.

Установлены значительные отличия в поглощении ТМ разными видами растений, где наиболее высокий уровень характерен для овощных растений, тогда как зерновые и технические культуры способны накапливать твердые металлы в значительно меньшей степени [21; 22]. Культуры можно расположить по степени накопления кадмия в следующем порядке (начиная с наибольшего): свекла > латук > морковь > редис > томаты > картофель > пшеница > овес > бобы > кукуруза. Подбирая культуры для возделывания на почвах, удобряемых осадками сточных вод, можно в 60 раз изменить количество кадмия, попадающего в пищевой рацион. Допустимый уровень поступления кадмия в организм (100 мкг/сут) достигается при внесении не более 1,7 кг/га кадмия в почву с кислым pH и не более 5 кг/га в почву с нейтральной реакцией [23]. При выращивании только зерновых культур допустимое внесение кадмия можно увеличить до 17 кг/га без риска для здоровья человека. Микроорганизмы могут служить контролем безопасного содержания тяжелых металлов в почвах. Снизить доступность тяжелых металлов, содержащихся в осадках сточных вод, для растений можно с помощью контролируемого компостирования с различными наполнителями, что позволяет связывать тяжелые металлы в устойчивые хелатные комплексы [24; 25].

Использование ОСВ в рекультивации

Исследования по использованию осадков сточных вод для восстановления промышленных отходов проводили впервые в Польше (Верхняя Силезия). Этот исследовательский проект под названием «Силезия» осуществляли совместно Агентством по охране окружающей среды США, правительством Польши и Управлением по охране окружающей среды Катовицкого воеводства [26]. Исследования, проведенные в Западной Пенсильвании, Иллинойсе, Вирджинии (США) и в Верхней Силезии, подтвердили высокую эффективность применения ОСВ для рекультивации промышленных отвалов [26]. Проект «Силезия» является демонстрационным и предназначен для определения мероприятий по снижению экологических рисков и повышению экологических возможности в районах до-

Нормы предельно допустимого содержания тяжелых металлов в осадке сточных вод (мг/кг сухого вещества), используемом в качестве удобрения в разных странах, и фактическое содержание металлов в ОСВ г. Новокузнецк по результатам собственных исследований
The norms of the maximum permissible content of heavy metals in sewage sludge (mg/kg of dry matter) used as fertilizer in different countries, and the actual metal content in the soil of Novokuznetsk according to the results of our own research

Элемента	Нормы предельно допустимого содержания элемента в разных странах								Директивы ЕЭС	Требования РФ (СанПиН 2.1.7.573 – 96)	ОСВ г. Новокузнецк
	Австрия	Бельгия	Дания	Канада	Нидерланды	Франция	ФРГ	Швеция			
Мышьяк	100	10	–	75	10	–	–	–	–	20	19
Кадмий	10	10	8	20	10	15	30	15	20	30	2
Кобальт	100	20	6 – 120	150	–	20	–	50	–	–	13
Хром	500	500	40 – 120	–	500	200	1200	1000	750	1200	136
Медь	500	500	300 – 900	–	600	1500	1200	3000	1000	1500	191
Ртуть	10	10	6	5	10	8	25	8	16	15	7
Марганец	–	500	–	–	–	500	–	–	–	2000	1669
Молибден	–	–	–	20	–	–	–	–	–	–	–
Никель	200	100	20 – 40	180	100	–	200	500	300	400	53
Свинец	500	300	485	500	500	300	1200	300	750	1000	69
Селен	–	25	–	14	–	–	–	–	–	–	–
Цинк	2000	2000	2000 – 4000	1850	2000	3000	3000	1·10 ⁴	2500	4000	837

бычи угля, производства стали, охватывающих регион Верхняя Силезия, Катовицкое производство и регион Острава (Чешская Республика). Полученные результаты позволили использовать восстановленные территории в сельском хозяйстве. Применение ОСВ способствует существенному сокращению расходов на формирование плодородной почвы и повышению результативности биологической рекультивации отвалов. Экспериментальный проект связан с фитомелиорацией отходов горнодобывающей индустрии с использованием осадков.

В г. Чикаго (США) ОСВ используют для рекультивации земель (площадь 6,2 тыс. га), нарушенных угольными разработками. На этих сельскохозяйственных угодьях выращивают кукурузу, пшеницу и многолетние травы, которые используют в кормовых целях в животноводстве. В штате Вирджиния разработали программу использования ОСВ для восстановления земель с последующим выращиванием многолетних трав на восстановленных территориях [27].

В Швеции успешно провели рекультивацию железорудных отвалов с помощью смеси ОСВ и древесной коры [28].

В Германии запатентовали метод почвенного размещения ОСВ для рекультивации свалок ТКО. На основе ОСВ создают искусственные породы с добавлением твердых промышленных отходов (зола, шлак и горелая формовочная земля). Благодаря пористости шлаков и высокой водоудерживающей способности ОСВ, такие органоминеральные субстраты способны противостоять эрозионным процессам даже при выпадении до 150 – 250 мм атмосферных осадков. В этой стране ОСВ используют при выращивании сельскохозяйственных культур, причем удалось достичь более высоких урожаев сахарной свеклы, озимой пшеницы и других зерновых культур, а также снизить затраты на их выращивание [29].

В Австрии ОСВ используются в составе минерально-органической смеси для герметизации оснований и боковых откосов полигонов и гидротехнических сооружений. Известно, что при размещении ОСВ на золошлаковых отвалах дополнительным эффектом может стать уменьшение выщелачивания тяжелых металлов за счет уменьшения их подвижности [30].

Осадки сточных вод городских очистных сооружений в течение нескольких последних десятилетий реабилитация техногенных территорий становится основным направлением в ряде европейских стран:

– в Польше (Верхняя Силезия) при восстановлении промышленных территорий, занятых отходами, а также в сельском хозяйстве;

– в Австрии в жизненном цикле полигонов ОСВ используются на этапе герметизации их оснований и боковых откосов, а также для выращивания сельскохозяйственных культур на гидротехнических сооружениях;

– в Швеции при проведении рекультивации отвалов железорудных отходов;

– в США (Западная Пенсильвания, Центральные и Южные Аппалачи; штаты Иллинойс, Вирджиния) для увеличения плодородия почв рекультивированных участков горных выработок;

– во Франции в горной местности при восстановлении нарушенного при эрозии почвенного покрова для прокладки горнолыжных трасс;

– в Германии для рекультивации свалок.

Использование осадков сточных вод для рекультивации позволяет очистить иловые площадки от складированных ОСВ, снизить затраты природных ресурсов.

За рубежом накоплен опыт использования осадков в работах по вовлечению в хозяйственный оборот выработанных торфяников для восстановления растительного покрова после окончательной грунтовой засыпки свалок, а также для борьбы с эрозией [31].

В больших городах России остро стоит вопрос утилизации и эффективного применения отходов городских очистных сооружений (ОСВ). Благодаря содержанию N, P, Ca, Mg и ряда необходимых для нормального развития микроэлементов (B, Co, Cu, Mn, Mo, Se, Zn), осадки сточных вод могут быть классифицированы как органо-минеральное азотно-фосфорное удобрение. В процессе хранения происходит образование гуминовых веществ, которые способствуют накоплению хлорофилла в листьях растений и активному росту корней. Эксперты в области рекультивации отмечают преимущества использования ОСВ перед традиционными методами (большое количество органического вещества, химическая буферность, снижающая токсичность отвалов, и высокое содержание макро- и микроэлементов, необходимых для роста растений).

Образование отвалов техногенных отходов создает экологическую угрозу землепользованию, сравнимую с добычей полезных ископаемых. Под воздействием внешних факторов (выветривания и вымывания) частицы отходов с высоким содержанием токсичных веществ, включая тяжелые металлы, загрязняют плодородный слой почвы, реки и приземные слои атмосферы, что напрямую влияет на здоровье жителей близлежащих районов.

При задержании поверхности отвалов природными материалами (плодородный слой поч-

вы, торф, перегной, древесная кора, углистые сланцы, смешанные культуры микроводорослей) [32] используют нетрадиционные почвоулучшители, в том числе промышленные отходы, одним из которых является ОСВ (отходы от очистки городских канализационных стоков и нетоксичных промышленных сточных вод) [33].

Для снижения воздействия отвалов на окружающую среду достаточно провести их озеленение. По причине высокой фитотоксичности поверхностных слоев самозарастания большинства промышленных отвалов невозможно. Для создания устойчивого растительного слоя на шламохранилище в промзоне Западно-Сибирского металлургического комбината предложено внесение органического субстрата – отходов от очистки городских сточных вод, характеризующихся высоким содержанием органической составляющей, но не находящим пока применения в сельском хозяйстве.

На протяжении более чем 20 лет на техногенных территориях проводятся комплексные экологические исследования по утилизации накопленных и вновь поступающих на иловые карты гидроочистных сооружений ОСВ. На хвостохранилище Абагурской обогатительной фабрики и шламохранилище АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») в г. Новокузнецк заложены полевые опыты по использованию ОСВ в качестве почвоулучшителя для проведения рекультивационных мероприятий. В полевых и лабораторных исследованиях участвовали Кузбасская государственная педагогическая академия (г. Новокузнецк), Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск), Западно-Сибирский испытательный центр (г. Новокузнецк), компании АО «ЕВРАЗ ЗСМК» и ЗАО «Водоканал» (г. Новокузнецк). В ходе эксперимента, проводимого в жестких условиях (фитотоксичность хвостов, ветровая эрозия, засуха), применение ОСВ способствовало формированию растительного слоя многолетних трав на рекультивируемых участках при отсутствии растительности на техногенном контроле хвостохранилища.

Субстрат Абагурского хвостохранилища характеризуется высокой степенью засоленности и фитотоксичности. Солевой состав водной вытяжки субстрата Абагурского хвостохранилища следующий: 2,74 % плотный осадок; токсичность по Cl^- и SO_4^{2-} составляет 3,4 и 3,1; содержание подвижной формы, мг экв./100 г – 0,68 HCO_3^- ; 1,04 Cl^- ; 33,43 SO_4^{2-} ; 10,10 Ca^{2+} ; 17,52 Mg^{2+} ; 6,50 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$. Фитотоксичность достигает крайне высоких показателей (6 баллов и выше). Факторами фитотоксичности является хлориды

и сульфаты, их присутствие угнетающе действует на растительность, особенно в фазе ее приживания. Главной причиной длительного существования техногенной пустыни Абагурского хвостохранилища является фитотоксичность отходов железорудного обогащения в сочетании с их высокой плотностью.

После размещения ОСВ на минеральном субстрате хвостохранилища основной задачей стало создание устойчивого фитоценоза (фитомелиорация) на нем.

Коллектив экспертов провел серию исследований на территории опытных площадок, расположенных на хвостохранилище Абагурской аглофабрики и на шламохранилище АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Результаты исследований свидетельствуют о том, что ОСВ помогают уменьшить негативное воздействие техногенных ландшафтов на растительность, повысив водообеспеченность и добавив питательные компоненты в поверхностный слой почвы.

Появление растительности на опытных участках приводит к положительному изменению почвенно-экологических и микроклиматических показателей техноземов. Токсичность техногенного субстрата уменьшается, разница суточных температур в период вегетации снижается, прилегающие участки зарастают. Одним из источников накопления гумусовых веществ является целлюлозоразрушающая микрофлора, способствующая формированию и стабилизации микробоценоза в рекультивируемом слое хвостохранилища.

Почвенно-экологическая оценка и мониторинг рекультивированных территорий показали, что в результате размещения ОСВ улучшены физические и агрохимические характеристики поверхностного слоя хвосто- и шламохранилищ, обеспечено появление на них травяного покрова, начиная с первого года размещения этого почвоулучшителя.

Использование ОСВ обеспечивает формирование дернины, одним из основных назначений которой является противозерозионная и санитарно-гигиеническая (снижающая воздействие на окружающую среду) функции.

В результате размещения осадков сточных вод на промышленных отвалах обеспечивается практическое решение двух экологически важных вопросов на техногенно-нарушенных территориях промышленных предприятий:

- создание плодородного органо-минерального субстрата (техноземов);
- нейтрализация загрязняющих веществ, поступающих со складированных отходов металлургического производства.

При использовании осадков сточных вод исходных и обработанных известью в полевых

условиях (хвостохранилище Абагурской обогатительной фабрики) было установлено, что исходные ОСВ характеризуются высокой агрономической ценностью и могут использоваться в качестве питательного материала для рекультивации. Сформированный на основе ОСВ и отходов железорудного обогащения хвостов органо-минеральный субстрат содержит питательные элементы в количестве, достаточном для обеспечения жизнедеятельности произрастающих на них растений. Использование ОСВ позволяет снизить токсичность материала хвосто- и шламоохранилищ за счет поглощения выщелачиваемых металлов в органо-минеральные комплексы.

Использование ОСВ (органических субстратов) как удобрения и рекультиванта имеет следующие преимущества:

- улучшение структуры почвы и увеличение урожайности сельскохозяйственных культур, а также повышение их качественных характеристик при использовании осадков городских сточных вод;
- обеспечение санитарной безопасности сельскохозяйственной продукции и улучшение экологической обстановки в целом, что положительно сказывается на здоровье населения и окружающей среды.

Непосредственное применение ОСВ в качестве удобрения и при рекультивации техногенно-нарушенных территорий является экономически выгодным и рациональным способом утилизации рассматриваемых отходов, позволяет значительно снизить финансовые затраты на проведении рекультивационных работ (если они используются научно обоснованным образом при определенных природных и производственных условиях). Использование ОСВ в качестве органических удобрений признано и применяется во всем мире.

Восстановление техногенно нарушенные территории – важная государственная задача, решение которой значительно улучшит экологическую ситуацию, вернет земли в оборот и создаст необходимые условия для развития различных отраслей народного хозяйства.

Рекультивация включает широкий спектр мелиоративных, лесо- и сельскохозяйственных работ по превращению нарушенных земель в плодородные, экологически сбалансированные, близкие по основным характеристикам к естественным.

При рекультивации все компоненты восстанавливаемого ландшафта воссоздаются заново: формируется рельеф, восстанавливается режим грунтовых вод, создается структура почвенного и растительного горизонта. Вновь созданная среда формирует животный мир на восстановленных территориях.

С развитием рыночных отношений организация использования нарушенных земель изменилась:

теперь приоритетными стали экономические факторы (плата за землю и используемые природные ресурсы, налоговые поступления). Это привело к переориентации системы управления городским хозяйством с административных методов на экономические.

Одним из важнейших вопросов, решаемых при разработке проекта рекультивации нарушенных земель, является подбор технологии формирования плодородного почвенного слоя с применением следующих ресурсов рекультивации:

- потенциально-плодородные породы;
- плодородный слой почвы (гумусово-аккумулятивный горизонт);
- нетрадиционные почвоулучшители, существенно изменяющие важнейшие свойства технозема [34].

Выводы

Часто нетрадиционные почвоулучшители представляют собой органические отходы, поэтому их использование в качестве удобрений выглядит наиболее перспективным. В Кемеровской обл. к числу хороших почвоулучшителей следует отнести торф, сапропели, цеолиты и осадки сточных вод.

Отдельные из них (торф, сапропель) активизируют биологические процессы в почве, в то время как другие (ОСВ и цеолиты) улучшают физические и химические свойства рекультивированного субстрата.

В связи с ограниченным количеством этих ресурсов и неравномерным локальным распространением, широкое их использование для рекультивации нарушенных земель практически невозможно.

Снижение негативного воздействия на окружающую среду может быть достигнуто двумя способами:

1. Разработка безопасных методов применения нетрадиционных удобрений (дозировка, способ внесения в почву, выбор культур и другие).
2. Улучшение качества органических отходов путем их переработки (компостирование, сбраживание).

Основные условия использования нетрадиционных почвоулучшителей включают предварительную экспертизу санитарно-гигиенического состояния, дезинфекцию, механическую и химическую подготовку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев Ю.В. *Тяжелые металлы в почвах и растениях*. Ленинград: Агропромиздат, 1987:142.

2. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. *Микроэлементы в почвах и растениях*. Москва: Мир, 1989:439.
3. Ларешин В.Г. и др. *Сохранение и повышение плодородия земель сельскохозяйственного назначения*. Москва: РУДН, 2008:172.
4. Davis R.D. Agricultural utilization of sewage sludge: A review. *J. Inst. Water and Environ. Manag.* 1989;3(4):351–355.
5. Чеботарев Н.Г., Колесниченко А.В. Опыт использования осадков сточных вод на удобрения в условиях Московской области. В кн.: *Влияние химизации земледелия на содержание тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства*. Москва, 1988:110–115.
6. Никушина Т.К., Шурина Р.Н. Использование осадков сточных вод г. Рязани как удобрения. В кн.: *Влияние химизации земледелия на содержание тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства*. Москва: Госагропромиздат, 1988:127–135.
7. Бурлаков А.А., Должененко И.Б., Скуратовская Л.М., Сальникова К.С. Использование осадка сточных вод для удобрения мелиорированных земель. В кн.: *Проблемы комплексной мелиорации земель Поволжья*. 1989:67–68.
8. Касатиков В.А., Касатикова С.М. Агрономическая эффективность и особенности применения систем удобрения на основе осадков городских сточных вод, торфа и навоза. В кн.: *Система применения удобрений для получения планируемого урожая сельскохозяйственных культур*. Горький: Госагропромиздат, 1988:29–36.
9. Касатиков В.А. Использование осадков сточных вод и компостов из твердых бытовых отходов. *Химиз. с. х.* 1989;11:29.
10. Сергиенко Л.И., Тянь В.П. Эколого-экономическая оценка использования осадка сточных вод в правобережье Саратовской области. В кн.: *Экологические проблемы сельского и водного хозяйства Поволжья. Тез. докл. науч.-практ. конф.* Саратов, 1992:17–18.
11. Лебедев Д.Л. Осадок сточных вод города Великие Луки как органическое удобрение на песчаных почвах; автореферат дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук. Великие Луки: изд. Великолук. Гос.с.-х. акад., 2003; 20 с.
12. Clapp C.E., Dowdy R.H., Larson W.E., Linden D.R., Normann C.M., Halbach T.R., Polta R.C. Utilization of municipal sewage sludge on agricultural land in Minnesota. *Amer. Soc. Agron. Annu. Meet.* 1993;Cincinnati:312.
13. Благовещенская З.К., Грачева Н.К., Могиндович Л.С., Тришина Т.А. Утилизация осадка городских сточных вод. *Химиз. с.-х.* 1989;10:73–76.
14. Vance G.F. Heavy metal concentrations in soils and plants of an abandoned coal mine five years after sludge amendment. *Amer. Soc. Agron. Annu. Meet.* 1991;Madison:422.
15. Lue-Hing C., Zenz D.R., Pietz R.J., Granato T.C. Encouraging the beneficial use of sewage sludge application to land. *Amer. Soc. Agron. Annu. Meet.* 1993;Cincinnati:321–322.
16. Webber M.D., Wang C., Topp G.C. Organic contaminants in Canadian agricultural soil. *Can. J. Soil Sci.* 1993;73(4):656.
17. Chang A.C., Granato T., Page A.M. Land application of municipal sludge – Assessing the phytotoxicity of metals. *Amer. Soc. Agron. Annu. Meet.* 1991;Madison:38.
18. Aoki M., Ichii H. Sewage sludge use in agriculture and evaluation of composting facilities. *Trans.14 th Int. Congr. Soil Sci., Kyoto, Aug.* 1990;4:210–215.
19. Paulsrud B., Nedland K.J. Strategy for land application of sewage sludge in Norway. *Water Science and Technology.* 1997;36(11):283–290.
20. Захарова М.А., Водолеев А.С., Домнин К.И. Содержание тяжелых металлов и химический состав техноземов и растений хвостохранилища ОАО Абагурской агломерационно-обогащительной фабрики, г. Новокузнецк. В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество. Металлургия – 2021. Труды XXII Международной научно-практической конференции, 10-11 ноября 2021 г.* Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021;2:163–166.
21. Касатиков В.А. Агроэкологические свойства и проблема утилизации осадков сточных вод г. Москвы. В кн.: *Технол. обраб. осадков природ. и сточных вод: Матер. семин.* Москва: Знание РСФСР. Моск. дом науч.-техн. прогр., 1990:73–79.
22. Hue N.T., Ranjith Subasinghe A. Sewage sludges in Hawaii: chemical composition and reactions with soils and plants. *Water, Air, and Soil Pollut.* 1994;72(1):265–283.
23. Hooda P.S., Alloway B.J. Sorption of Cd and Pb by selected temperate and semi-arid soils: effects of sludge application and ageing of sludged soils. *Water, Air, and Soil Pollut.* 1994;74(3-4):235–250.
24. Hattori Hiroyuki. Influence of cadmium on decomposition of sewage sludge and microbial activities in soils. *Soil Sci. and Plant Nutr.* 1989;35(2):289–299.

25. Балаганская Е.Д., Мозгова Н.П. Поиск мелиорантов для восстановления загрязненных почв. В кн.: *Тез. молод. конф. ботаников стран СНГ «Актуал. пробл. ботан.»*. Апатиты: РАН. Кол. науч. центр. Поляр. 1993:98–99.
26. Daniels W.L., Stuczynski T., Pantuck K., Pistelok F., Szymborski A. Restoration of mining wastes with sewage sludge in upper Silesia. *Poland*, 1995:115–124.
27. Skousen J., Clinger C. Sewage sludge land application program in west Virginia. *J. Soil and Water Conserv.* 1993;48(2):145–151.
28. Borgegard Sven-Olov, Rydin Hakan. Utilization of Waste products and in organic fertilizer in the restoration of iron-mine tailigs. *J. Appl. Ecol.* 1989;26(3):1083–1088.
29. Dippel Martin. Rechtliche Fragen bei der Aufbringung von Klärschlamm auf landwirtschaftliche Flächen. *Zuckerindustrie.* 1994;119(5):395–401.
30. Krishnamohan R., Herbich John B., Hossner Lloyd R., Williams Fred S. Environmental aspect of vegetation reclamation of bauxite residue disposal areas Light Metals. In: *Pros. Techn. Sess. TMS Light Metals Comm. 121 st TMS Annu. Meet.* San Diego, Calif., March 1–5, 1992. Warnendale. Calif. 1991:5–9.
31. Wilson S. A., Rahe T.M., Webber W.B. Municipal wastewater sludge as a soil amendment for revegetating final landfill cover. *J. soil water conserve.* 1985;40(3):296–299.
32. Крунчак В.Г., Пономарева Л.В., Назаренко А.В., Иванова Т.И., Трушкина А.Н., Малинин А.И. Биологическая рекультивация почв. В кн.: *Конф. «Интродукция микроорганизмов в окружающую среду»*. Москва, 17–19 мая, 1994. Москва: изд. РАН, 1994:55–56.
33. Латыпова В.З., Коспокевич И.И., Григорьян Б.Р., Ермолаева А.И. Комплексная оценка экологического состояния иловых карт городских очистных сооружений и рекомендации к их применению. В кн.: *Загрязнение окружающей среды: Проблема токсикологии и эпидемиологии*. Москва – Пермь, 11–19 мая 1993. – Пермь, 1993:74–75.
34. Берлякова О.Г., Ермак Н.Б., Линдина Л.И. Использование осадков сточных вод в рекультивации нарушенных земель. *Вестник Кемеровского государственного университета.* 2010;1:33–37.
2. Kabata-Pendias A., Pendias Kh. *Trace elements in soils and plants*. Moscow: Mir, 1989:439.
3. Lareshin V.G. et al. *Preservation and improvement of fertility of agricultural lands*. Moscow: RUDN, 2008:172. (In Russ.).
4. Davis R.D. Agricultural utilization of sewage sludge: A review. *J. Inst. Water and Environ. Manag.* 1989;3(4):351–355.
5. Chebotarev N.G., Kolesnichenko A.V. The experience of using sewage sludge for fertilizers in the conditions of the Moscow region. In: *The influence of the chemicalization of agriculture on the content of heavy metals in the soils of agricultural lands and crop production*. Moscow, 1988:110–115. (In Russ.).
6. Nikushina T.K., Shurina R.N. The use of sewage sludge in Ryazan as fertilizers. In: *The influence of the chemicalization of agriculture on the content of heavy metals in the soils of agricultural land and crop production*. Moscow: Gosagropromizdat, 1988:127–135. (In Russ.).
7. Burlakov A.A., Dolzhenenko I.B., Skuratovskaya L.M., Sal'nikova K.S. The use of sewage sludge for fertilizing reclaimed lands. In: *Problems of complex land reclamation of the Volga region*. 1989:67–68. (In Russ.).
8. Kasatnikov V.A., Kasatikova S.M. Agronomic efficiency and application features of fertilizer systems based on precipitation of urban wastewater, peat and manure. In: *The system of applying fertilizers to obtain the planned crop yield*. Gorky: Gosagropromizdat, 1988:29–36. (In Russ.).
9. Kasatnikov V.A. The use of sewage sludge and compost from solid household waste. *Khimiz. s. kh.* 1989;11:29. (In Russ.).
10. Sergienko L.I., Tyan V.P. Ecological and economic assessment of the use of sewage sludge in the right bank of the Saratov region. In: *Ecological problems of agriculture and water management of the Volga region. Tez. dokl. scientific and practical conference*. Saratov, 1992:17–18. (In Russ.).
11. Lebedev D.L. Sewage sludge of the city of Velikiye Luki as an organic fertilizer on sandy soils; avtoreferat dis. ... kandidata sel'skokhozyaistvennykh nauk. Velikiye Luki: ed. Velikiye Luki State Academy of Sciences, 2003;20. (In Russ.).
12. Clapp C.E., Dowdy R.H., Larson W.E., Linden D.R., Normann C.M., Halbach T.R., Polta R.C. Utilization of municipal sewage sludge on agricultural land in Minnesota. *Amer. Soc. Agron. Annu. Meet.* 1993;Cincinnati:312.
13. Blagoveshchenskaya Z.K., Gracheva N.K., Mogindovich L.S., Trishina T.A. Utilization of

REFERENCES

1. Alekseev Yu.V. *Heavy metals in soils and plants*. Leningrad: Agropromizdat, 1987:142. (In Russ.).

- urban wastewater sludge. *Khimiz. s.-kh.* 1989;10:73–76. (In Russ.).
14. Vance G.F. Heavy metal concentrations in soils and plants of an abandoned coal mine five years after sludge amendment. *Amer. Soc. Agron. Annu. Meet.* 1991;Madison:422.
 15. Lue-Hing C., Zenz D.R., Pietz R.J., Granato T.C. Encouraging the beneficial use of sewage sludge application to land. *Amer. Soc. Agron. Annu. Meet.* 1993;Cincinnati:321–322.
 16. Webber M.D., Wang C., Topp G.C. Organic contaminants in Canadian agricultural soil. *Can. J. Soil Sci.* 1993;73(4):656.
 17. Chang A.C., Granato T., Page A.M. Land application of municipal sludge – Assessing the phytotoxicity of metals. *Amer. Soc. Agron. Annu. Meet.* 1991;Madison:38.
 18. Aoki M., Ichii H. Sewage sludge use in agriculture and evaluation of composting facilities. *Trans. 14 th Int. Congr. Soil Sci., Kyoto, Aug.* 1990;4:210–215.
 19. Paulsrud B., Nedland K.J. Strategy for land application of sewage sludge in Norway. *Water Science and Technology.* 1997;36(11):283–290.
 20. Zakharova M.A., Vodoleev A.S., Domnin K. I. The content of heavy metals and the chemical composition of technozems and plants of the tailings storage facility of JSC Abagur agglomeration and processing plant, Novokuznetsk. In: *Metallurgy: technologies, innovations, quality. Metallurgy – 2021. Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference*, November 10–11, 2021. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2021;2:163–166. (In Russ.).
 21. Kasatkov V.A. Agroekologicheskie svoystva i problema utiliza-tsii osadkov stochnykh vod g. Moskvy. In: *Tekhnol. obrab. osadkov prirod. i stochnykh vod: Mater. semin.* Moscow: Znanie RSFSR. Mosk. dom nauch.-tekhn. progr., 1990:73–79.
 22. Hue N.T., Ranjith Subasinghe A. Segawe sludges in Hawaii: chemical composition and reactions with soils and plants. *Water, Air, and Soil Pollut.* 1994;72(1):265–283.
 23. Hooda P.S., Alloway B.J. Sorption of Cd and Pb by selected temperate and semi-arid soils: effects of sludge application and ageing of sludged soils. *Water, Air, and Soil Pollut.* 1994;74(3-4):235–250.
 24. Hattori Hiroyuki. Influence of cadmium on decomposition of sewage sludge and microbial activities in soils. *Soil Sci. and Plant Nutr.* 1989;35(2):289–299.
 25. Balaganskaya E.D., Mozgova N.P. Search for ameliorants for restoration of polluted soils. In: *Tez. young. conf. botanists of the CIS countries “Actual. prob. Botan.”*. Apatity: RAN. Kol. nauch. tsentr. Polyar. 1993:98–99. (In Russ.).
 26. Daniels W.L., Stuczynski T., Pantuck K., Pistelok F., Szymborski A. Restoration of mining wastes with sewage sludge in upper Silesia. *Poland*, 1995:115–124.
 27. Skousen J., Clinger C. Sewage sludge land application program in west Virginia. *J. Soil and Water Conserv.* 1993;48(2):145–151.
 28. Borgegard Sven-Olov, Rydin Hakan. Utilization of Waste products and in organic fertilizer in the restoration of iron-mine tailigs. *J. Appl. Ecol.* 1989;26(3):1083–1088.
 29. Dippel Martin. Rechtliche Fragen bei der Aufbringung von Klärschlamm auf landwirtschaftliche Flächen. *Zuckerindustrie.* 1994;119(5):395–401.
 30. Krishnamohan R., Herbich John B., Hossner Lloyd R., Williams Fred S. Environmental aspect of vegetation reclamation of bauxite residue disposal areas Light Metals. In: *Pros. Techn. Sess. TMS Light Metals Comm. 121 st TMS Annu. Meet.* San Diego, Calif., March 1–5, 1992. Warnendale. Calif. 1991:5–9.
 31. Wilson S. A., Rahe T.M., Webber W.B. Municipal wastewater sludge as a soil amendment for revegetating final landfill cover. *J. soil water conserve.* 1985;40(3):296–299.
 32. Krunchak V.G., Ponomareva L.V., Nazarenko A.V., Ivanova T.I., Trushkina A.N., Malinin A.I. Biological soil reclamation. In: *Conf. “Introduction of microorganisms into the environment*, Moscow, 17–19 may, 1994. Moscow: izd. RAN, 1994:55–56. (In Russ.).
 33. Latypova V.Z., Kostyukovich I.I., Grigor’yan B.R., Ermolaeva A.I. Comprehensive assessment of the ecological state of sludge maps of urban wastewater treatment plants and recommendations for their use. In: *Environmental pollution. Environment: Problems of toxicology and epidemiology.* Moscow – Perm, 11–19 May 1993. – Perm; 1993:74–75. (In Russ.).
 34. Berlyakova O. G., Ermak N. B., Lindina L. I. The use of sewage sludge in the reclamation of disturbed lands. *Vestn. Kemer. gos. un-ta.* 2010;1:33–37. (In Russ.).

Сведения об авторах

Анатолий Сергеевич Водолеев, д.с.-х.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: botanic-egf@yandex.ru
ORCID: 0009-0003-0081-2797
SPIN-код: 7243-3213

Михаил Викторович Темлянец, д.т.н., профессор, проректор по реализации стратегического проекта,

Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0001-7985-5666

SPIN-код: 6169-5458

Ирина Сергеевна Семина, к.б.н., доцент, руководитель центра «Геоэкология», Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: semina.i@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9222-0358

SPIN-код: 6543-4729

Константин Игоревич Домнин, ведущий инженер кафедры теплоэнергетики и экологии, соискатель, Сибирский государственный индустриальный университет.

E-mail: domnin_k_i@mail.ru

ORCID: 0009-0003-2257-091X

SPIN-код: 8658-4960

Information about the authors:

Anatolii S. Vodoleev, Dr. Sci. (Agr.), Prof. of the Chair "Thermal Power and Ecology", Siberian State Industrial University

E-mail: botanik-egf@yandex.ru

ORCID: 0009-0003-0081-2797

SPIN-код: 7243-3213

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

Irina S. Semina, Cand. Sci. (Biol.), Assistant Professor, Head of the Geoecology Center, Siberian State Industrial University

Email: semina.i@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9222-0358

SPIN-код: 6543-4729

Konstantin I. Domnin, Senior Engineer of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

E-mail: domnin_k_i@mail.ru

ORCID: 0009-0003-2257-091X

SPIN-код: 8658-4960

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

Поступила в редакцию 26.08.2024

После доработки 02.09.2024

Принята к публикации 05.09.2024

Received 26.08.2024

Revised 02.09.2024

Accepted 05.09.2024

Оригинальная статья

УДК 669.162.142:622.788

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-77-85

**АНАЛИЗ СТРУКТУРНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТНЫМ
РЕЛЬЕФОМ НАПЫЛЕННОГО СЛОЯ ШИХТЫ И ПОРИСТОСТЬЮ
ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ**

© 2024 г. В. М. Павловец

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

Аннотация. Проанализирована роль поверхностного рельефа зародышевых центров, полученных в процессе струйного напыления влажной шихтовой массы, в формировании пористости и структуры железорудных окатышей. Показаны возможности повышения реакционной способности окускованного металлургического продукта за счет формирования открытой пористости окатышей методом струйного напыления железорудной шихты на поверхность шихтового гарнисажа. Для анализа свойств зародышевой массы предложен фактор структурной корреляции, характеризующий связь между относительным объемом структурных углублений на поверхности напыленного слоя шихты, формирующего зародышевую массу, и пористостью зародышей. Установлены две области структурной корреляции между объемными изменениями на поверхности зародышей и пористостью в зависимости от фактора структурной корреляции. В первой, наиболее протяженной области ($\Phi = 1,0 - 2,4$) установлена линейная структурная корреляция между рельефными объемными изменениями на поверхности напыленного слоя шихты и его пористостью. Коэффициент корреляции Пирсона, рассчитанный с помощью программы MS Excel, для этой зависимости составляет 0,99. Эта область структурной корреляции соответствует широкому интервалу параметров воздушно-шихтовой струи и показателей шихтовых материалов, применяемых для получения влажных окатышей по технологии принудительного зародышеобразования. Во второй области ($\Phi < 1,0$) не зафиксирована структурная корреляция, характерная для первой области зависимости между объемными изменениями на поверхности напыленного слоя шихты и пористостью зародышей. Этот уровень структурной корреляции обусловлен преимущественным воздействием воздушно-шихтовой струи на глубинные зоны напыленного слоя, вызывающем вязкое течение массы и активное проявление массобменных процессов в объеме зародышей при повышенных давлениях воздушно-шихтового потока, приводящего к формированию открытой пористости. Представлены примеры из производственной практики окомкования влажной железорудной шихты, которые коррелируются с полученными результатами исследований. На основе полученных данных сформулированы условия оптимизации структуры зародышей, уточнен механизм формирования структуры и пористости зародышевой массы в процессе струйного напыления влажной шихты при производстве железорудных окатышей.

Ключевые слова: структурная корреляция, реакционная способность, окускованное металлургическое сырье, железорудные окатыши, пористость, фактор структурной корреляции.

Для цитирования: Павловец В.М. Анализ структурной корреляции между поверхностным рельефом напыленного слоя шихты и пористостью железорудных окатышей. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):77–85. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-77-85](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-77-85)

Original article**ANALYSIS OF STRUCTURAL CORRELATION BETWEEN THE SURFACE RELIEF OF THE SPRAYED CHARGE LAYER AND THE POROSITY OF IRON ORE PELLETS**

© 2024 V. M. Pavlovets

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

Abstract. The role of the surface relief of the germ centers obtained in the process of jet spraying of wet charge mass in the formation of porosity and structure of iron ore pellets is analyzed. The possibilities of increasing the reactivity of the pelletized metallurgical product due to the formation of open porosity of pellets by the method of jet spraying of iron ore charge onto the surface of the charge garnishing are shown. To analyze the structural properties of the germ mass, a structural correlation factor is proposed that characterizes the relationship between the relative volume of structural depressions on the surface of the deposited charge layer forming the germ mass and the porosity of the embryos. Two areas of structural correlation have been established between volumetric changes on the surface of the embryos and porosity, depending on the structural correlation factor. In the first, most extended region ($\Phi = 1.0 - 2.4$), a linear structural correlation was established between the relief volume changes on the surface of the sprayed charge layer and its porosity. The Pearson correlation coefficient, calculated using the MS Excel program, is 0.99 for this dependence. This area of structural correlation corresponds to a wide range of parameters of the air-charge jet and indicators of charge materials used to produce wet pellets using forced nucleation technology. In the second region ($\Phi < 1.0$), no structural correlation was recorded, characteristic of the first region of the dependence between volumetric changes on the surface of the sprayed charge layer and the porosity of the embryos. This level of structural correlation is due to the predominant effect of the air-charge jet on the deep zones of the deposited layer, which causes a viscous mass flow and an active manifestation of mass-exchange processes in the volume of embryos at elevated pressures of the air-charge current, leading to the formation of open porosity. Examples from the production practice of pelletizing wet iron ore charge are presented, which correlate with the obtained research results. On the basis of the obtained data, the conditions for optimizing the structure of the embryos are formulated, the mechanism for the formation of the structure and porosity of the germ mass in the process of jet spraying of wet charge in the production of iron ore pellets is clarified.

Keywords: structural correlation, reactivity, agglomerated metallurgical raw materials, iron ore pellets, porosity, structural correlation.

For citation: Pavlovets V.M. Analysis of structural correlation between the surface relief of the sprayed charge layer and the porosity of iron ore pellets. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):77–85. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-77-85](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-77-85)

Введение

Практика технологий напыления в различных отраслях техники показывает, что при напылении дисперсных материалов на поверхности обрабатываемых изделий формируется специфический структурный рельеф [1 – 3]. В металлургической технологии принудительного зародышеобразования, основанной на технике напыления, шихтовые материалы образуют сложные объемные изменения на поверхности зародышевых центров [4 – 6]. В качестве силового и структурообразующего средств используется воздушно-шихтовая струя (ВШС), формируемая холодным или нагретым до 100 – 150 °С компрессорным воздухом. Она позволяет получить плотный напыленный слой (НС) шихты на гар-

низаже, металле, резиновом экране или шихтовой поверхности, расположенных в рабочем пространстве окомкователя [7; 8]. Ближайшим прототипом этого процесса является торкретирование теплозащитных футеровок металлургических печей и тепловых агрегатов. Типичные объемные изменения на поверхности напыления в большинстве случаев представлены структурными углублениями и шихтовыми напыльями, создающими специфический волнообразный рельеф влажной шихтовой поверхности. Подобные проявления структуры характерны и для газотермического напыления металлических порошков [9; 10]. Они появляются в результате деформации и пластического течения напыляемой массы, вследствие чего формируется волнообразный или столбчатый рельеф поверхно-

сти НС с чередованием углублений и шихтовых напылов. Технология напыления в широких пределах позволяет регламентировать свойства напыленных покрытий, применяемых в различных отраслях техники и в сложных производственных системах [11 – 15].

Эти структурные изменения имеют различную глубину и ширину, форму, извилистость, плотность расположения. Они могут быть одной из визуальных характеристик техники напыления, позволяющей идентифицировать процесс порообразования в глубине зародыша с рельефными изменениями на поверхности НС. Структурные углубления НС представляют собой поровые каналы, располагающиеся по траектории вокруг оси круглого с коническим профилем НС (при угле атаки струи β , равном 90°). Эти каналы легко фиксируются при микроскопическом исследовании, а на фотографиях поверхности они отображаются темными слабоизвилистыми линиями шириной от 0,1 до 2,5 мм. Объемные структурные углубления представляют собой начальную форму пористости в поверхностном слое НС. Ширина шихтовых напылов или столбов имеет более значительную величину (от 1 до 5 мм). Шихтовые напылы наклонены под небольшим углом ($10 - 40^\circ$) к плоскости атаки ВШС и имеют крутой наклон с обратной (теневой) стороны [4; 5].

Было установлено, что геометрия и характер объемных изменений зависят от давления воздушно-шихтовой струи, влажности материала, крупности частиц и некоторых технологических факторов [6]. При проведении лабораторных экспериментов было установлено, что подобные структурные изменения и специфический характер силового воздействия на шихту являются первопричиной для формирования проницаемой открытой пористости шихтовых зародышей, которая не залечивается даже после высокотемпературного обжига. Формирование регламентированной пористости окускованного металлургического сырья является одним из перспективных направлений в повышении качества железорудных окатышей [16; 17].

В свою очередь, проницаемые поры существенно увеличивают реакционную способность подготовленного окускованного сырья в ходе металлургической плавки. Первичные объемные изменения на поверхности зародышей формируют поровые каналы, которые при дальнейшем напылении заполняются влажной шихтой и являются основой для формирования общей и проницаемой для газов пористости в глубине зародышей. Количественные характеристики объемных изменений позволяют установить структурную идентичность и корреляцию между

макрорельефом НС и пористостью зародышевой массы, а затем и кондиционных окатышей. Массовая доля зародышей в объеме окатышей может достигать 90 %, поэтому структурные свойства окатышей в целом определяются свойствами зародышевой массы. Корреляционная зависимость между объемными изменениями на поверхности напыления и пористостью зародышей, сформированных техникой напыления, представляет практический интерес для производителей, которые могут получить дополнительный фактор для управления процессами структуро- и формообразования при производстве железорудных окатышей. Подобные поверхностные образования у напыленных покрытий являются предметом изучения у отечественных и зарубежных исследователей [3; 18 – 22].

Целью настоящей работы является исследование структурной корреляции между визуально наблюдаемыми объемными изменениями на поверхности напыленного слоя шихты и его пористостью в процессе зародышеобразования, а также обоснование механизма формирования структуры и пористости зародышевой массы в процессе струйного напыления влажной шихты при производстве железорудных окатышей.

Методы исследования и материалы

В рамках поставленной цели вычисляли фактор структурной корреляции Φ между относительным объемом структурных углублений на поверхности напыленного слоя шихты Θ_v , доли ед, и общей пористостью зародышей Π , доли ед., по следующему выражению:

$$\Phi = \Theta_v / \Pi. \quad (1)$$

Общую пористость зародышей определяли экспериментально, используя модельные образцы, вырезанные из НС, применяли стандартную методику [1; 2]. Относительный объем структурных углублений на поверхности напыленного слоя шихты вычисляли по выражению:

$$\Theta_v = \sum V_{cy} / V_o, \quad (2)$$

где $\sum V_{cy}$ – суммарный объем структурных углублений на поверхности НС, m^3 ; V_o – объем поверхностного участка напыленного слоя шихты, в котором расположены структурные углубления, m^3 .

Суммарный объем структурных углублений на поверхности НС вычисляли по следующей формуле:

$$\sum V_{cy} = V_{cy} N = 0,25 \pi K h_o b_o d_{nc} N, \quad (3)$$

Значение коэффициента K
The value of the coefficient K

Давление ВШС, Па	Значение коэффициента K при влажности напыляемой шихты, %		
	5,0	7,5	10,0
100 – 400	1,0 – 1,1	1,1 – 1,2	1,1 – 1,3
400 – 700	1,1 – 1,2	1,2 – 1,3	1,3 – 1,4
700 – 1000	1,2 – 1,3	1,3 – 1,4	1,4 – 1,6
1000 – 1400	1,3 – 1,4	1,4 – 1,5	1,5 – 1,8

где V_{cy} – объем структурного углубления в среднем сечении $(0,5R_{nc})$ кругового напыленного слоя шихты, m^3 ; N – среднее количество структурных углублений, определяемое по количеству концентрических теневых каналов на поверхности НС [4; 5]; K – коэффициент, учитывающий сложность рельефа и неравномерность поперечного профиля структурных углублений на поверхности НС; h_o и b_o – средние высота и ширина структурных углублений в среднем сечении $(0,5R_{nc})$ напыленного слоя шихты, м [4; 5]; d_{nc} – средний диаметр напыленного слоя шихты по результатам десяти экспериментов, м [4; 5].

Объем поверхностного участка напыленного слоя шихты, в котором располагаются структурные углубления, в первом приближении приняли, равным объему цилиндра диаметром d_{nc} и высотой h_o :

$$V_o = 0,25\pi d_{nc}^2 h_o. \quad (4)$$

После подстановки выражений (3) и (4) в формулу (2) уравнение для параметра Θ_v примет окончательный вид:

$$\Theta_v = KNb_o/d_{nc}. \quad (5)$$

Параметры N , b_o , d_{nc} были определены в работах [4 – 8]. Коэффициент K был рассчитан по данным, полученным в ходе экспериментов. Для этого напыленный слой шихты вместе с напыляемой основой (металлической пластиной) сушили ($t = 105^\circ C$, $\tau = 20$ мин) и обжигали в нагревательной печи при температуре $1200^\circ C$ для придания ему повышенной прочности и фиксации размеров структурных углублений. Считали, что в процессе термической усадки размеры углублений и НС уменьшаются на 1,0 – 1,5 % [6]. После охлаждения на поверхности находили кольцевое концентрическое углубление, которое заполняли расплавленным парафином. Парафин растекался по углублению, затвердевал, формируя контрастное русло светло-серого цвета [7; 8]. После затвердевания парафина его извлекали из струк-

турного углубления, повторно нагревали до жидкотекучего состояния и определяли объем V_n , m^3 , используя мерные емкости для жидкости. Коэффициент K вычисляли по выражению:

$$K = V_n / (0,25\pi h_o b_o d_{nc}). \quad (6)$$

После экспериментов и вычислений установили, что величина K зависит от давления воздушной среды $P_{вшс}$ и влажности напыляемого материала (см. таблицу). В расчетах по формуле (5) использовали среднее значение K .

Визуализация процесса заполнения поверхностных углублений расплавленным парафином дает расширенные возможности для дополнительной информации. Она позволяет уточнить рельеф поверхности НС, измерить более тщательно размеры структурных напылов и углублений, а также определить направление течения массы по руслу углублений на поверхности. Наряду с микроскопическими исследованиями, в которых измерения геометрических характеристик проводятся в отдельных объемах НС с высокой точностью, эта методика позволяет уточнить структурные характеристики объемных изменений на всей поверхности НС и детализировать механизм формирования пористости зародышевой массы.

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментов и вычислений приведены на рис. 1 – 4. Зависимость параметра Θ_v (рис. 1) от давления ВШС показывает, что с ростом $P_{вшс}$ объем структурных углублений на поверхности НС уменьшается, особенно резко в интервале 100 – 600 Па. Это характерно для шихт с низкой влажностью 5,0 и 7,5 %, но более ярко выражено при $W = 10$ %. Увеличение относительного объема поверхностных углублений НС практически линейно приводит к росту пористости напыленного слоя шихты и всей зародышевой массы, сформированной на его

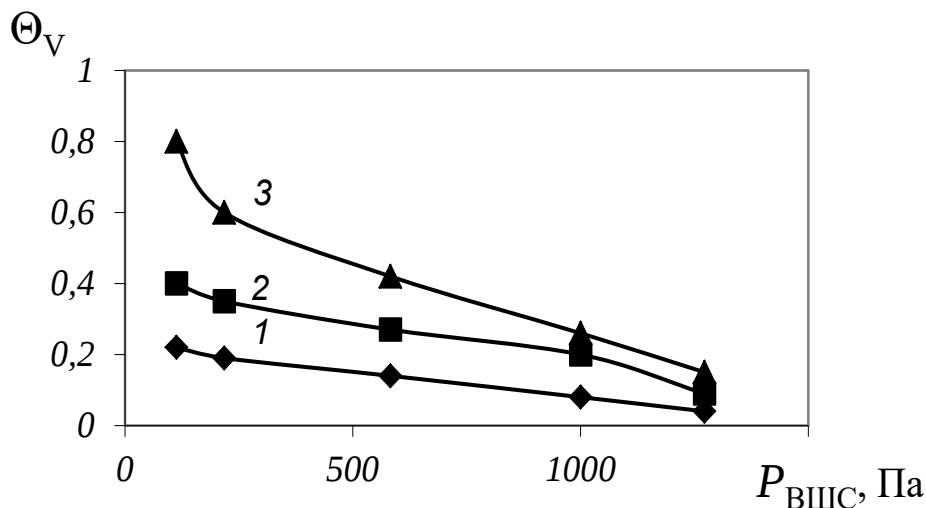


Рис. 1. Зависимость параметра Θ_v от давления ВШС
(здесь и далее влажность шихты 5,0 % (1); 7,5 % (2); 10,0 % (3))
Fig. 1. Dependence of the parameter Θ_v on the pressure of the HC
(hereinafter, the moisture content of the charge 5.0 % (1); 7.5 % (2); 10.0 % (3))

основе (рис. 2). Коэффициент корреляции Пирсона, рассчитанный с помощью программы MS Excel, для этой зависимости составляет 0,98.

Однако фактор структурной корреляции (рис. 3) изменяется в широком интервале значений (от 0,33 до 2,40) и существенно зависит от давления ВШС (рис. 4), что привело к необходимости весь массив данных разделить на две области. В первой области ($\Phi = 1,0 - 2,4$) структурной корреляции величина Φ соответствует условию $\Phi \geq$

1. Эта область, наиболее протяженная по значению Θ_v , характерна для относительно низкого давления ВШС и более высокой влажности шихты ($P_{\text{ВШС}} \leq 580 \text{ Па}$, $W = 5 \%$; $P_{\text{ВШС}} \leq 1100 \text{ Па}$, $W = 7,5 \%$). К этой области структурной корреляции относится и весь интервал давлений ВШС для шихт с влажностью $W = 10 \%$. Это значит, что в области указанных значений $P_{\text{ВШС}}$ и W относительный объем структурных углублений ($\Theta_v = 0,14 - 0,81$) на поверхности НС стабильно

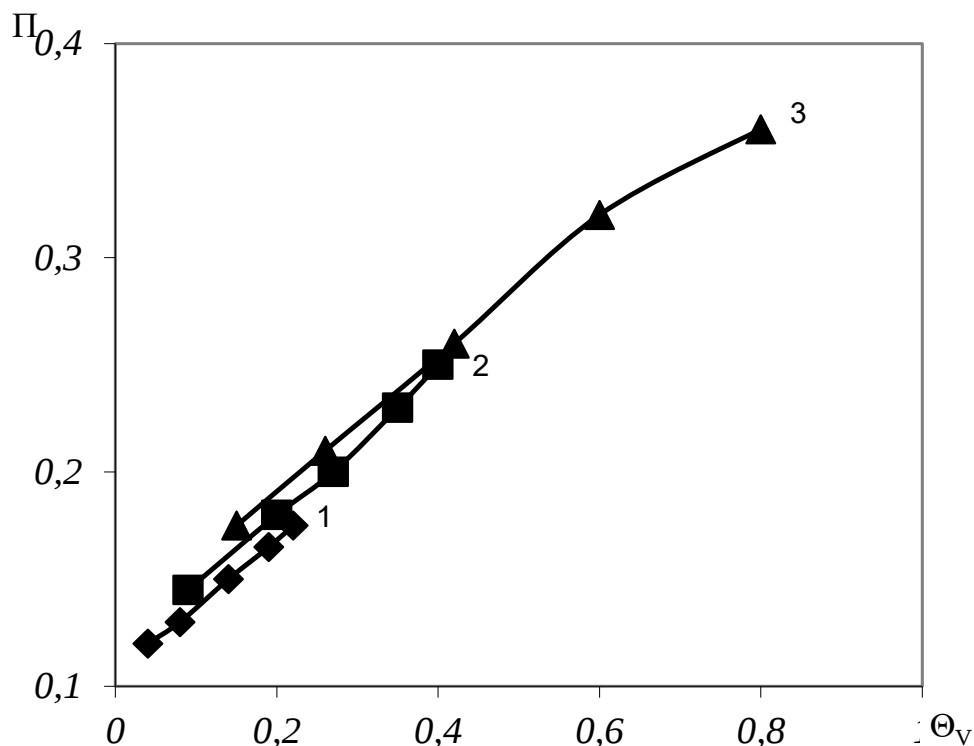


Рис. 2. Зависимость пористости образцов, вырезанных в среднем сечении ($0,5 R_{\text{НС}}$) кругового напыленного слоя шихты, от параметра Θ_v
Fig. 2. Dependence of the porosity of samples cut in the middle section ($0.5 R_{\text{НС}}$) of the circular sprayed layer of the charge on the parameter Θ_v

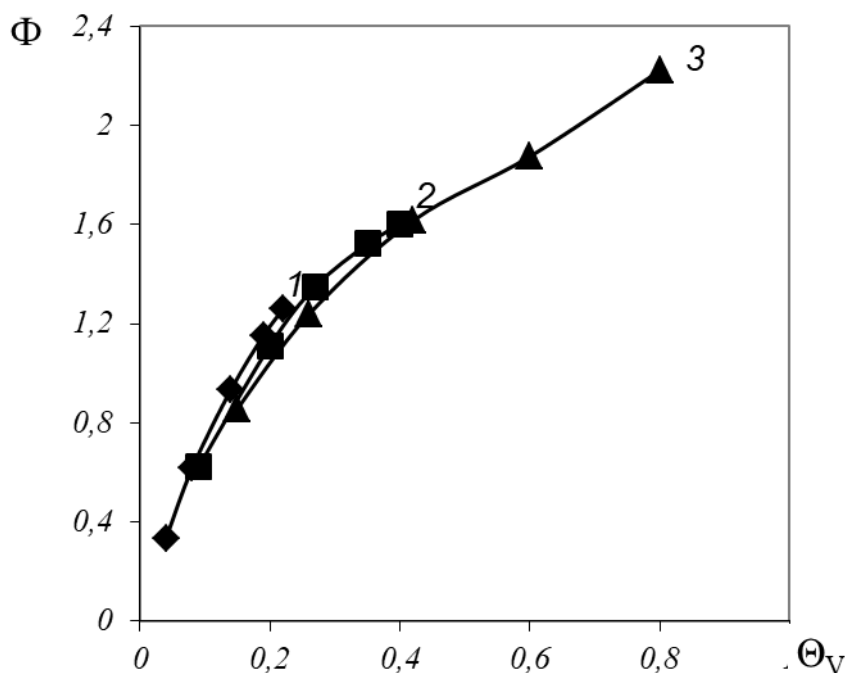


Рис. 3. Зависимость фактора структурной корреляции от параметра Θ_v
 Fig. 3. Dependence of the structural correlation factor on the parameter Θ_v

превышает пористость (0,14 – 0,36) зародышевой массы. Коэффициент корреляции Пирсона для этой области составляет 0,99. При этом пористость закономерно уменьшается от поверхности к центру НС. Это объясняется тем, что при непрерывном поступлении шихтовой массы во время напыления объемные полости заполняются материалом, происходит уменьшение их свободного объема, развивается процесс порообразования. Пористость внутри структурных углублений формируется в результате действия многочисленных факторов: перекрытия углубления шихтой, надвига напылов, пластического течения вязкой массы, растворения-осаждения в среде жидкой пульпы, разломов-расслоений и других факторов [4 – 8]. Поэтому пористость после напыления в глубине НС естественным образом становится меньше величины Θ_v . В области $\Phi \geq 1$ можно считать, что величина Π пропорциональна Θ_v и коррелируется с ней по зависимости, близкой к линейной (рис. 1 – 3). Во второй области значений ($\Phi < 1$) $\Theta_v \leq \Pi$. Протяженность этой области по величине Θ_v существенно меньше. Это в основном область более высокого давления ВШС и пониженной влажности шихты ($P_{\text{ВШС}} \geq 580$ Па, $W = 5\%$; $P_{\text{ВШС}} \geq 1100$ Па, $W = 7,5\%$). Коэффициент корреляции Пирсона для этой области составляет 0,97. Однако, в этой области не зафиксирована структурная корреляция между параметрами Θ_v и Π , характерная для первой области. Это значит, что на поверхности НС объем структурных углублений меньше пористости за-

родышевой массы ($\Theta_v \leq \Pi$), а пористость растет от поверхности к центру. Если аппроксимировать полученные данные (рис. 2), то при $\Theta_v = 0$ пористость образцов, вырезанных из НС, должна составлять 0,12. Это объясняется особенностями аэродинамической картины на поверхности НС при высоких давлениях ВШС, усложненной активными массообменными процессами, искажающими условия структурной корреляции [4 – 8], согласно которым рельеф поверхности содержит минимальное количество объемных изменений после напыления. Особенностью аэродинамики напыления является то, что для шихт с пониженной влажностью в рассматриваемой области давлений ВШС превалирует статическое давление струи, препятствующее формированию структурных изменений на поверхности НС, за которые отвечает динамическое давление ВШС. Поскольку в процессе напыления глубинные слои испытывают динамические нагрузки от ВШС, действующие от оси НС к его периферии, то вероятно по этой причине появляются сдвиговые усилия, ответственные за формирование пористости в глубине зародышей. Предварительный прогноз показывает, что пока НС находится в зоне действия ВШС, на поверхности напыленного слоя не происходит структурных изменений, в его глубине продолжается структурообразование. Можно предположить, что механизм формирования пористости близок к механизму формирования структуры по технологии механического прессования [4; 6].

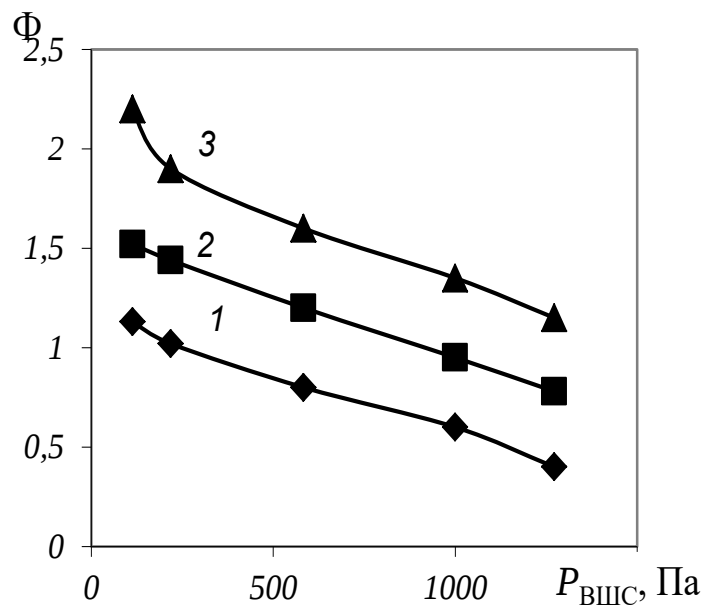


Рис. 4. Зависимость фактора структурной корреляции от давления ВШС
 Fig. 4. Dependence of the structural correlation factor on the air-charge jet pressure

Механизм формирования структуры и пористости зародышей в режиме напыления шихты существенно отличается от развития структуры зародышей и окатышей, получаемой по промышленной технологии в режиме переката. Для обсуждаемой проблемы можно найти некоторые аналогии из практики производства окатышей. В частности, качественная взаимосвязь между объемными изменениями на поверхности влажных окатышей и их пористостью подтверждается практикой производства окатышей. Известно, что если влажность комкуемой шихты по каким-либо причинам превышает ее оптимальное значение ($W \geq 9 - 10 \%$), то режим переката нарушается и окатыши получаются бесформенными и грязеподобными с большим количеством объемных изменений на их поверхности, формирующих повышенную пористость и низкую плотность [4; 5]. Для этого нетипичного режима окомкования в первом приближении можно считать, что между поверхностными изменениями и пористостью окатышей существует структурная корреляция, требующая корректировки технологического режима. Этот факт требует экспериментального доказательства, так как на структуру окатышей влияет режим увлажнения и окомкования [6; 7]. При оптимальной влажности железорудной шихты окомкование (в режиме переката) имеет незначительные структурные изменения на своей поверхности, но их пористость для этого режима достаточно высокая (20 – 28 %). Объемные изменения на поверхности окатышей минимальные, но пористость в структуре гранул достаточно высокая, что близко к выводам, сделанным в настоящей работе для второй области значений Φ , которая не соответствует

принципам структурной корреляции между величинами Φ_v и Π в первой области. Этот факт может быть предметом дальнейших исследований. В виду сложности и многофакторности этих процессов, протекающих в динамическом состоянии и в закрытой дисперсной системе, все описанные механизмы поро- и структурообразования при производстве окатышей имеют вероятностный характер.

Выводы

Проанализирована роль поверхностного рельефа зародышевых центров в формировании пористости и структуры железорудных окатышей. Сформулированы условия оптимизации структуры и предложены методы получения окатышей с улучшенными металлургическими свойствами. Проанализирован фактор структурной корреляции, характеризующий связь между относительным объемом структурных углублений на поверхности напыленного слоя шихты, формирующего зародышевую массу, и пористостью зародышей. Установлены две области соответствия между объемными изменениями на поверхности зародышей и пористостью в зависимости от фактора корреляции. В первой области корреляции ($\Phi \geq 1$) установлено линейное структурное соответствие между рельефными объемными изменениями на поверхности напыленного слоя шихты и его пористостью. Во второй области ($\Phi < 1$) зафиксирована низкая степень структурной корреляции между объемными изменениями на поверхности напыленного слоя шихты и пористостью зародышей. Это обусловлено вязким течением массы и активным проявлением массообменных процессов в объеме зародышей при по-

вышенном давлении воздушно-шихтовой струи, приводящее к формированию открытой пористости. На основе полученных данных уточнен механизм формирования структуры и пористости зародышевой массы в процессе струйного напыления влажной шихты при производстве железорудных окатышей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов В.В., Бобров Г.В. *Нанесение покрытий напылением, теория, технология и оборудование*. Москва: Металлургия, 1992:412.
2. Балдаев Л.Х. и др. *Газотермическое напыление*. Москва: Маркет ДС, 2007:344.
3. Гнездовец А.Г., Калита В.И. Модель формирования макроструктуры покрытий при плазменном напылении. *Физика и химия обработки материалов*. 2007;1:30–39.
4. Павловец В.М. *Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии*. Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022:336. EDN: EBYWIW
5. Павловец В.М. *Расширение функциональных возможностей агрегатов для подготовки железорудного сырья к металлургической плавке*. Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2023:328.
6. Павловец В.М., Герасимук А.В. Особенности движения зародыша сложной формы на тарельчатом окомкователе в производстве железорудных окатышей. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018;62(2):87–95.
7. Павловец В.М. Формирование структуры железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016;10:857–863.
8. Павловец В.М. *Окатыши в технологии экстракции металлов из руд*. Москва: Вологда: Инфра-Инженерия, 2022:284.
9. Калита В.И., Комлев Д.И. Механизм формирования аморфной структуры в металлических сплавах при плазменном напылении. *Металлы*. 2003;6:30–37.
10. Pivinskii Yu.E., Rozhkov E.V. Ceramic castables – final stage in the evolution of low-cement refractory castables. Part 3. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2003;44(3):134–140.
11. Frantes K. North American Iron Mines Running Flat Out to Meet Domestic and Worldwide Demand. *Skullings' Mining Review*. 2005;94(7):6–21.
12. *BASICS IN MINERAL PROCESSING*: Metso Corporation, 2015:752.
13. Poveromo J.J. Grade pellet quality and supply. *AISTech (Assoc. Iron & Steel Technology) Annual Meeting*, Indianapolis, 2015:751–762.
14. Forsmo S.P.E., Samskog P.O., Bjorkman M.T. A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness. *Powder Technology*. 2008;181(3):321–330.
15. Wang Zhaocai, Mansheng Chu, Shiqiang Chen etc. Effects of B-Mg additive on metallurgical properties of oxidized pellets. *Advanced Materials Research*. 2011;284-286:1232–1236.
16. Абзалов В.М. и др. *Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей*. Екатеринбург: НППП «ТОРЕКС», 2012:340.
17. Okrkr S.I., Onukwuli O.D. Effect of basicity on metallurgical properties of pellets produced from Itakpe iron ore concentrates. *Discovery and Innovation*. 1999;11(3-4):170–176.
18. Goejen J.G., Miller R.A., Brindley W.J., Leisler G.W. A simulation technique for predicting defects of thermal sprayed coatings: *NASA Technical Memorandum TM-106939*, 1995.
19. Hansbo A., Nylén P. Models for the simulation of spray deposition and robot motion optimization in thermal spraying of rotating objects. *Surface Coatings Technol.* 1999;122:191–201.
20. Zhang Y., Bandyopadhyay A. Direct fabrication of compositionally graded Ti – Al₂O₃ multi-material structures using Laser Engineered Net Shaping. *Additive Manufacturing*. 2018;21:104–111.
21. Valladares L. De Los Santos, Domínguez A.B., Félix L.L., Kargin J.B., Mukhambetov D.G., Kozlovskiy A.L., Moreno N.O., San-tibañez J.F., Cabrera R.C., Barnes C.H.W. Characterization and magnetic properties of hollow α -Fe₂O₃ microspheres obtained by sol gel and spray roasting methods. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2019;4(3):483–491.
22. Chikashi Kamijo, Masaki Hara, Takazo Kawaguchi et al. Sinter feed granulation improvement technique by pan pelletizer. *Zairyo to Prosesu = CAMP ISIJ*. 2010;23(1):5.

REFERENCES

1. Kudinov V.V., Bobrov G.V. *Application of coatings by spraying, theory, technology and equipment*. Moscow: Metallurgy, 1992:412. (In Russ.)
2. Baldaev L.Kh. et al. *Thermal spraying*. Moscow: Market DS, 2007:344. (In Russ.)
3. Gnezdovets A.G., Kalita V.I. Model of formation of coating macrostructure during plasma spraying. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2007;1:30–39. (In Russ.)

4. Pavlovets V.M. *Development of technology and technology for pelletizing iron ore raw materials in metallurgy*. Moscow: Vologda: Infra-Inzheneriya, 2022:336. (In Russ.). EDN: EBYWIW
5. Pavlovets V.M. *Expansion of functional capabilities of units for preparation of iron ore raw materials for metallurgical smelting*. Moscow: Vologda: Infra-Inzheneriya, 2023:328. (In Russ.)
6. Pavlovets V.M., Gerasimuk A.V. Features of the movement of a complex-shaped embryo on a disc pelletizer in the production of iron ore pellets. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;62(2):87–95. (In Russ.)
7. Pavlovets V.M. Formation of the structure of iron ore pellets obtained using thermal power spraying of wet batch. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016;10:857–863. (In Russ.)
8. Pavlovets V.M. *Pellets in the technology of extraction of metals from ores*. Moscow: Vologda: Infra-Inzheneriya, 2022:284. (In Russ.)
9. Kalita V.I., Komlev D.I. Mechanism of formation of amorphous structure in metal alloys during plasma spraying. *Metally*. 2003;6:30–37. (In Russ.)
10. Pivinskii Yu.E., Rozhkov E.V. Ceramic castables – final stage in the evolution of low-cement refractory castables. Part 3. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2003;44(3):134–140.
11. Frantes K. North American Iron Mines Running Flat Out to Meet Domestic and Worldwide Demand. *Skilling's Mining Review*. 2005;94(7):6–21.
12. *BASICS IN MINERAL PROCESSING*: Metso Corporation, 2015:752.
13. Poveromo J.J. Grade pellet quality and supply. *AISTech (Assoc. Iron & Steel Technology) Annual Meeting*, Indianapolis, 2015:751–762.
14. Forsmo S.P.E., Samskog P.O., Bjorkman M.T. A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness. *Powder Technology*. 2008;181(3):321–330.
15. Wang Zhaocai, Mansheng Chu, Shiqiang Chen etc. Effects of B-Mg additive on metallurgical properties of oxidized pellets. *Advanced Materials Research*. 2011;284-286:1232–1236.
16. Abzalov V.M. et al. *Physicochemical and thermal engineering principles of iron ore pellet production*. Ekaterinburg: NPVP «TOREKS», 2012:340. (In Russ.)
17. Okrkr S.I., Onukwuli O.D. Effect of basicity on metallurgical properties of pellets produced from Itakpe iron ore concentrates. *Discovery and Innovation*. 1999;11(3-4):170–176.
18. Goejen J.G., Miller R.A., Brindley W.J., Leisler G.W. *A simulation technique for predicting defects of thermal sprayed coatings: NASA Technical Memorandum TM-106939*, 1995.
19. Hansbo A., Nylén P. Models for the simulation of spray deposition and robot motion optimization in thermal spraying of rotating objects. *Surface Coatings Technol.* 1999;122:191–201.
20. Zhang Y., Bandyopadhyay A. Direct fabrication of compositionally graded Ti – Al₂O₃ multi-material structures using Laser Engineered Net Shaping. *Additive Manufacturing*. 2018;21:104–111.
21. Valladares L. De Los Santos, Domínguez A.B., Félix L.L., Kargin J.B., Mukhambetov D.G., Kozlovskiy A.L., Moreno N.O., San-tibañez J.F., Cabrera R.C., Barnes C.H.W. Characterization and magnetic properties of hollow α -Fe₂O₃ microspheres obtained by sol gel and spray roasting methods. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*. 2019;4(3):483–491.
22. Chikashi Kamijo, Masaki Hara, Takazo Kawaguchi et al. Sinter feed granulation improvement technique by pan pelletizer. *Zairyo to Prosesu = CAMP ISIJ*. 2010;23(1):5.

Сведения об авторах

Виктор Михайлович Павловец, к.т.н., доцент, доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: pawlowets.victor@yandex.ru
SPIN-код: 8380-9354

Information about the authors:

Viktor M. Pavlovets, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University
E-mail: pawlowets.victor@yandex.ru
SPIN-код: 8380-9354

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

Поступила в редакцию 28.08.2024
 После доработки 10.09.2024
 Принята к публикации 12.09.2024

Received 28.08.2024
 Revised 10.09.2024
 Accepted 12.09.2024

Оригинальная статья

УДК 004.942

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-86-96

**ПОСУТОЧНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПОТОКОВ СЫРЬЯ
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

© 2024 г. А. С. Леонтьев¹, И. А. Рыбенко²

¹АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. –Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

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

Аннотация. На АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») с 2017 г. разрабатывается и эксплуатируется математическая модель СММ «Прогноз», охватывающая все переделы (от добычи руды до конечной продукции). Она применяется для расчетов технических кейсов, планов, паритетных цен по железорудному сырью и углю. Ее использование принесло за 2020 г. более 200 млн руб. экономического эффекта. Использование универсальной математической модели позволило в 2023 г. начать разработку модуля посуточного оптимизации работы агломерационной фабрики и доменного производства. Рассмотрен опыт АО «ЕВРАЗ ЗСМК» по разработке и внедрению системы посуточного планирования на базе модели СММ «Прогноз», которая изначально была предназначена для сквозного сценарного расчета основных сырьевых переделов от руды и углей до готовой продукции в объемном месячном планировании. Система использует оптимизационные алгоритмы поиска глобальной целевой функции по максимизации маржинального дохода в заданных ограничениях. Математическая модель переделов использует нормы и технологию, заданные на предприятии нормативными документами. При этом модель является универсальной. Перевод алгоритмов с помесечного на посуточный режим был осуществлен с минимальными доработками. Рассмотрены возникшие трудности и методы решения этих проблем. Первой проблемой, с которой столкнулись разработчики, была низкая скорость оптимизации модели в посуточной динамике из-за сильного усложнения оптимизационной нагрузки. Время расчета существенно возросло, для решения проблемы потребовались оптимизация скорости решения уравнений, задание границ переменных, определение стартовых точек, в результате чего скорость расчета для 30 дней снизилась до 40 мин. Второй проблемой была необходимость разработки сложного алгоритма управления поставками сырья. Важным аспектом стало сохранение удобства использования системы на прежнем уровне для конечного пользователя. Результатом реализации предложенных решений является рабочий инструмент, приносящий дополнительный доход для предприятия.

Ключевые слова: металлургия, моделирование, посуточное планирование, оптимизация, агломерационная фабрика, доменный цех

Благодарности: автор выражает признательность коллективу АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Финансирование: автор выражает благодарность за финансовую поддержку исследования руководству АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Для цитирования: Леонтьев А.С., Рыбенко И.А. Посуточное планирование и оптимизация потоков сырья в черной металлургии. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):86–96. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-86-96](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-86-96)

Original article

**DAILY PLANNING AND OPTIMIZATION OF RAW MATERIAL FLOWS
IN FERROUS METALLURGY**

© 2024 A. S. Leont'ev¹, I. A. Rybenko²

¹JSC «EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant» (16 Kosmicheskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654043, Russian Federation)

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

Abstract. Since 2017, EVRAZ ZSMK JSC has been developing and operating a mathematical model covering all processing stages from ore extraction to final products – SMM Forecast. The model is used to calculate technical cases, plans, and market prices for iron ore and coal, and its use brought more than 200 million rubles of economic effect in 2020 alone. The use of a universal mathematical model made it possible to begin the development of a module for daily optimization of the agglomeration factory and blast furnace production in 2023. The article discusses the experience of EVRAZ ZSMK JSC in the development and implementation of a daily planning system based on the monthly planning model of SMM Forecast. The SMM Forecast system was originally designed for end-to-end scenario calculation of the main raw materials processing from ore and coal to finished products in a volumetric monthly planning. The system uses optimization algorithms to search for a global objective function to maximize margin income within specified limits. The mathematical model of processing uses the norms and technology specified in the company's regulatory documents. At the same time, the model is universal, and the transfer of algorithms from monthly to daily mode was carried out with minimal modifications. The article also discusses the difficulties encountered and methods of solving these problems. The first problem faced by the developers was the low speed of optimization of the model in daily dynamics due to the strong complication of the optimization load. The calculation time increased significantly, and to solve the problem, it took optimizing the speed of solving equations, setting the boundaries of variables, determining starting points, as a result of which the calculation speed for 30 days decreased to 40 minutes. The second problem was the need to develop a complex algorithm for managing the supply of raw materials. An important aspect was to maintain the usability of the system at the same level for the end user. The result of the implementation of the proposed solutions is a working tool that brings additional income to the enterprise.

Keywords: metallurgy, modeling, daily planning, optimization, sintering factory, blast furnace shop

Acknowledgements: The authors express gratitude to the team of EVRAZ ZSMK JSC for their help.

Funding: The authors express gratitude for the financial support provided by EVRAZ ZSMK JSC.

For citation: Leont'ev A.S., Rybenko I.A. Daily planning and optimization of raw materials flows in ferrous metallurgy. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):86–96. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-86-96](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-86-96)

Введение

Металлургия – это одна из самых ресурсоемких и энергоемких отраслей промышленности [1; 2]. Для снижения себестоимости металлургической продукции обычно проводятся инвестиционные (затратные) мероприятия. При этом одним из самых эффективных и малозатратных способов является моделирование, с помощью которого происходит планирование работы, заключающееся в оптимальном распределении дорогостоящих покупных и дефицитных собственных ресурсов для максимизации прибыли.

Математическое моделирование уже долгое время имеет решающее значение для понимания и прогнозирования явлений в тяжелой промышленности. Ранее основным источником знаний был практический опыт работы и использование упрощенного, но фундаментального понимания химии и структуры материалов, которые используются в производстве. В последнее время (в течение последних четырех десятилетий) развитие цифровых инструментов предложило аналитикам процессов новые инструменты [3] для математического моделирования и оптимизации.

Модели, использующие линейное программирование, развиваются с 1980 г. [4]. Известны модели металлургических производств, направленные на узкую оптимизацию технологии, например, в работах [5; 6] проводится расчет теплового баланса агломерации. С 2010 г. для моделирования металлургических процессов активно применяются нейронные сети [7 – 12] и статистические модели [13]. Известны и модели металлургических производств целиком [14; 15]. С конца 2010 г. особое внимание в моделировании стали уделять сокращению выбросов оксида углерода для достижения углеродной нейтральности [16]. В современной металлургической практике моделирование широко используется для предоставления решений по проектированию, управлению, оптимизации и визуализации, а также планированию. Они приобретают все большее значение в процессе цифровой трансформации и интеллектуальной металлургии [17].

Главной сложностью моделирования и планирования является то, что шихта каждого из агрегатов может состоять из сотен различных компонентов в различных допустимых комбинациях. Например, на металлургическом комбинате АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк) выбор материалов осуществляют более чем из 110 компонентов шихты для производства чугуна на постоянной основе [18] в разрезе месяца, планирование проводят на три месяца вперед [19; 20].

Цель и задачи разработки системы посуточного планирования

Крупнейшим в Сибири и самым восточным в Российской Федерации сталелитейным предприятием является АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Он состоит из двух производственных площадок и горнорудного филиала, который объединяет несколько горнодобывающих и горно-обогащающих предприятий Кемеровской обл. В состав горнорудного подразделения входят шахты «Таштагольская», «Шерегешская», «Казская», а также Гурьевский карьер по добыче известняка и Абагурская обогащательная фабрика.

Площадка строительного проката специализируется на производстве длинномерного проката, в том числе из низколегированной стали (арматуры, катанки), а также фасонного проката (равнополочный уголок, балка, швеллер и другие), непрерывно литых и горячекатаных слябов и заготовок.

Площадка железнодорожного проката является лидирующим производителем всей номенклатуры рельсового сортамента не только в России, но и в мире. Здесь производят рельсы для железнодорожных, трамвайных магистралей и метрополитенов. Рельсовое производство АО

«ЕВРАЗ ЗСМК» включает рельсобалочный и электросталеплавильный цеха [21].

В связи с тем, что комбинат частично закупает сырье для производства продукции, количество которой превышает 1000 единиц, особое внимание уделяется ежемесячному планированию производства. План выпускается три раза в месяц для основных переделов и пять раз для производства продукции:

- индикативный план;
- предлагаемый план;
- утвержденный план;
- текущий план версии 1;
- текущий план версии 2.

В каждом из планов происходит итеративное уточнение плана, например, индикативный план может быть не совсем точным, следовательно, предлагаемый и утвержденные планы уходят в расчет премии сегментам.

На АО «ЕВРАЗ ЗСМК» этому уделяется особое внимание, план выпускается три раза в месяц, учитывается текущий месяц и три месяца вперед. При этом традиционные методы планирования, основанные на месячных прогнозах, часто ограничены в своей способности адаптироваться к изменяющимся условиям в реальном времени и не учитывают множество нюансов:

- даты поставки различного сырья внутри месяца;
- лаг по времени между поступлением и потреблением сырья в 8 – 10 дней из-за необходимости складирования и усреднения сырья на складе;
- различный химический состав сырья внутри месяца;
- проведение капитальных ремонтов оборудования.

Расчетная шихта может получаться оптимальной в среднем по месяцу, но при этом сильно неоптимальной в разрезе по суткам из-за неравномерных поставок флюсов, добавочных материалов или из-за перехода на сушеные концентраты в середине месяца (в ноябре). В связи с этим на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» в 2023 г. было принято решение перевести существующую посуточную модель на посуточную динамику. Необходимость в новой системе планирования, основанной на посуточной динамике, обусловлена несколькими факторами и достоинствами:

1 – гибкость (посуточное планирование позволяет быстро реагировать и адаптироваться к изменениям поступления сырья, обеспечивая гибкость процесса производства);

2 – точность (посуточное планирование учитывает детали и особенности каждого дня, что позволяет более точно определить оптимальные объемы и состав поступающего сырья, а также произведенный продукт);



Рис. 1. Главное окно программы
Fig. 1. The main window of the program

3 – амбициозность (посуточное планирование позволяет поставить амбициозную цель для выполнения производства на ежедневной основе, снижает запас на неэффективность);

4 – оптимизация затрат (посуточное планирование позволяет более эффективно распределять затраты на производство, минимизируя потери и избыточные затраты);

5 – увеличение производительности (более четкое планирование по дням позволяет оптимизировать процессы и оборудование, что ведет к повышению производительности и улучшению общей эффективности);

6 – лучшее управление рисками (посуточное планирование дает возможность более эффективно управлять рисками, связанными с колебаниями цен на сырье и спросом на продукцию);

7 – верификация результатов (посуточная динамика позволяет интерпретировать и подстраивать модель, исходя из прошедших суток, и в таком случае нет необходимости ожидать окончания месяца для корректировки результатов модели).

Посуточная система позволяет оценивать следующие экономические кейсы:

- посуточный подбор оптимальной основности агломерата под долю агломерата в печах вместо соблюдения одинаковой основности агломерата по месяцу, когда в определенные сутки приходится снижать основность агломерата добавочными материалами, а в другие перерасходовать известняк;

- подбор оптимального потребления отходов, исходя из суточного прихода вредных примесей в доменные печи;

- посуточный расчет топлива, уровня вдувания пуд;

- максимизация собственного сырья, исходя из технологических особенностей.

Разработка системы посуточного планирования для аглодоменного производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Для разработки модели была использована существующая ежемесячная модель СММ «Прогноз» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»).

В качестве базового программного обеспечения при разработке системы была выбрана Аналитическая платформа Форсайт «Prognost Platform 8.2» [21] и среда математического моделирования GAMS. Рабочее окно программы приведено на рис. 1.

Разработанная система положительно себя зарекомендовала как для расчета плановой шихты, так и для определения экономических кейсов (делается несколько расчетов и выбирается оптимальный вариант шихты). В программную систему включены следующие переделы металлургического производства:

- рудники (добыча руды);
- обогатительная фабрика (обогащение руды);
- аглофабрика;
- коксохимическое производство (обогащение угля, производства кокса);
- доменный цех;

Границы и приближение химии производства чугуна, %

	Fe	Mn	P	S	C	Si	Cr	Ni	Cu	Al	V	Ti	Mo	W	Nb	As	Sn	Co	N
Нижняя граница для химии производства, %	93,00	0,00	0,00	0,00	4,20	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Верхняя граница для химии производства, %	95,00	0,70	0,20	0,10	5,20	0,70	0,10	0,10	0,10	0,10	1,00	1,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Химический состав, % - по сертификатам	94,14	0,45	0,09	0,02	4,62	0,52	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Рис. 2. Определение границ и приближений по химическому составу чугуна

Fig. 2. Determination of boundaries and approximations by the chemical composition of cast iron

- сталеплавильное производство (кислородно-конвертерные цеха 1 и 2);
- электросталеплавильный цех;
- прокатный цех (на рельсовой и строительной площадках).

На текущий момент система оперирует более чем 90 000 уравнениями. Модель охватывает физические процессы переделов в месячной динамике. В 2022 г. был разработан экспериментальный модуль «Энергетика». Он осуществляет оптимизацию энергооборудования в посуточном динамике на базе линейной оптимизации, который показал приемлемую скорость расчета (30 суток за 2 – 3 мин), поэтому было принято решение тиражировать опыт на другие переделы.

Посуточное планирование обладает некоторыми недостатками:

1 – большие объемы данных для оптимизации (посуточное планирование требует обработки и анализа больших объемов данных, что может потребовать специализированных ИТ-ресурсов и инфраструктуры, например, возможности Excel не позволяют оптимизировать такие обширные модели);

2 – увеличенная сложность ввода данных (посуточное планирование требует детального ввода и анализа большого количества данных, что может быть более сложным и трудоемким процессом для оператора);

3 – зависимость от точности входных данных (для успешного посуточного планирования необходима высокая точность и достоверность информации о поступающем сырье и рыночных условиях; недостоверные данные могут привести к неправильным решениям и потере эффективности, которые в разрезе месяца не столь очевидны из-за усреднения и взаимной компенсации выпадов; изменения в ценах на сырье также могут существенно влиять на результаты посуточного планирования, что требует постоянного мониторинга и корректировок, что опять же приводит к усложнению обслуживания модели).

Решение проблемы 1 (ускорение работы модели)

Для проверки гипотезы о возможности одновременной оптимизации в существующей модели был проведен быстрый эксперимент с вводом суточных данных в месячный разрез. Этот эксперимент не требовал дополнительных средств

на разработку, так как в системе уже были все возможности для многопериодного расчета, но в разрезе месяца, а не сутки.

Тесты показали существенное падение скорости при расчете более 10 периодов из-за возрастающей сложности модели и количества оптимизируемых переменных для большого периода данных. Расчет модели зачастую не завершался по достижению необходимой точности в настройках солвера, при завершении работы модели по таймеру выдавался некорректный результат.

Для оптимизации скорости и получения приемлемого результата была проведена оптимизация скорости расчета по модели [23]:

- просчитаны стартовые точки модели, исходя из входных данных, например, расход кокса в доменных печах в среднем составляет 380 кг, эту цифру можно внести как стартовую точку для облегчения работы модели, чтобы поиск начинался не с нуля, в результате чего экономится машинное время;

- определены допустимые границы по каждой из переменных, исходя из статистики процесса и допустимых границ работы оборудования; показан пример задания допустимых границ (рис. 2) по химическому составу чугуна, существенно снижающий вариативность работы;

- сделаны упрощения модели (равномерное потребление агломерата по доменным печам, потребление скипового кокса без разбивки по коксовым батареям).

Раньше с помощью модели можно было индивидуально подбирать оптимальное потребление кокса с каждой из батарей на каждую доменную печь (рис. 3), усреднение материалов (рис. 4) позволило снизить размерность модели до 100 000 переменных.

Итоговый результат по оптимизации скорости представлен на рис. 5.

На текущий момент при расчете 30 периодов модель оперирует 268 000 переменными в 96 000 уравнениях, время одновременной оптимизации 30-ти дневного периода составляет 3 – 9 мин. в зависимости от входных данных, что является приемлемым результатом по скорости расчета, но еще есть потенциал для улучшения юзабилити модели.

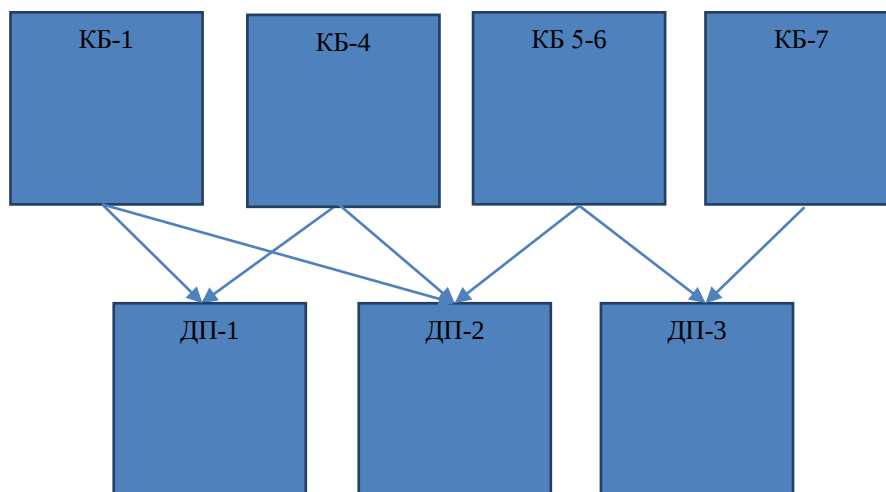


Рис. 3. Изначальная схема оптимизации потребления кокса на печах
Fig. 3. The initial scheme for optimizing coke consumption on shoulders

Решение проблемы 2 (большие массивы данных для внесения)

Для снижения нагрузки на пользователя был принят ряд технических решений, ускоряющий ввод данных и повышающий юзабилити:

1 – максимальное использование повторяющихся данных на весь месяц (химический состав; коэффициенты модели, нормы);

2 – автозагрузка данных из АРМ при их доступности;

3 – тиражирование данных из предыдущих сценариев.

После реализации всех доработок объем ввода данных кратно сократился.

Решение проблемы 3 (нестабильность рынка и логистики)

В целом, снижение влияния рыночных условий, логистических проблем возможно только за счет привлечения дополнительной экспертизы

специалистов, что возможно при правильно работающей модели.

Разработка модуля «Штабелирование»

Для моделирования работы складов аглофабрики был разработан модуль линейной оптимизации поступающего сырья, который складывает сырье по одному из шести штабелей аглофабрики, учитывая следующие ограничения:

– поступающий маршрут сырья должен сложиться в один из штабелей целиком;

– допускается одновременное наполнение двух штабелей, после заполнения одного из них система переходит к следующему;

– потребляемый штабель не заполняется.

Целевая функция оптимизатора – это усреднение химического состава сырья внутри штабелей и между ними по химическим элементам (Fe, MgO, ZnO) и основности. По итогам опти-

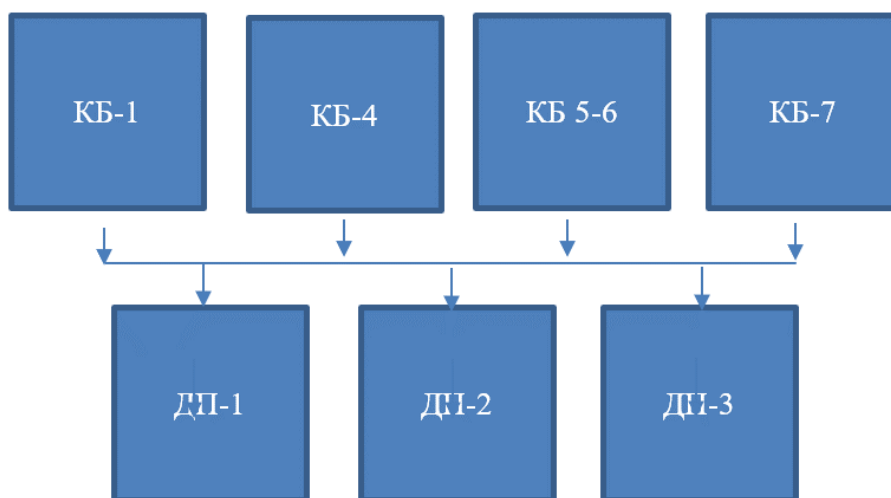


Рис. 4. Улучшенная схема оптимизации потребления кокса на печах
Fig. 4. Improved scheme for optimizing coke consumption on shoulders

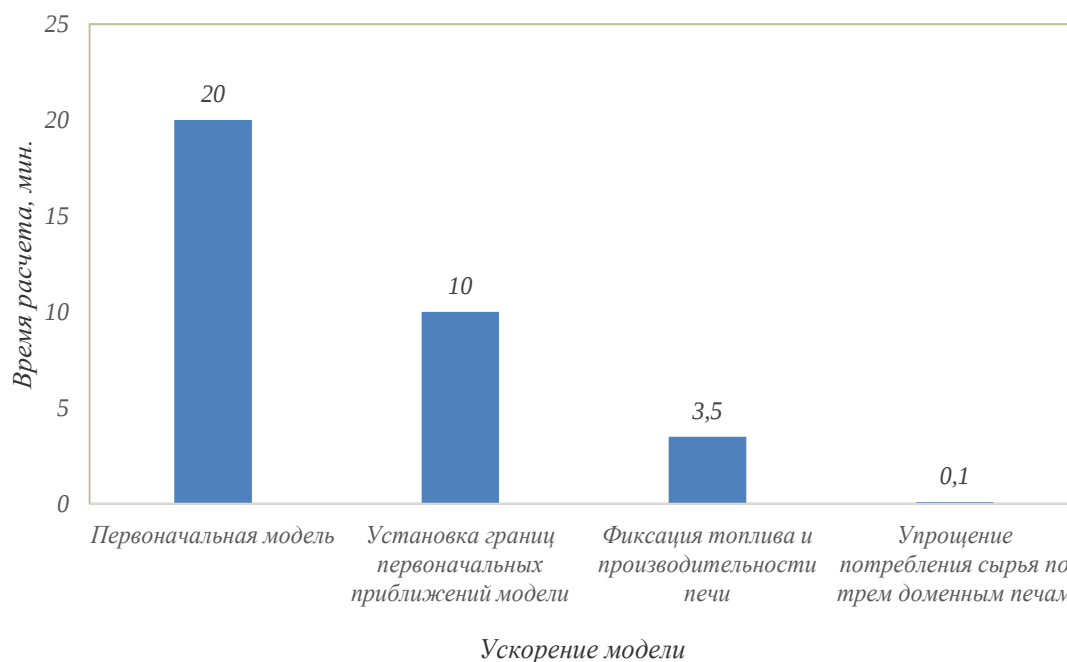


Рис. 5. Достигнутое ускорение модели
Fig. 5. Achieved acceleration of the model

мизации получается матрица заполнения штабелей (рис. 6), химический состав материала в штабелях приведен на рис. 7.

Выводы

Оптимизация посуточного планирования в черной металлургии требует разработки системы, которая удовлетворяет множествам функциональных требований. Подобные системы имеют повышенные требования к скорости расчета. Это связано с тем, что даже с оптимизациями вводных форм объем ввода данных существенно повышен относительно помесечной оптимизации. Пользователь может допустить ошибку ввода, и в рассматриваемом случае время исправление ошибки лимитируется скоростью расчета. Приемлемое время расчета составляет 40 мин.

Несмотря на все сложности, инвестиции в посуточное планирование окупаются. Изменчивость рыночных условий и цен на сырье требует более гибкого и реактивного подхода к планированию. Посуточное планирование позволяет быстро отреагировать на изменения спроса и цен, минимизируя потери и максимизируя прибыль. Посуточное планирование обеспечивает более точные результаты и детализацию в сравнении с более длительными прогнозами. Это позволяет учитывать факторы, влияющие на качество сырья и его доступность на каждый конкретный день. Такой подход позволяет оптимизировать процессы производства и снизить затраты, улучшая общую эффективность. Преимущество посуточной динамики заключается в

возможности более точно предсказывать и планировать простои оборудования и ремонтные работы. Система посуточного планирования помогает учесть необходимость профилактических мероприятий и сократить простои в производственных процессах. Использование системы позволяет получать дополнительную прибыль для предприятия и находить новые технические кейсы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисиенко В.Г., Соловьева Н.В., Трофимова О.Г. *Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности*. Москва: Изд-во Теплотехник, 2007:440.
2. Протопопов Е.В., Калиногорский А.Н., Ганзер А.А. Сталеплавильное производство: современное состояние и направления развития. В кн.: *«Металлургия: технологии, инновации, качество: тр. XX междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1 / Под ред. Е.В. Протопопова*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. 2019:9–14. EDN: MAPRGL.
3. Johansen S.T. Mathematical modeling of metallurgical processes. In: *Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 10–12 December 2003*. Norway. 2003.
4. Svatos J., Gargulak Z. Set of Models for Planning Iron and Steel Production. *IFAC Proceedings Volumes*. 1983;16(15):55–62. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)64256-3](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)64256-3)

Общая масса концентратов на конец суток по штабелям за 01 сен 2023-30 сен 2023 (Выделено 30 из 34421) по сценарию 321.

	СЗ - Виртуальный штабель №1	СЗ - Виртуальный штабель №2	СЗ - Виртуальный штабель №3	СЗ - Виртуальный штабель №4	СЗ - Виртуальный штабель №5	СЗ - Виртуальный штабель №6	СЗ - Виртуальный штабель №7	СЗ - Виртуальный штабель №8	СЗ - Виртуальный штабель №9
01 сен 2023	40 000,00	60 000,00	4 000,00	20 000,00	10 000,00				
02 сен 2023	40 000,00	62 000,00	16 000,00	20 000,00	10 000,00				
03 сен 2023	40 000,00	62 000,00	40 000,00	20 000,00	10 000,00				
04 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	20 000,00	14 000,00				
05 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	28 000,00	30 000,00				
06 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	48 000,00	34 000,00				
07 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	38 000,00	8 000,00			
08 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	58 000,00	12 000,00			
09 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	20 000,00	12 000,00		
10 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	40 000,00	16 000,00		
11 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	20 000,00		
12 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	40 000,00	4 000,00	
13 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	8 000,00	
14 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	32 000,00	
15 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	56 000,00	
16 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	12 000,00	4 000,00
17 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	28 000,00	8 000,00
18 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	44 000,00	12 000,00
19 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	16 000,00
20 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	28 000,00
21 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	44 000,00
22 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
23 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
24 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
25 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
26 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
27 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
28 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
29 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00
30 сен 2023	40 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	62 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00	60 000,00

Рис. 6. Матрица наполнения штабелей
Fig. 6. Stack filling matrix

- Mitterlehner J., Loeffler G., Winter F., Hofbauer H., Schmid H., Zwittag E., Buerger T.H., Pammer O., Stiasny H. *Modeling and Simulation of Heat Front Propagation in the Iron Ore Sintering Process*. ISIJ International. 2004;44(11):11–20. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.11>
- Yang W., Changkook R., Choi S., Lee D., Huh W. Modeling of Combustion and Heat Transfer in an Iron Ore Sintering Bed with Considerations of Multiple Solid. *ISIJ International*. 2004;44(3):492–499. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.492>
- Fernández-González D., Martín-Duarte R., Ruiz-Bustanza Í., Mochón J., González-Gasca C., Verdeja L.F. Optimization of Sinter Plant Operating Conditions Using Advanced Multivariate Statistics: Intelligent Data Processing. *The Minerals, Metals & Materials Society*. 2016;68(8):2089–2095. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2002-2>
- Shi Z., Lv W., & Mei G. A novel soft sensing modelling approach for sulphur content estimation in hot metal pretreatment process. *Iron-making & Steelmaking: Processes, Products and Applications*. 2024;51. <http://dx.doi.org/10.1051/metal/2023073>
- Shao H., Yi Z., Chen Z., Zhou Z., Deng Z. Application of artificial neural networks for prediction of sinter quality based on process parameters control. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2019;42(3):1–18. <https://doi.org/10.1177/0142331219883501>
- Mallicka A., Dhara S., Rath S. Application of machine learning algorithms for prediction of sinter machine productivity. *Machine Learning with Applications*. 2021;6:100186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mlwa.2021.100186>
- Song L., Qing L., Xiaojie L., Yanqin S. Synthetically predicting the quality index of sinter using machine learning model. *Ironmaking & Steelmaking Processes, Products and Applications*. 2020;47(7):828–836. <https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1617573>
- Mohanan S., Mohapatra P., Kumar A. C., Adepu R. K., Koranne V.M., Prasad Y. G.S., Reddy A.S., Ramna R.V. Prediction and Optimization of Internal Return Fines Generation in Iron Ore Sintering Using Machine Learning. *Advances in Materials*. 2021;10(3):42–46. <https://doi.org/10.11648/j.am.20211003.12>
- Metzger M., Sieber A., Stirmer U. Mathematical model for a metallurgical plant, and method for optimizing the operation of a metallurgical

Химический состав в штабелях за 30 сен 2023 по сценарию 321

		Fe	Mn	P	S	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
30 сен 2023	СЗ - Виртуальный штабель №1	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №2	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №3	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №4	63,33	0,27	0,03	0,37	27,70	5,49	1,34	1,70	1,00
	СЗ - Виртуальный штабель №5	62,13	0,33	0,03	0,42	26,98	5,70	1,67	2,11	1,18
	СЗ - Виртуальный штабель №6	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №7	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №8	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №9	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №10	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №11	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35
	СЗ - Виртуальный штабель №12	61,00	0,39	0,04	0,48	26,30	5,91	1,97	2,49	1,35

Рис. 7. Химический состав полученных штабелей
Fig. 7. Chemical composition of the resulting stacks

- plant using a model. Pat. US 7,720,653 B2 USA Patent. 2010.
- Lian X., Wu D., Lu S., Liu C., Wang H., Wang J. Optimal scheduling of multi-energy medium in steel enterprises based on improved genetic simulated annealing algorithm. *Proceedings of the 2024 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. 2024:2632–2637. <https://doi.org/10.1109/CCDC62350.2024.10587574>
 - Liu Q., Shao X., Yang J.-P., Zhang J.-S. Multiscale modeling and collaborative manufacturing for steelmaking plants. *Chinese Journal of Engineering*. 2012;12:1698–1712. <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.09.27.010>
 - Zhang J., Liu Y., Liu Q. Metallurgical Process Simulation and Optimization Metallurgical Process Simulation and Optimization. *Materials*. 2022;15(23):8421. <https://doi.org/10.3390/ma15238421>
 - Леонтьев А. С., Рыбенко И. А. Опыт разработки и применения системы математического моделирования на «ЕВРАЗ ЗСМК». В кн.: *Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах: труды V Международной научно-практической конференции с международным участием / под общ. ред. И.А. Рыбенко, Т.В. Киселевой*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. 2021:250–255. EDN: ATSSJP.
 - Леонтьев А.С., Рыбенко И.А. Опыт использования и повышения юзабилити системы математического моделирования производства на металлургическом предприятии. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(1):119–126. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-119-126>
 - Леонтьев А.С., Рыбенко И.А. Опыт внедрения машинного обучения для расчета качества и производства агломерата на «ЕВРАЗ ЗСМК». В кн.: *Металлургия: технологии, инновации, качество: тр. XXII междунар. науч.-практ. конф. Ч. I / Под ред. А.Б. Юрьева*. – Сиб. гос. индустр. ун-т. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. 2021:82 – 87. EDN: HRRSAU.
 - Информация о АО «ЕВРАЗ ЗСМК»// Газета Коммерсант. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3502550> (дата обращения 16.09.2024).
 - Аналитическая платформа прогноз платформ/Сайт компании Форсайт. – URL: <https://www.fsight.ru/> (дата обращения 16.09.2024).
 - GAMS. – URL: https://www.gams.com/latest/docs/UG_ExecErrPerformance.html (дата обращения: 19.10.2023).

REFERENCES

- Lisienko V.G., Solov'eva N.V., Trofimova O.G. *Alternative metallurgy: the problem of alloying, model efficiency estimates*. Moscow : Izd. Teplotekhnika. 2007:440. (In Russ.).
- Protopopov E.V., Kalinogorskii A.N., Ganzer A.A. Steel production: current range and directions of development. In: *"Metallurgy: technologies, innovations, quality: TR. Overseas. learned.-practical. conf. H. 1 / E.V. Protopopov ed*. Novokuznetsk: ITs SibGIU. 2019:9–14. EDN: MAPRGL. (In Russ.).
- Johansen S.T. Mathematical modeling of metallurgical processes. In: *Third International Conference on CFD in the Minerals and Pro-*

- cess Industries CSIRO, Melbourne, Australia 10-12 December 2003. Norway. 2003.
4. Svatos J., Gargulak Z. Set of Models for Planning Iron and Steel Production. *IFAC Proceedings Volumes*. 1983;16(15):55–62.
[https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)64256-3](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)64256-3)
 5. Mitterlehner J., Loeffler G., Winter F., Hofbauer H., Schmid H., Zwißtag E., Buerger T. H., Pammer O., Stiasny H. Modeling and Simulation of Heat Front Propagation in the Iron Ore Sintering Process. *ISIJ International*. 2004;44(11):11–20.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.11>
 6. Yang W., Changkook R., Choi S., Lee D., Huh W. Modeling of Combustion and Heat Transfer in an Iron Ore Sintering Bed with Considerations of Multiple Solid. *ISIJ International*. 2004;44(3):492–499.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.492>
 7. Fernández-González D., Martín-Duarte R., Ruiz-Bustanza Í., Mochón J., González-Gasca C., Verdeja L. F. Optimization of Sinter Plant Operating Conditions Using Advanced Multivariate Statistics: Intelligent Data Processing. *The Minerals, Metals & Materials Society*. 2016;68(8):2089–2095.
<https://doi.org/10.1007/s11837-016-2002-2>
 8. Shi Z., Lv W., & Mei G. A novel soft sensing modelling approach for sulphur content estimation in hot metal pretreatment process. *Iron-making & Steelmaking: Processes, Products and Applications*. 2024;51.
<http://dx.doi.org/10.1051/metal/2023073>
 9. Shao H., Yi Z., Chen Z., Zhou Z., Deng Z. Application of artificial neural networks for prediction of sinter quality based on process parameters control. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2019;42(3):1–18.
<https://doi.org/10.1177/0142331219883501>
 10. Mallicka A., Dhara S., Rath S. Application of machine learning algorithms for prediction of sinter machine productivity. *Machine Learning with Applications*. 2021;6:100186.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.mlwa.2021.100186>
 11. Song L., Qing L., Xiaojie L., Yanqin S. Synthetically predicting the quality index of sinter using machine learning model. *Ironmaking & Steelmaking Processes, Products and Applications*. 2020;47(7):828–836.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1617573>
 12. Mohanan S., Mohapatra P., Kumar A.C., Adepu R.K., Koranne V.M., Prasad Y.G.S., Reddy A.S., Ramna R.V. Prediction and Optimization of Internal Return Fines Generation in Iron Ore Sintering Using Machine Learning. *Advances in Materials*. 2021;10(3):42–46.
<https://doi.org/10.11648/j.am.20211003.12>
 13. Metzger M., Sieber A., Stirmer U. Mathematical model for a metallurgical plant, and method for optimizing the operation of a metallurgical plant using a model Pat. US 7,720,653 B2 USA Patent. 2010.
 14. Lian X., Wu D., Lu S., Liu C., Wang H., Wang J. Optimal scheduling of multi-energy medium in steel enterprises based on improved genetic simulated annealing algorithm. *Proceedings of the 2024 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. 2024:2632–2637.
<https://doi.org/10.1109/CCDC62350.2024.10587574>
 15. Liu Q., Shao X., Yang J.-P., Zhang J.-S. Multiscale modeling and collaborative manufacturing for steelmaking plants. *Chinese Journal of Engineering*. 2012;12:1698–1712.
<https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.09.27.010>
 16. Zhang J., Liu Y., Liu Q. Metallurgical Process Simulation and Optimization Metallurgical Process Simulation and Optimization. *Materials*. 2022;15(23):8421.
<https://doi.org/10.3390/ma15238421>
 17. Leont'ev A.S., Rybenko I.A. Experience in the development and application of the mathematical modeling system at EVRAZ ZSMK. In: *Modeling and high-tech information technologies in technical and socio-economic systems: proceedings of the V International Scientific and Practical Conference with international participation* / I.A. Rybenko, T.V. Kiseleva ed. Novokuznetsk: ITs SibGIU. 2021:250–255. EDN: ATSSJP. (In Russ.).
 18. Leont'ev A.S., Rybenko I.A. Mathematical modelling system for metallurgical enterprise: Operation and usability enhancement. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(1):119–126.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-119-126>
 19. Leont'ev A.S., Rybenko I.A. Experience in implementing machine learning for calculating the quality and production of agglomerate at EVRAZ ZSMK. In: *Metallurgy: technologies, innovations, quality: tr. XXII international scientific and practical conference* / A.B. Yuriev ed. Novokuznetsk: ITs SibGIU. 2021:82–87. EDN: HRRSAU.
 20. Information about EVRAZ ZSMK JSC // EVRAZ Company website. Available at URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3502550> (Accessed 16.09.2024).
 21. Analytical platform platform forecast // Website of the Foresight company. Available at URL: <https://www.fsight.ru/> (Accessed 16.09.2024). (In Russ.).

22. GAMS. Available at URL: https://www.gams.com/latest/docs/UG_ExecErrPerformance.html (Accessed 19.10.2023). (In Russ.).

Сведения об авторах:

Алексей Сергеевич Леонтьев, старший менеджер группы планирования, АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

E-mail: aleksey.leontiev@evraz.com

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

E-mail: rybenkoi@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1679-0839

SPIN-код: 2300-9843

Information about the authors:

Aleksei S. Leont'ev, Senior Manager of the Planning Group, EVRAZ ZSMK JSC.

E-mail: aleksey.leontiev@evraz.com

Inna A. Rybenko, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University

E-mail: rybenkoi@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1679-0839

SPIN-код: 2300-9843

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

Поступила в редакцию 09.01.2024

После доработки 29.01.2024

Принята к публикации 05.02.2024

Received 09.01.2024

Revised 29.01.2024

Accepted 05.02.2024

Оригинальная статья

УДК 669.1:658.567.1

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-97-106

АКТУАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЦИНКСОДЕРЖАЩИХ ПЫЛЕЙ И ШЛАМОВ ДОМЕННОГО И СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВ

© 2024 г. И. В. Ноздрин¹, О. В. Коряковцева¹, О. А. Полях¹, А. Е. Аникин^{1, 2}

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

²ООО «НК-Энерджи» (Россия, 654063, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Рудокопровая, 40, корп. 14)

Аннотация. Проведен сравнительный анализ процессов переработки цинксодержащих пылей и шламов доменных и сталеплавильных производств отечественных и зарубежных предприятий черной металлургии. Актуальность темы исследования определяется существенным увеличением в последнее десятилетие содержания цинка в мелкодисперсных возгонах сталеплавильного производства в связи с возросшим объемом переработки цинксодержащего лома и скрапа. Повышенное содержание цинка в металлургических возгонах не позволяет использовать их в качестве добавок к металлургической шихте из-за негативного влияния на ход плавки и плавильное оборудование. Как следствие, возникает необходимость вывоза и складирования большого количества ценного железо- и цинксодержащего техногенного сырья с существенными экономическими потерями и дополнительной экологической нагрузкой на окружающую среду. Выполнен анализ освоенных и перспективных технологических процессов извлечения цинка из мелкодисперсных отходов. Наибольшее внимания для совершенствования и тиражирования заслуживают процесс выделения технического оксида цинка при восстановительной плавке чугуна в электропечи (разработана сотрудниками НИТУ «МИСиС») и технология получения металлического цинка и железосодержащего концентрата, включающая предварительную высокотемпературную подготовку цинксодержащих шламов в трубчатой печи с последующим выщелачиванием клинкера и электролизом раствора (разработана негосударственным частным образовательным учреждением высшего образования «Технический университет УГМК» и опробована в условиях АО «Челябинский цинковый завод»). К существенным достоинствам последней технологической схемы следует отнести возможность реализации ее по модульному принципу и использование стандартного отечественного оборудования. Ориентировочные капитальные затраты на строительство модуля производительностью 100 000 т/год металлургических шламов составляют 993,5 млн рублей при сроке окупаемости около трех лет.

Ключевые слова: цинксодержащие шламы, феррит цинка, вельцевание, щелочное выщелачивание, электролиз цинка

Для цитирования: Ноздрин И.В., Коряковцева О.В., Полях О.А., Аникин А.Е. Актуализация методов переработки цинксодержащих пылей и шламов доменного и сталеплавильного производств. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):97–106. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-97-106](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-97-106)

Original article

UPDATING OF PROCESSING METHODS OF ZINC-CONTAINING DUST AND SLUDGE FROM BLAST FURNACE AND STEELMAKING PRODUCTION

© 2024 I. V. Nozdrin¹, O. V. Koryakovceva¹, O. A. Polyakh¹, A. E. Anikin^{1, 2}

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

²**NK-Energy LLC** (40 Rudokoprovaya str., building 14, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654063, Russian Federation)

Abstract. The paper presents a comparative analysis of processing of zinc-containing dusts and sludge from blast furnace and steelmaking enterprises in domestic and foreign steel industry. The relevance of the research topic is determined by a significant increase in the zinc content in fine distillates of steelmaking in the last decade due to the increased volume of processing of zinc-containing scrap. The increased zinc content in metallurgical dust does not allow them to be used as additives to the metallurgical charge due to the negative effect on the melting process and melting equipment. As a result, it is necessary to withdraw and store a large amount of valuable iron and zinc-containing man-made raw materials with significant economic losses and additional environmental burden. The analysis of mastered and promising technological processes for the extraction of zinc from fine waste was performed. It seems that the process of isolation of technical zinc oxide during the reduction melting of cast iron in an electric furnace, developed by NUST “MISIS” employees, and a technology including preliminary high-temperature preparation of zinc-containing slurries in a tubular furnace followed by alkaline leaching of clinker and the release of metallic zinc and iron-containing concentrate, developed by the Non-state higher Educational Establishment “UMMC Technical University”, deserve the most attention for improvement and replication and tested in the conditions of Chelyabinsk Zinc Plant JSC. The significant advantages of the latest technological scheme include the possibility of implementing it according to the modular principle and using standard domestic equipment. The estimated capital costs for the construction of a module with a capacity of 100 000 tonnes per year of metallurgical sludge amount to 993.5 million rubles with a payback period of about 3 years.

Keywords: zinc-containing sludge, zinc ferrite, wetting, alkaline leaching, zinc electrolysis

For citation: Nozdrin I.V., Koryakovceva O.V., Polyakh O.A., Anikin A.E. Updating of processing methods of zinc-containing dust and sludge from blast furnace and steelmaking production. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):97–106. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-97-106](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-97-106)

Введение

Практически все металлургические процессы характеризуются образованием мелкодисперсных конденсированных фаз в виде пыли, уносимой из печной зоны отходящими газами. Природа образования пыли включает как механический унос мелкодисперсных частиц шихтовых материалов, так и конденсацию газообразных продуктов химических реакций, протекающих в высокотемпературных зонах печных агрегатов. В большинстве основных переделов черной металлургии количество образующейся пыли достигает 2 – 6 % от массы исходной шихты. В цветной металлургии количество пыли может достигать до 40 % от массы шихты (например, в процессах вельцевания). Большая часть газоочистных установок в металлургии работает по «мокрой схеме», что приводит к необходимости

строительства и содержания сложных и дорогих гидротехнических сооружений (шламоотстойников).

Масштабы металлургической отрасли приводят к необходимости колоссальных затрат на мероприятия обеспыливания отходящих газов и утилизации уловленных продуктов. Ужесточение природоохранного законодательства в части размещения и хранения промышленных отходов способствует стимулированию работ в этом направлении.

Аналитический обзор методов переработки цинксодержащих пылей и шламов

Для предприятий черной металлургии характерно высокое (до 70 %) содержание соединений железа в высокодисперсных отходах. Такие отходы следует отнести к ценному техногенно-

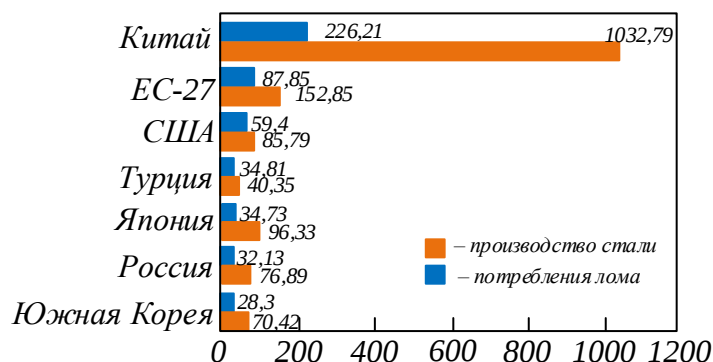


Рис. 1. Производство стали и потребление металлолома ведущими металлургическими странами [3]
Fig. 1. Steel production and scrap metal consumption by leading metallurgical countries [3]

му сырью, повторное использование которого существенно снижает стоимость готового металла. На практике, как правило, это реализуется при добавке обезвоженных шламов в шихту агломерации для экономии рудного сырья в доменной плавке. Технологическая возможность использования пыли и шламов, обеспечивающая экономическую эффективность подшихтовки таких материалов, определяется как их физическими свойствами, так и содержанием вредных примесей (цинка, свинца, кадмия, серы, щелочных металлов и др.) [1].

К наиболее вредным примесям следует отнести соединения цинка, особенно в связи с расширением использования оцинкованного скрапа в кислородно-конвертерном и электросталеплавиловом производствах [2]. Физико-химические свойства цинка приводят к циклическому повышению его содержания в пыли. Низкая температура восстановления и испарения цинка обуславливают спекание шихты, нарушение гидродинамической обстановки в печи, снижение стойкости футеровки, что отрицательно влияет на технологические показатели доменной плавки и продолжительность кампании печи. В связи с этим технологические требования ограничивают содержание (не более 0,1 % (по массе)) цинка в аглошихте. Количество оборотных пыли и шламов не превышает 15 % от общего количества образующихся в процессах.

Проведя анализ структуры производства стали и потребления металлолома (рис. 1), следует отметить факт неизбежного роста доли оцинкованного лома в структуре сырья и, следовательно, в сопутствующих отходах металлургического производства, в связи с расширением применения технологии горячего оцинкования для защиты строительных металлоконструкций и автомобильного листа.

Показана структура потребления оцинкованного проката на рис. 2. В настоящее время около половины всего цинка направляется на произ-

водство оцинкованного проката (годовое производство около 13 млн т).

Следует отметить, что выход на максимальное содержание во вторичном сырье оцинкованного лома следует ожидать для экономически развитых стран в ближайшие годы с учетом сроков амортизации деталей и узлов оборудования и механизмов. В России такой пик следует ожидать примерно на 10 лет позже из-за более позднего внедрения технологий оцинкования. Этот факт позволяет сделать существенный технологический задел при разработке и внедрении оптимальных процессов переработки цинксодержащих отходов с учетом передового мирового опыта.

Учитывая, что Россия входит в число мировых лидеров по производству стали, а также тенденцию ужесточения природоохранного законодательства, следует отметить, что в ближайшие годы будет необходимость разработки и внедрения технологий утилизации цинксодержащих отходов металлургических производств (в первую очередь предприятий черной металлургии). Актуальность рассматриваемой тематики для Кемеровской обл. – Кузбасса очевидна из-за наличия на ее территории одного из крупнейших заводов металлургического холдинга АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»), а также накопленными разнообразными металлургическими отходами.



Рис. 2. Структура потребления оцинкованной стали [4]
Fig. 2. Structure of consumption of galvanized steel [4]

Над проблемами очистки металлургической пыли от цинка и ее утилизации работают во многих странах мира. Большинство зарубежных разработок в этом направлении было реализовано в конце 90-х – начале 2000-х годов. В качестве основных способов обесцинкования отходов использовались пиро- и гидрометаллургические процессы [5; 6]. Гравитационные методы извлечения цинка из мелкодисперсных конденсатов в отличие от переработки подобных отходов химических производств (например, предприятий по производству искусственного волокна) не нашли применения в связи со сложным физико-химическим составом цинксо-державших фаз. Отечественные разработки в этом направлении отстают примерно на два десятилетия, что определяется относительно мягким природо-охранным законодательством в части платы за размещение цинксо-державших отходов. В связи с тенденцией ужесточения экологических требований наблюдается резко возросшая активность проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Следует отметить существенный прогресс в проведении научных и технологических работ для Магнитогорского, Новоли-пецкого и Череповецкого металлургических комбинатов. К аутсайдерам можно отнести предприятия компании АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

В связи с многообразием видов сырья и процессов его переработки невозможно создать универсальную технологию, удовлетворяющую всем технологическим, экономическим и экологическим требованиям. В настоящей работе сделана попытка выделения и актуализации наиболее оптимальных технологических процессов переработки цинксо-державшей металлургической пыли и шламов.

Наибольшее распространение получили пиро- и гидрометаллургические способы переработки цинксо-державших отходов. Следует отметить, что эффективность применяемых технологий определяется не столько технологическими приемами и конструкцией оборудования, а, в первую очередь, содержанием цинка во вторичном сырье. При содержании цинка в отходах менее 15 % невозможно добиться положительной рентабельности процесса [7]. Поэтому в качестве основополагающих требований к современным процессам переработки лома ставится сортировка их по наличию цинковых покрытий, обеспечивающих содержание цинка в пылях выше 20 %. Кроме того, на ряде зарубежных предприятий черной металлургии внедрены технологии термического [8; 9] или химического [10 – 12] обесцинковывания ломов перед переработкой.

К освоенным зарубежными технологиями можно отметить следующие наиболее перспективные: факельная плавка HPD; шахтные плавки Oxid Recycle и MF; переработка в печах с вращающейся подиной DRUIRON- и AllMet-процессы; AUSMELT и PLASMA-DUST-процессы; процесс Primus и Romelt процессы [6]. К наиболее интересным и перспективным для использования в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» можно отнести следующие технологии: Primus- и Romelt-процессы; технологию получения цинкового порошка из металлургической пыли, разработанную негосударственным частным образовательным учреждением высшего образования «Технический университет УГМК» (НЧОУ ВО «ТУ УГМК»).

Primus-процесс был разработан и технологически освоен в первом десятилетии 2000-х годов на сталеплавильных предприятиях в Люксембурге и Тайване фирмой «Paul Wurth» [13]. Технология предназначена для переработки аспирационной и газоочистной пылей металлургических агрегатов с содержанием цинка и свинца более 5 %. Производительность разработанного процесса была доведена до 100 000 т/год пыли.

Технология Primus (рис. 3) является двухстадийной: на первой стадии использовали многоподовую печь, предназначенную для сушки, нагрева и начального восстановления железа; на второй стадии применяли электродуговую печь с плавильным блоком Primus.

На первом этапе процесса организована термическая обработка смеси рудного сырья и пыли сталеплавильных печей в вертикальной шахтной многоподовой обжиговой печи, обеспечивающей сушку и прокалку шихты, а также частичное восстановление и возгонку свинца и цинка. В качестве топлива используют низкосольные сорта углей. На втором этапе процесса термически обработанная шихта поступает на восстановительную плавку в дуговую электропечь для получения чугуна. Конденсированные возгоны в виде оксида цинка (с содержанием около 55 – 60 % Zn) улавливаются в пылегазовом тракте рукавными фильтрами и передаются на извлечение цинка по стандартной гидрометаллургической технологии. Достоинством рассматриваемой схемы является высокая степень извлечения цинка (до 96 %), а недостатком – большой расход электроэнергии с учетом последующих выщелачивания и электролиза цинка. В Кемеровской обл. – Кузбассе этим направлением занимались ООО «Кузбассэко» и ООО «НК-сталь» для решения вопросов утилизации шламов доменного производства. В настоящее время работы по этому направлению приостановлены.

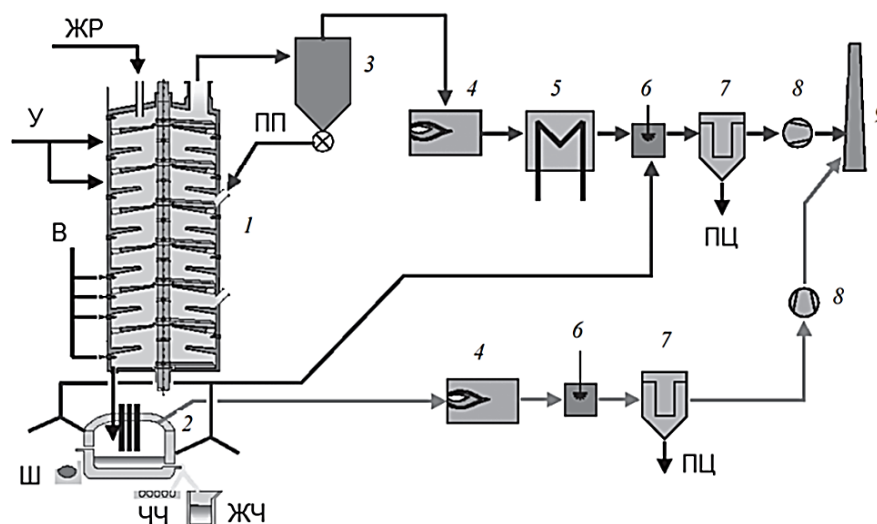


Рис. 3. Технологическая схема процесса Primus:

1 – многоподовая печь; 2 – электропечь; 3 – камеры дожигания газа; 4 – рекуператор-подогреватель воздуха горения; 5 – холодильники; 6 – тканевые фильтры; 7 – дымососы; 8 – дымовая труба; 9 – плавильный агрегат; ЖР – железная руда; У – уголь; В – воздух; Ш – шлак; ЧЧ – чушковый чугун; ЖЧ – жидкий чугун; ПГ – продукты горения; ТГ – технологический газ электропечи; АГ – аспирационные газы; ПП – пыль на рециклинг процесса Primus; ПЦ – пыль на производство цинка и свинца

Fig. 3. Technological scheme of the Primus process Gorenje:

1 – multi-furnace; 2 – electric furnace; 3 – gas afterburning chambers; 4 – recuperator-gorenje air heater; 5 – refrigerators; 6 – fabric filters; 7 – smoke pumps; 8 – chimney; 9 – melting unit; ЖР – iron ore; У – coal; В – air; Ш – slag; ЧЧ – pig iron; ЖЧ – liquid cast iron; ПГ – combustion products; ТГ – process gas of an electric furnace; АГ – aspiration gases; ПП – dust for recycling of the PRIMUS process; ПЦ – dust for the production of zinc and lead

Romelt-процесс был разработан сотрудниками НИТУ «МИСиС» [14]. Технология реализуется (рис. 4) в комбинированной отражательной плавильной печи для восстановления железосодержащего (в том числе вторичного) сырья в металло-шлаковых расплавах. В качестве восстановителя и топлива можно использовать различное углеродсодержащее сырье, в том числе угли энергетических сортов. Необходимое тепло для расплавления компонентов шихты, нагрева расплава до температуры 1500 – 1600 °С и протекания химических реакций генерируется за счет газификации угля в барбатированном нижнем слое расплава и дожигания оксида СО и водорода под сводом печи с подачей воздушного дутья в верхний ряд фурм. Образующийся чугун с содержанием углерода 4,0 – 4,8 % и шлак разделяются в «спокойной» зоне печи с последующим выпуском.

Легковосстановимые металлы (цинк, свинец и кадмий) практически полностью в виде паров «эвакуируются» в газовый тракт, где окисляются до оксидов и улавливаются в мокрой газоочистке. Содержание цинка в шлаках достигало 32,0 % при степени извлечения 99,8 %. Полученные шламы перерабатывают на металлический цинк по стандартной гидрометаллургической технологии.

Наиболее проработанной с учетом большого опыта изучения свойств и особенностей поведе-

ния вторичных цинксодержащих материалов является технология получения цинкового порошка из металлургической пыли, разработанная НЧОУ ВО «ТУ УГМК» и опробованная в условиях АО «Челябинский цинковый завод» [15 – 18].

Главной технологической проблемой переработки цинксодержащих отходов заводов черной металлургии является наличие значительного количества железа, которое образует с цинком весьма прочные ферриты. Приведены результаты аттестации химического и фазового составов образцов пыли сталеплавильного производства (рис. 5, табл. 1) [19; 20]. Цинк в образцах пыли содержится как в оксидной, так и в ферритной формах, что обуславливает необходимость предварительного разложения ферритов.

Предложенная схема включает стадию пирометаллургического разрушения ферритов с последующим селективным выщелачиванием цинка каустической содой и его электроэкстракцией с получением порошка.

В качестве основного технологического решения, способствующего разрушению ферритов цинка, предложена предварительная обработка шламов во вращающейся футерованной печи при температуре около 1000 °С в присутствии извести или известняка. Основным агрегатом предложено использовать стандартную вельц-

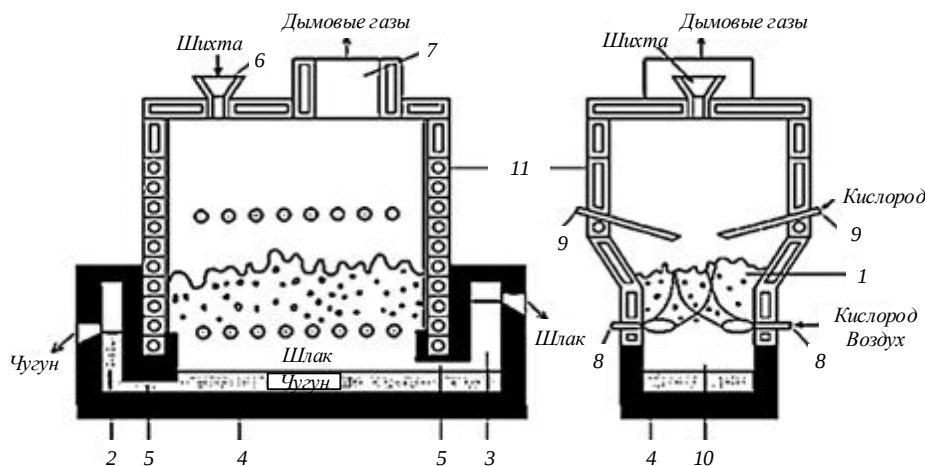


Рис. 4. Схема процесса Romelt:

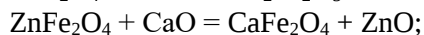
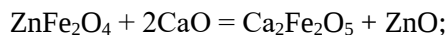
1 – барботируемый шлак; 2 – металлический отстойник; 3 – шлаковый отстойник; 4 – под печи с огнеупорной футеровкой; 5 – перегородки; 6 – загрузочная воронка; 7 – дымоотводящий патрубок; 8 – барботажные фурмы; 9 – фурмы для дожигания; 10 – спокойный шлак; 11 – водоохлаждаемые панели

Fig. 4. Scheme of the Romelt process:

1 – bubbled slag; 2 – metal sump; 3 – slag sump; 4 – for furnaces with refractory lining; 5 – overflows; 6 – loading funnel; 7 – exhaust pipe; 8 – bubbling tuyeres; 9 – afterburning tuyeres; 10 – calm slag; 11 – water-cooled panels

печь диаметром 2,8 м и длиной 41 м [21], в качестве топлива применяли коксовую мелочь.

Процесс разложения ферритов можно описать следующими уравнениями [9]:



После обработки шламов в вельц-печи цинковый клинкер подвергают выщелачиванию, цементационной очистке полученного раствора и выделению гранулятов цинка на катоде в электролизной ванне. Аппаратурно-технологическая схема процесса представлена на рис. 6.

Применение одной стандартной вельц-печи диаметром 2,8 м позволяет перерабатывать до

100 000 т пыли/год с получением около 16 000 т/год цинкового порошка. Полученный порошок предлагается использовать для цементационной очистки в различных гидрометаллургических процессах. Себестоимость цинкового порошка составила около 75 000 руб./т, что почти в два раза ниже себестоимости аналогичного материала в условиях действующего производства АО «Челябинский цинковый завод». Экономическая эффективность проекта позволит окупить затраты на производство в течение 1,5 – 2,7 года в зависимости от реализованной схемы [17].

Проведена оценка структуры затрат на реализацию подобного производства. Результаты расчета в текущих ценах представлены в табл. 2.

К основным достоинствам предлагаемого процесса можно отнести следующее:

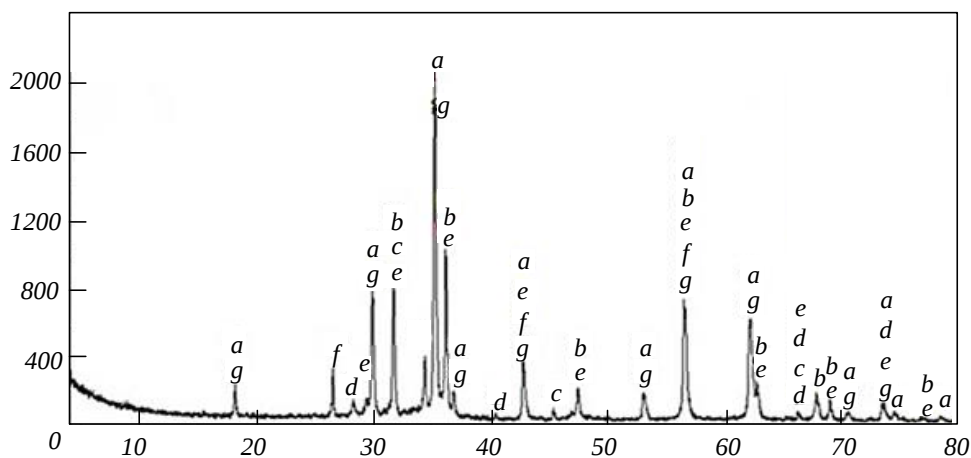


Рис. 5. Фазовый состав цинкосодержащей металлургической пыли (ДСП):

a – ZnFe_2O_4 ; b – ZnO ; c – NaCl ; d – KCl ; e – CaCO_3 ; f – C; g – Fe_3O_4

Fig. 5. Phase composition of zinc-containing metallurgical dust (chipboard):

a – ZnFe_2O_4 ; b – ZnO ; c – NaCl ; d – KCl ; e – CaCO_3 ; f – C; g – Fe_3O_4

Химический состав цинкосодержащей металлургической пыли
Table 1. Chemical composition of zinc-containing metallurgical dust

Соединения	Содержание, кг									
	Zn	Fe	Pb	Ca	K	Na	C	Cl	O ₂	Проч.
ZnO	9,86	–	–	–	–	–	–	–	2,4	–
ZnFe ₂ O ₄	1,60	20,00	–	–	–	–	–	–	11,4	–
Fe ₃ O ₄	–	15,00	–	–	–	–	–	–	5,7	–
NaCl	–	–	–	–	–	6,36	–	0,90	–	1,14
KCl	–	–	–	–	2,75	–	–	0,90	–	1,14
C	–	–	–	–	–	–	1,68	–	–	–
CaO	–	–	–	7,59	–	–	–	–	–	–
PbO	–	–	1,59	–	–	–	–	–	–	–
Итого, %	21,46	35	1,59	7,59	2,75	6,36	1,68	1,79	19,5	2,28
										100

– высокая степень извлечения цинка из железосодержащей пыли и шламов (более 90 %), обеспечивающая возможность повторного применения их в качестве вторичного металлургического сырья;

– относительно низкие капитальные затраты, стандартное недефицитное оборудование и возможность реализации технологии по модульному принципу;

– хорошие технологические перспективы при соответствующем уровне исследований переработки пылевидных материалов с содержанием цинка менее 20 %.

Выводы

В последние годы наблюдается рост содержания цинка в пылевидных отходах предприятий черной металлургии в связи с увеличением его содержания в ломах. С учетом значительно-го объема накопленных цинкосодержащих пыли и шламов черной металлургии и ужесточения

природоохранного законодательства решение вопросов их утилизации выходит на первый план. Для успешной переработки вторичного мелкодисперсного сырья необходимо решить вопросы повышения концентрации в нем цинка. Это влечет необходимость организации процессов предварительной сортировки ломов перед плавкой, а также внедрения процессов термического или химического удаления цинка. Из рассматриваемых процессов наиболее интересной представляется технология утилизации цинка, разработанная негосударственным частным образовательным учреждением высшего образования «Технический университет УГМК» и опробованная в условиях АО «Челябинский цинковый завод». Эта схема может быть реализована по модульному принципу с переработкой около 100 000 т/год металлургических шламов. Ориентировочные капитальные затраты на внедрение такого модуля составляют 993,5 млн рублей.

Инвестиции в передел извлечения цинка из пыли сталеплавильного производства (20 % Zn)
Table 1. Investments in the conversion of zinc extraction from particle board dusts and converters (20 % Zn)

Производительность, т/год	Срок строительства, лет	Инвестиции (млн руб.)					
		Инжиниринг	Оборудование	Строительные работы	Монтажные работы	Оборотные средства	Всего
100 000	2	46,02	508,00	364,1	65,43	10,00	993,50

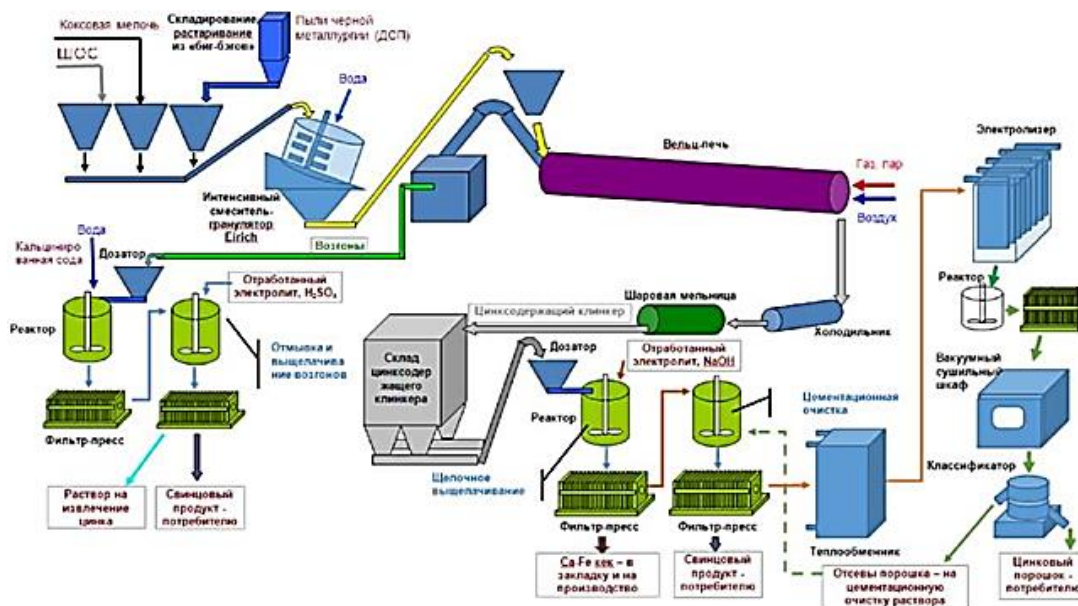


Рис. 6. Аппаратурно-технологическая схема одностадийного вальцевания металлургических шламов с получением цинкового порошка [15]

Fig. 6. Hardware and technological scheme of single-stage welding of metallurgical sludge to produce zinc powder [15]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов А.В. *Производство цветных металлов и сплавов. Т. 3. Вторичная металлургия тяжелых цветных металлов.* Москва: «Академкнига». 2008:207–219.
2. Stuart C. Global Symposium of Recycling Waste Treatment and Clean Technology. *REWAS' 99: TMS and Inasmelt.* Warrendale. 1999;II:1287–1289.
3. *Производство стали и потребление металлолома ведущими металлургическими странами в 2021 г.* – URL: <http://www.topic.ru/statistics/chemicals/mining-metals-and-minerals/proizvodstvo-stali-i-potreblenie-loma-na-vedushchikh-mirovykh-rynkhkh/?ysclid=1mt03bqrq165930006> (дата обращения: 09.01.2024).
4. *Ситуация на рынке оцинкованного проката / Металлургический бюллетень* – 21 сентября 2023 г. – URL: <https://www.metalbulletin.ru/a/6F?ysclid=1mt0qjkfyu590081709> (дата обращения: 09.01.2024).
5. *Principal Uses of Lead and Zinc:* ILZS;2003.
6. Тарасов А.В., Бессер А.Д., Мальцев В.И. *Металлургическая переработка вторичного цинкового сырья.* Москва: Гинцветмет. 2004:99–107.
7. Казанбаев Л.А., Козлов П.А., Кубасов В.Л., Колесников А.В. *Гидрометаллургия цинка. Гидрометаллургия цинка. Очистка растворов и электролиз.* Москва: ИД «Руда и металлы». 2006:8–17.
8. Okada Y., Takeuchi Y., Fujio S. Development of Method for Removal of Zinc from Automobile Body Scraps. In: *Galvatech '95 Conference Proceedings, ISS.* Pittsburgh, PA, USA. 1995:549.
9. Southwick L.M. Global Symposium on Recycling Waste Treatment and Clean Technology. *REWAS'99.* 1999;II:311–325.
10. Groult D., Marechale R., Klut P., Bonnema B.T.H. Recycling of Metals and Engineered Materials. *TMS.* 2000:201–209.
11. Van Rij P.W., Campenon B., Mooij J.N. *Dezincing of Steel Scrap.* *Iron and Steel Engineer.* 1997:32.
12. Southwick L.M. *Dezincing of Galvanized Steel – Latest Developments. Environmentally Friendly Lead and Zinc.* In: *The Challenge of the Recycling Millenium, Supplementary Volume, ILZSG's 7th International Recycling Conference.* London: The Chameleon Press Ltd.1998:87–96.
13. Hansmann T., Frieden R., Roth J.L. Recycling of EAF Dust and of the Other Zinc Bearing Residues with the PRIMUS-process. In: *Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects.* Lulea University of Technology, MEFOS, TMS, Lulea, Sweden. 2002:405–414.
14. Romenets V., Pokhvisnev Yu., Valavin V., Vandariyev S., Zaytsev A. Romelt Process – New Technology for Industrial Wastes Recycling. *Proceedings EMC.* GDMB, Clausthal-Zellerfeld. 2001;2:25–39.
15. Ивакин Д.А., Решетников Ю.В., Ивакин Д.А. Разработка экологичной технологии переработки пылей электродуговых печей совместно с известковым шламом очистки

- сточных вод цинковых предприятий. *Цветные металлы*. 2015;5:71–75.
<http://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.14>
16. Якорнов Д.А., Паньшин А.М., Козлов П.А., Ивакин Д.А. Современное состояние переработки пылей электродуговых печей в России и за рубежом. В кн.: *Конгресс Техноген – 2017, научная конференция «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований», V Форум "Уральский Рынок Лома, Промышленных И Коммунальных Отходов»*. Екатеринбург, 05-09 июня 2017 года. Екатеринбург: ИМЕТ УрО РАН. 2017:64–70. EDN: YTDTHXV.
 17. Козлов П.А., Якорнов С.А., Паньшин А.М., Ивакин Д.А. Разработка и внедрение технологии получения цинкового порошка из цинксодержащих пылей черной металлургии. *Цветные металлы*. 2020;5(929):6–11.
 18. 18 Пат. 2732817 РФ С1. Способ переработки пылей электродуговых печей / П.А. Козлов, С.А. Якорнов, А.М. Паньшин и др.; завл. 23.12.2019; опубл. 22.09.2020.
 19. Kozlov P.A., Zatonsky A.V., Panshin A.M., Research and Development of Technogenic Wastes Recycling with Recovery of Zinc, Lead and Tin EMC-2015, Pb–Zn. *Dusseldorf*. 2015:965–975.
 20. Грудинский П.И., Корнеев В.П., Дюбанов В.Г., Козлов П.А., Леонтьев Л.И. Пыль электродуговой печи – перспективный материал для производства цветных металлов и чугуна. *Перспективные материалы*. 2016;10:69–75. EDN:WNEQJP.
 21. Козлов П.А. *Вельц-процесс*. Москва: ИД «Руда и металлы». 2002:175.
 4. The situation on the galvanized steel market / *Metallurgical Bulletin* – September 21, 2023. – URL: <https://www.metalbulletin.ru/a/6F?ysclid=lm0qjkfyu590081709> (Accessed: 09.01.2024). (In Russ.).
 5. *Principal Uses of Lead and Zinc*: ILZS. - 2003.
 6. Tarasov A.V., Besser A.D., Mal'tsev V.I. *Metallurgical processing of secondary zinc raw materials*. Moscow: Gintsvetmet. 2004:99–107. (In Russ.).
 7. Kazanbaev L.A., Kozlov P.A., Kubasov V.L., Kolesnikov A.V. *Hydrometallurgy of zinc. Hydrometallurgy of zinc. Purification of solutions and electrolysis*. Moscow: Izdatel'skii dom «Ruda i metally». 2006:8–17. (In Russ.).
 8. Okada Y., Takeuchi Y., Fujio S. Development of Method for Removal of Zinc from Automobile Body Scraps. In: *Galvatech '95 Conference Proceedings, ISS*. Pittsburgh, PA, USA. 1995:549.
 9. Southwick L.M. Global Symposium on Recycling Waste Treatment and Clean Technology. *REWAS'99*. 1999;II:311–325.
 10. Groult D., Marechale R., Klut P., Bonnema B.T.H. Recycling of Metals and Engineered Materials. *TMS*. 2000:201–209.
 11. Van Rij P.W., Campenon B., Mooij J.N. *Dezincing of Steel Scrap. Iron and Steel Engineer*. 1997:32.
 12. Southwick L.M. Dezincing of Galvanized Steel – Latest Developments. Environmentally Friendly Lead and Zinc: The Challenge of the Recycling Millennium, Supplementary Volume, ILZSG's 7th International Recycling Conference. London: The Chameleon Press Ltd. 1998:87–96.
 13. Hansmann T., Frieden R., Roth J.L. Recycling of EAF Dust and of the Other Zinc Bearing Residues with the PRIMUS-process. In: *Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects*. Lulea University of Technology, MEFOS, TMS, Lulea, Sweden. 2002:405–414.
 14. Romenets V., Pokhvisnev Yu., Valavin V., Vandariyev S., Zaytsev A. Romelt Process – New Technology for Industrial Wastes Recycling. *Proceedings EMC*. GDMB, Clausthal-Zellerfeld. 2001;2:25–39.
 15. Ivakin D.A., Reshetnikov Yu.V., Ivakin D.A. Development of an environmentally friendly technology for processing electric arc furnace dusts in conjunction with lime sludge for wastewater treatment of zinc enterprises. *Tsvetnye metally*. 2015;5:71–75. (In Russ.).
<http://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.14>

REFERENCES

1. Tarasov A.V. *Production of non-ferrous metals and alloys. Vol. 3. Secondary metallurgy of heavy non-ferrous metals*. Moscow: «Akademkniga». 2008:207–219. (In Russ.).
2. Stuart C. Global Symposium of Recycling Waste Treatment and Clean Technology. *REWAS' 99: TMS and Inasmelt*. – Warrendale. 1999;II:1287–1289.
3. Steel production and scrap metal consumption by leading metallurgical countries in 2021. – URL: <http://www.topic.ru/statistics/chemicals/mining-metals-and-minerals/proizvodstvo-stali-i-potreblenie-loma-na-vedushchikh-mirovykh-rynках/?ysclid=lm03bzrqq165930006> (accessed: 09.01.2024). (In Russ.).

16. Yakornov D.A., Pan'shin A.M., Kozlov P.A., Ivakin D.A. The current state of processing of electric arc furnace dusts in Russia and abroad. In: *Technogen Congress - 2017, scientific conference "Fundamental research and applied developments of processes of processing and utilization of technogenic formations"*, V Forum "Ural Market of Scrap, Industrial and Municipal Waste". Yekaterinburg, 05-09 June 2017. Ekaterinburg: IMET UrO RAN. 2017:64–70. EDN: YTDTXB. (In Russ.).
17. Kozlov P.A., Yakornov S.A., Pan'shin A.M., Ivakin D.A. Development and implementation of technology for the production of zinc powder from zinc-containing dusts of ferrous metallurgy. *Tsvetnye metally*. 2020;5(929):6–11. (In Russ.).
18. Kozlov P.A., Yakornov S.A., Pan'shin A.M., etc. A method for processing electric arc furnace dusts. Pat. 2732817 RF C1. application 23.12.2019; publ. 22.09.2020; the applicant, the patent holder of the NCHOU VO "UMMC Technical University". 2020. (In Russ.).
19. Kozlov P.A., Zatonsky A.V., Panshin A.M., Research and Development of Technogenic Wastes Recycling with Recovery of Zinc, Lead and Tin EMC-2015, Pb-Zn. - 2015, June 14-17. Germany: Dusseldorf. 2015:965–975.
20. Grudinskii P.I., Korneev V.P., Dyubanov V.G., Kozlov P.A., Leont'ev L.I. Electric arc furnace dust is a promising material for the production of non-ferrous metals and cast iron. *Perspektivnye materialy*. 2016;10:69–75. EDN:WNEQJP. (In Russ.).
21. Kozlov P.A. *The Welz process*. Moscow: Izdatel'skii dom «Ruda i metally». 2002:175. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Игорь Викторович Ноздрин, д.т.н., доцент, профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: kafcmet@sibsiu.ru
SPIN-код: 5830-8911

Олеся Валерьевна Коряковцева, аспирант кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, заведующий лабораторией Центра «Геоэколо-

гия», Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: koryakovceva76@inbox.ru

Ольга Анатольевна Полях, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

SPIN-код: 5525-0398

Александр Ефимович Аникин, заместитель директора по техническим вопросам, ООО «НК-Энерджи»

E-mail: anikin1985@rambler.ru

SPIN-код: 7641-5740

Information about the authors:

Igor' V. Nozdrin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

SPIN-код: 5830-8911

Olesya V. Koryakovtseva, Postgraduate student of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Head of the laboratory of the Center "Geoecology", Siberian State Industrial University

E-mail: koryakovceva76@inbox.ru

Ol'ga A. Polyakh, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

SPIN-код: 5525-0398

Aleksandr E. Anikin, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director for Technical Issues, of NK-Energy

E-mail: anikin1985@rambler.ru

SPIN-код: 7641-5740

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

Поступила в редакцию 11.01.2024

После доработки 27.05.2024

Принята к публикации 30.05.2024

Received 11.01.2024

Revised 27.05.2024

Accepted 30.05.2024

Оригинальная статья

УДК 336.22:338.2

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-107-120

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЛОГОВЫХ РЕФОРМ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАЛОГООБЛОЖЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН. ЧАСТЬ 2

© 2024 г. Э. А. Муминова, З. М. Усманова

Ферганский политехнический институт (Узбекистан, 150100, Фергана, ул. Ферганская, 86)

Аннотация. Проведен сравнительный анализ состояния налоговой системы Республики Узбекистан до и после осуществления ряда реформ, а также достижения целевых параметров налоговой реформы. В качестве основных направлений исследования выбраны уровень налоговой нагрузки и сбалансированность налогового бремени при разных системах налогообложения хозяйствующих субъектов Узбекистана, унификация налогов и оптимизация налоговой отчетности, влияние налоговой реформы на динамику доходной и расходной частей Государственного бюджета. Исследовано развитие нормативно-правовых основ налогообложения, в том числе правовой защищенности экономических субъектов в ходе налогового администрирования; а также трансформация в ходе налоговой реформы механизмов и инструментов налогового контроля. Представлены результаты оценки влияния налоговых реформ на предпринимательский климат в стране, в том числе на различные типы субъектов хозяйствования (малый бизнес, фермерские хозяйства, семейный бизнес и другие). Выделены позитивные последствия происходящих процессов реформирования: повышение прозрачности правил налогообложения, улучшение административных процедур в области налогообложения, снижение налоговой нагрузки. Показано, что совершенствование системы взимания налогов, в частности налога на добавленную стоимость, способствовало выравниванию цепочки создания добавленной стоимости, гармонизации интересов участников этой цепочки, сокращению числа предприятий, использующих различные схемы «ухода от налогов». Акцентируется внимание на том, что реализованы определенные меры по совершенствованию взаимодействия государственных органов с субъектами налогообложения, претерпели изменения механизмы этого взаимодействия, а также методы налогового контроля и принципы решения налоговых споров. Отмечается, что процесс реформирования еще не завершен, требуются последовательные действия по трансформации налоговой системы с целью дальнейшего создания условий для экономического роста Республики Узбекистан.

Ключевые слова: налогообложение, налоговая система, налоговые реформы, налоговое администрирование

Для цитирования: Муминова Э.А., Усманова З.М. Исследование влияния налоговых реформ на функционирование системы налогообложения Республики Узбекистан. Часть 2. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):107–120. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-107-120](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-107-120)

Original article

STUDY OF INFLUENCE OF TAX REFORMS ON THE FUNCTIONING OF TAXATION SYSTEM OF THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN. PART 2.

© 2024 E. A. Muminova, Z. M. Usmanova

Ferghana Polytechnic Institute (86 Ferghanskaya str., Ferghana, 150100, Uzbekistan)

Abstract. A comparative analysis of the state of tax system of the Republic of Uzbekistan before and after the implementation of a number of reforms, as well as the achievement of target parameters of tax reform, was carried out. The main directions of the study are the level of tax burden and the balance of tax burden under

different taxation systems of economic entities of Uzbekistan, the unification of taxes and optimization of tax reporting, the impact of tax reform on the dynamics of revenue and expenditure parts of the State budget. In addition, the development of regulatory framework for taxation, including legal protection of economic entities during tax administration, and transformation of tax control mechanisms and tools during tax reform were studied. The assessment results of tax reforms impact on the business climate in the country, including on various types of business entities (small businesses, farms, family businesses and others) are presented. The positive consequences of the ongoing reform processes are highlighted, such as increasing the transparency of tax rules, improving administrative procedures in the field of taxation, and reducing the tax burden. It is shown that the improvement of tax collection system, in particular the value added tax, contributed to the alignment of value chain, harmonization of the interests of participants in this chain, and the reduction of number of enterprises using various tax avoidance schemes. Attention is also focused on the fact that certain measures have been implemented to improve the interaction of state bodies with tax subjects, the mechanisms of this interaction have changed, as well as methods of tax control and principles of resolving tax disputes. It is noted that the reform process has not yet been completed and consistent actions are required to transform the tax system in order to further create conditions for the economic growth of the Republic of Uzbekistan.

Keywords: taxation, tax system, tax reforms, tax administration

For citation: Muminova E.A., Usmanova Z.M. Study of influence of tax reforms on the functioning of taxation system of the Republic of Uzbekistan. Part 2. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):107–120. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-107-120](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-107-120)

Введение

После рассмотрения изменения состава налогов после реформирования налоговой системы, динамики поступлений по отдельным налогам, а также факторов, явившихся причинами этой динамики [1], целесообразным представляется анализ этапов и направлений реализации налоговых реформ в Республике Узбекистан. Достаточно длительный процесс реформирования налоговой системы на текущий момент завершается этапом реализации последней налоговой реформы в Республике Узбекистан, которая стартовала в 2018 г. в результате принятия Концепции совершенствования налоговой политики Республики Узбекистан (№ УП-5468 от 29.06.2018 г.). Основными целями трансформации налоговой системы выступало следующее: последовательное сокращение налоговой нагрузки хозяйствующих субъектов, упрощение системы налогообложения и совершенствование налогового администрирования. Опираясь на исследования особенностей применения общей и упрощенной систем налогообложения предприятий Узбекистана [2; 3], влияния реформ на малый и крупный бизнес разных отраслей экономики [4 – 7], особенностей изменения налогов и процентных ставок по некоторым налогам [8 – 10], а также содержания налогового администрирования [11 – 14], проанализируем исполнение основных направлений налоговой реформы в Республике Узбекистан.

Материалы и методы исследования

Анализ исполнения ключевых декларируемых направлений налоговой политики в рамках

настоящей работы базировался на использовании коэффициентного анализа (рассчитывали и анализировали отношение доходов бюджета к ВВП, коэффициент налогового бремени и другие показатели), сравнительного подхода (сопоставляли налоговую нагрузку среднестатистического предприятия при разных системах налогообложения), отраслевого анализа (сравнивали особенности налогообложения и налоговую нагрузку разных компаний отрасли), диалектического подхода (сравнение налоговой нагрузки до и после начала реформ), а также системного и ситуационного подходов, позволяющих рассматривать происходящие изменения в налоговой сфере в неразрывной взаимосвязи с финансовым и инвестиционным потенциалами организаций, а также экономическую ситуацию в сфере малого и крупного бизнесов в условиях реформирования налоговой системы.

Результаты исследования

Первым исследуемым направлением налоговой реформы являются снижение уровня налоговой нагрузки на экономику, ликвидация дисбалансов в уровне налогового бремени между разными с точки зрения систем налогообложения (упрощенной и общеустановленной) категориями субъектов хозяйствования.

Проведенный анализ динамики отношения доходов Консолидированного бюджета к ВВП свидетельствует об относительном постоянстве с 2018 г. В 2020 г. наблюдается некоторое снижение (до 25,9 с 26,3 % в 2019 г. и в 2021 г. вновь наметился рост) (табл. 1). При этом ста-

Т а б л и ц а 1

Динамика налоговых доходов и их доля в валовой выручке в 2018 и 2022 гг. в сопоставимых условиях (на условном примере)

Table 1. Dynamics of the amount and share of taxes in gross revenue in 2018 and in 2022 under comparable conditions (using a conditional example)

Показатель	Сумма налогов в 2018 г., тыс. сумов		Сумма налогов 2018 г. в условиях налогов 2022 г., тыс. сумов	
	Система налогов с числ. работн. свыше 250 чел.	Упрощенная система налогов с численностью работников до 250 чел. (МП)	Система налогов с оборотом свыше 1 млрд сумов	Система налогов с оборотом до 1 млрд сумов
Валовая выручка (стоимость реализуемой продукции)	120 000	120 000	120 000	120 000
Чистая выручка (за минусом НДС или ЕНП)	100 000	114 300	105 000	115 400
Себестоимость (в том числе ФОТ – 30 000 сумов)	80 000	80 000	80 000	80 000
Прибыль	20 000	34 300	25 000	35 400
<i>Налоги</i>				
НДС (без учета зачета) (ставка в 2018 г. – 20 %, в 2022 г. – 15 %)	20 000	–	15 000	–
Единый социальный платеж (с 2020 г. – социальный налог) (ставка в 2018 г. – 25 %, для МП – 15 %; в 2022 г. – 12 %)	7 500	4 500	3 600	3 600
Налог на имущество (ставка в 2018 г. – 5 %, в 2022 г. – 1,5 %)	3 300	–	1000	1 000
Земельный налог (ставки индексируются каждый год)	1 200	–	1 700	1 700
Налог на прибыль (ставка в 2018 г. – 14 %; в 2022 г. – 15 %)	1 120	–	2 805	–
Единый налоговый платеж (с 2019 г. – налог с оборота) (ставка налога в 2018 г. – 5 %; в 2022 г. – 4 %)	–	5 700	–	4 600
Сумма всех налогов	33 120	10 200	24 105	10 900
Доля всех налогов в валовой выручке, %	27,6	8,5	20,1	9,1

бильное увеличение представлено отношением поступления доходов в госбюджет к ВВП за рассматриваемый период. При декларируемом снижении налогов для предприятий и физических лиц их доля к ВВП растёт.

Причиной такой динамики является преобладание среди налогоплательщиков тех, кто предпочитает использовать упрощенный порядок уплаты налогов (293 000 из 300 000 налогоплательщиков в 2018 г.). Лишь 7000 плательщиков применяли общеустановленный порядок налогообложения,

уплачивая НДС, налог на прибыль, налог на имущество и земельный налог. При этом менее одной тысячи налогоплательщиков платили акцизы, налог на недра, а также различные изъятия из прибыли (АО «Навоийский горно-металлургический комбинат» (АО «НГМК»), АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат» (АО «АГМК») и другие) [15]. Именно эти предприятия несли на себе основную налоговую нагрузку. Реальную налоговую нагрузку на бизнес (без учета указанных тысячи предприятий) целесообразно определить методом экспертной оценки на условном примере.

Для демонстрации влияния различных систем налогообложения на деятельность среднестатистического предприятия, использующего общеустановленную систему налогообложения (крупные и средние предприятия) или упрощенную систему налогообложения (малые предприятия), была просчитана налоговая нагрузка в условиях налогообложения (2018 г.) и в условиях налогов, применявшихся после реформирования (2022 г.).

В 2018 г. уровень налогового бремени для крупных и средних предприятий был заметно выше (почти в три раза – 27,6 против 8,5 %), чем для малых предприятия (табл. 1).

Налоговая реформа позволила снизить налоговую нагрузку на крупные и средние предприятия на 7,5 % (с 27,6 до 20,1 %), в то время как нагрузка на малые предприятия с оборотом до 1 млрд сумов почти не изменилась. При этом налоговая нагрузка для малых предприятий с оборотом более 1 млрд сумов увеличилась в 2,5 раза (с 8,5 до 20,1 %).

Анализ эффективности реализации первого направления налоговой реформы позволяет констатировать следующее:

- снижение уровня налоговой нагрузки в целом на экономику незначительное по сравнению с 2018 г. (год начала налоговой реформы); несмотря на предпринимаемые усилия по реформированию налоговой системы в 2021 г. имело место увеличение налоговой нагрузки до 26,7 % к ВВП, а в 2022 г. – на уровне 30,3 % к ВВП (главные причины: значительная часть налоговой нагрузки приходится на крупные предприятия (АО «НГМК», АО «АГМК»); доходная часть государственного бюджета должна быть достаточной для финансирования возрастающих расходов; при снижении налоговой нагрузки государство должно изыскивать выпадающие доходы для покрытия своих расходов; реализация налоговых реформ пришлась на пандемийный период и требовала, с одной стороны, установ-

ления новых налоговых льгот, с другой – финансирования возрастающих расходов бюджета; нестабильная политическая и экономическая ситуация в мире в целом и в республике требует стабильного государственного бюджета);

- произошло в определенной мере уменьшение диспропорций в уровне налогового бремени между хозяйствующими субъектами, уплачивающими налоги по упрощенной и общеустановленной системам налогообложения, за счет отмены налогов на инфраструктуру, отчисления в государственные фонды; снижения ставок налогов (НДС – с 20 до 15%; социальный налог – с 25 до 12 %; НДСЛ – с 22 до 12 %; налог на имущество – с 5,0 до 1,5 %; налог с оборота – с 5 до 4 % и др.); уменьшения налоговой базы; отмены отдельных льгот.

Результатом реализации первого направления налоговых реформ является снижение налогового бремени для крупных и средних предприятий, а также увеличение для хозяйствующих субъектов с оборотом более 1 млрд сумов; уровень налоговой нагрузки для субъектов хозяйствования, имеющих оборот до 1 млрд сумов, практически не изменился.

Вторым исследуемым направлением налоговой реформы выступает унификация, объединение налогов со схожей налогооблагаемой базой и, как следствие, оптимизация их количества, сокращение и упрощение налоговой отчетности.

Сравнительный анализ особенностей налоговой отчетности до и после реформирования представлен в табл. 2. Анализируя полученные данные, можно констатировать следующее:

- 1 – проведена определенная работа по сокращению и унификации налогов (отменены инфраструктурный налог, отчисления в государственные фонды, налог на сверхприбыль; оптимизированы путем объединения с другими налогами налог на потребление нефтепродуктов, единый земельный налог; выведен из применения сбор за приобретение и (или) временный ввоз на территорию Республики Узбекистан автотранспортных средств);

- 2 – введены рентный налог (заменивший налог на недра) и утилизационный сбор (сбор за ввоз автотранспорта);

- 3 – число налогов и сборов в 2022 г. доведено до 16 против 19 в 2018 г. (по категориям налогоплательщиков): у среднего плательщика общеустановленных налогов количество уплачиваемых обязательных налогов (не учитывая плательщиков акцизов, налогов, связанных с недрами, водой, а также сборов) уменьшилось с восьми в

Количество налогов, сроков налоговой отчетности и уплаты налогов
Table 2. Number of taxes, tax reporting deadlines, tax payment deadlines

Налоги, отчетность, уплата в 2018 г.	Налоги, отчетность, уплата в 2022 г.	Примечание
Сохраненные налоги и сборы		
НДС (ставка 20 %) Сроки уплаты – ежемесячные Сроки отчетности – ежемесячные	НДС (ставка 15 %) Сроки уплаты – ежемесячные Сроки отчетности – ежемесячные	Внедрение полной системы зачета и возмещения НДС, расширение плательщиков НДС за счет МП и сельхозпредприятий
Акцизный налог Сроки уплаты – ежемесячные Сроки отчетности – ежемесячные	Акцизный налог Сроки уплаты – ежемесячные Сроки отчетности – ежемесячные	Сокращение плательщиков акцизного налога по импорту
Таможенные пошлины и сборы Сроки уплаты – до или вовремя представления декларации	Таможенные пошлины и сборы Сроки уплаты – до или вовремя представления декларации	Введены нулевые ставки по продовольственным товарам
Налог на прибыль (ставка 14 %) Сроки уплаты – ежемесячные, ежеквартальные Сроки отчетности – ежеквартальные	Налог на прибыль (ставка 15 %) Сроки уплаты – ежемесячные, ежеквартальные Сроки отчетности – ежеквартальные	Из общих поступлений 67% приходится на АО «НГМК» и АО «АГМК», расширение плательщиков за счет МП, инвестиционный вычет и нормы амортизации выросли в два раза
Единый налоговый платеж (ставка 5 %) Сроки уплаты – ежеквартальные Сроки отчетности – ежеквартальные	Налог с оборота (ставка 4 %) Сроки уплаты – ежемесячные Сроки отчетности – ежемесячные	ЕНП поменяли на налог с оборота. Введение ограничения оборота размером в 1 млрд сумов обусловило значительное сокращение поступлений в бюджет
НДФЛ (прогрессивная шкала от 0 до 22 %) Сроки уплаты – ежемесячные Сроки отчетности – ежемесячные	НДФЛ (единая ставка 12 %) Сроки уплаты – ежемесячные Сроки отчетности – ежемесячные	Выравнивание ставки повысило прозрачность доходов, облагаемых налогом и обеспечило стабильность поступления налогов в бюджет
Единый социальный платеж (ставка 25 %, для МП – 15 %) Сроки уплаты – ежемесячные Сроки отчетности – ежемесячные	Социальный налог (ставка 12 %) Сроки уплаты – ежемесячные Сроки отчетности – ежемесячные	Изменение названия и снижение ставки налога
Налог за пользование недрами Сроки уплаты – ежемесячные Сроки отчетности – ежеквартальные	Налог за пользование недрами Сроки уплаты – ежемесячные Сроки отчетности – ежемесячные	Изменение налогооблагаемой базы по цветным и драгоценным металлам. Снижение ставок налогообложения по драгоценным, редким и цветным металлам, природному газу и газовому конденсату
Бонусы	Бонусы	Выведены из Налогового кодекса в другой закон.
Налог на воду Сроки уплаты – ежемесячные, ежеквартальные Сроки отчетности – ежегодные	Налог на воду Сроки уплаты – ежемесячные, ежеквартальные Сроки отчетности – ежегодные	Ставки налога ежегодно индексируются
Налог на имущество (ставка 5 %) Сроки уплаты – ежемесячные,	Налог на имущество (ставка 1,5 %)	С 2022 г. налоговая база не может быть ниже установленной мини-

ежеквартальные Сроки отчетности – ежегодные	Сроки уплаты – ежемесячные, ежеквартальные Сроки отчетности – ежегодные	мальной стоимости
<i>Земельный налог</i> Сроки уплаты – ежемесячные, ежеквартальные Сроки отчетности – ежегодные	<i>Земельный налог</i> Сроки уплаты – ежемесячные, ежеквартальные Сроки отчетности – ежегодные	Ставки налога ежегодно индексируются
<i>Госпошлина</i>	<i>Госпошлина</i>	Выведена из Налогового кодекса в отдельный закон
<i>Сборы</i>	<i>Сборы</i>	Из сборов выведен сбор за приобретение и (или) временный ввоз на территорию Узбекистана транспортных средств
Объединенные налоги		
<i>Налог на потребление нефтепродуктов</i>	–	Налог объединен с акцизным налогом
<i>Единый земельный налог</i>	–	ЕЗН объединен с земельным налогом
Отмененные налоги		
<i>Налог на инфраструктуру</i>	–	Отменен
<i>Отчисления в госфонды</i>	–	Отменен
<i>Налог на сверхприбыль</i>	–	Отменен
Введенные налоги		
–	<i>Рентный налог</i> Сроки уплаты – ежеквартальные Сроки отчетности – ежеквартальные	Вводится по отдельным природным ресурсам с 2022 г. База близка к налогу на недра – стоимость объема извлекаемых запасов полезных ископаемых, за минусом расходов
–	<i>Утилизационный сбор</i> Сроки уплаты – ежемесячные Сроки отчетности – ежемесячные	Введен с 2021 г. для производителей и импортеров транспортных средств

2018 г. до шести в 2022 г.; у среднего плательщика налогов в упрощенном порядке (с 2019 г. с оборотом до 1 млрд. сумов) количество обязательных налогов увеличилось с трех в 2018 г. до пяти в 2022 г. (рис. 1);

4 – сокращения и упрощения налоговой отчетности не произошло, наблюдается обратная ситуация (по налогу с оборота сроков уплаты налога и сроки отчетности, по налогу на недра отчетность изменились с квартальных на месячные).

Третьим направлением налоговой реформы в ходе исследования является обеспечение устойчивости макроэкономической среды и стабильности формирования государственного бюджета.

Развитие любого цивилизованного государства требует стабильного финансового состояния экономики в целом и отдельных субъектов хозяйствования. Основой финансового состояния государ-

ства выступает его государственный бюджет, включающий доходную и расходную части, соотношение которых определяет потенциал развития государства. Вплоть до 2018 г. государственная политика была ориентирована на профицит государственного бюджета, в то время как с 2018 г. ориентиром государственной политики стало ускоренное экономическое развитие [16; 17]. Смена ориентиров государственной политики неминуемо повлекла сокращение доходной части бюджета и стремительный рост его расходов. При этом имело место увеличение расходной части бюджета уже в течение года после его утверждения (утвержденные на 2021 г. расходы государственных органов в размере 135,6 трлн сумов возрастали дважды и достигли 160,6 трлн сумов, что привело к образованию дефицита госбюджета, сохранившегося и в 2022 г.) (рис. 2).

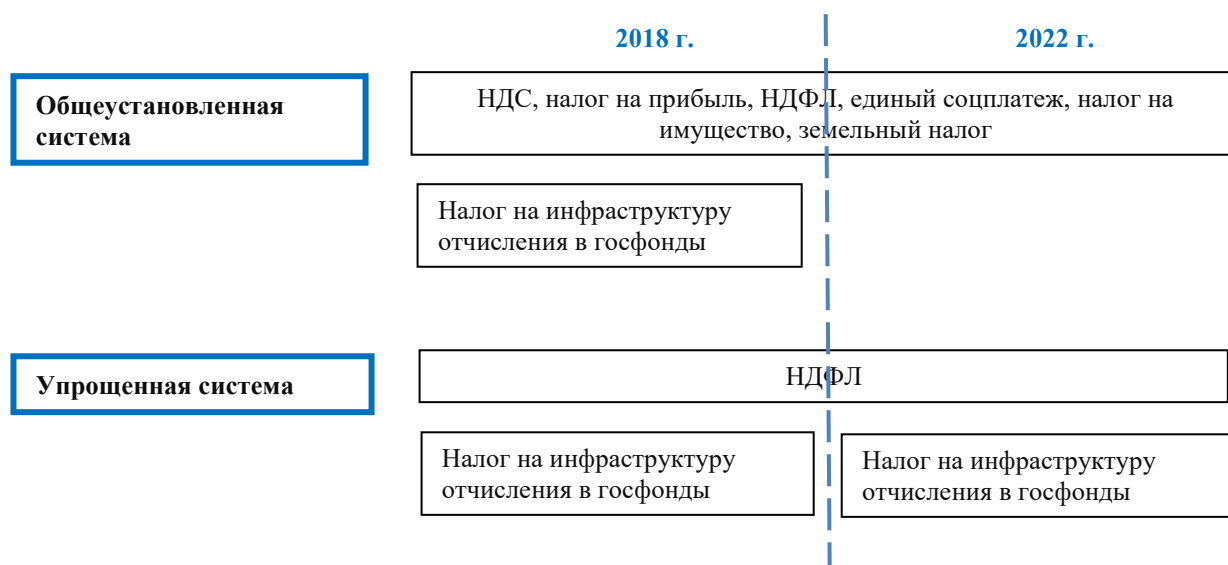


Рис. 1. Анализ налогов, уплачиваемых средним налогоплательщиком (не учитывая плательщиков акцизов, налогов, связанных с недрами, водой, а также сборов)

Fig. 1. Analysis of taxes paid by the average taxpayer (excluding payers of excise taxes, taxes related to mineral resources, water and fees)

Если для утвержденного прогноза на 2020 г. предельный размер дефицита Консолидированного бюджета не был задан, то прогноз на 2021 г. содержал установленный на уровне 6,5 % дефицит, на 2022 г. – на уровне 3 %. Наличие дефицита побуждает к поиску источников его покры-

тия. Можно выделить два способа покрытия дефицита на не инфляционной основе:

- ужесточение налогового администрирования;
- внешние заимствования под гарантию государства.

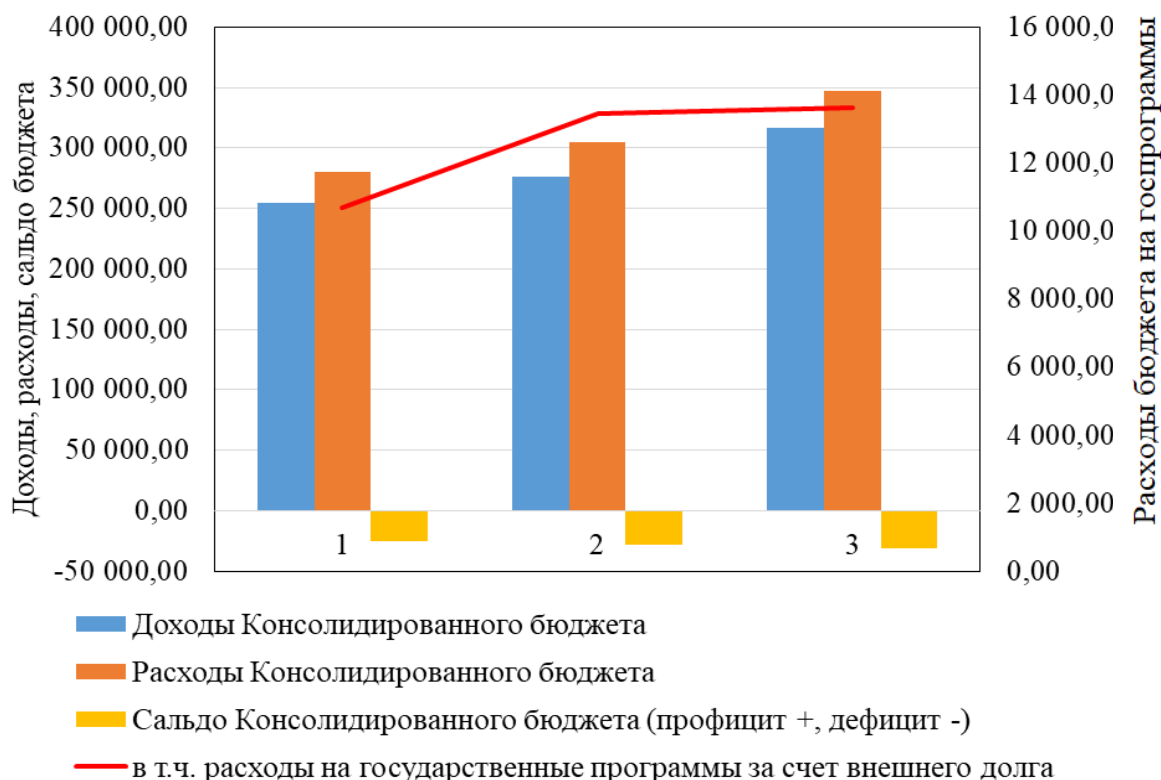


Рис. 2. Динамика параметров бюджета в 2022 – 2024 гг.

Fig. 2. Dynamics of budget parameters in 2022 – 2024

Т а б л и ц а 3

Дефицит бюджета и его покрытия
Table 3. The budget deficit and its coverage

Показатель	Значение		
	на 2020 г.	на 2021 г.	на 2022 г.
Темп роста ВВП, %	5,5	5,1	6,0
Индекс потребительских цен по отношению к декабрю прошлого года, %	12,5 – 13,0	9,0 – 10,0	9,0
Предельный размер дефицита Консолидируемого бюджета от ВВП, %	показатель отсутствует	6,5	3
Предельный объем внешних заимствований под гарантию Правительства, млрд долл.	5,5	5,5	4,5
в том числе на поддержку Государственного бюджета Республики Узбекистан, млрд долл.	2,5	2,2	2,5
Предельный размер госдолга под гарантию Правительства, % к ВВП	показатель отсутствует	60	60

Особенностью является рост с 2018 г. внешних заимствований под гарантию правительства, которые стабилизировались с 2021 г. Основное назначение этих заимствований состояло в покрытии государственного бюджета (табл. 3). Внешние заимствования привлекаются на условиях возвратности и платности, соответственно требуют наличия источников покрытия и вызывают дополнительные расходы бюджета на финансирование процентов.

Такая система получила название система отложенных налогов (снижение налогов вызывает расходы, которые покрываются за счет заимствований, последние, в свою очередь, финансируются за счет будущих налогов). Развитие экономики без опережения потребует покрытия заимствований в будущем за счет роста налогов или заимствований (а это уже «внешняя экономическая зависимость»).

Как известно, темпы роста экономики должны превышать темпы роста других макроэкономических показателей. Рост ВВП, доходов Консолидированного бюджета и курса сумма к доллару сопоставимы друг с другом на протяжении 2018 – 2021 гг. [18; 19]. Это вызывающий опасения фактор, так как свидетельствует о росте экономики не столько за счет наращивания производства, сколько за счет стоимостной (курсовой) составляющей. Значительную роль в 2020 – 2021 гг. сыграли ограничения по Covid. После пандемии проявился другой фактор – геополитическая ситуация в мире. Она характеризуется замедлением темпов развития мировой экономики и, в первую очередь, в постсоветском пространстве. Вместе с тем экономика Узбекистана в

значительной степени интегрирована в мировую экономику: более половины внешнеторгового оборота Республики приходится на страны СНГ, граждане Узбекистана получили из этих стран в 2021 г. денежных переводов на общую сумму 8,1 млрд долларов, в то время как экспорт узбекской продукции (кроме золота) обеспечил всего около 11 млрд долларов.

Налоговая система испытывает влияние значительно возросшего совокупного внешнего долга до 212,8 % (с 2018 по 2021 гг.), обеспечившего увеличение отношения государственного долга к ВВП до 38 %.

Тем не менее имеют место и некоторые позитивные факторы. Рост золотовалютных резервов, достигших уровня 35,1 млрд долларов, был обусловлен благоприятной конъюнктурой рынка, можно также отметить стабильность банковской системы в Республике Узбекистан и рост опережающими темпами заработной платы работников (табл. 4).

Совокупный внешний долг включает правительственный и гарантированный правительством (государственный внешний долг), а также негарантированный (частный) внешний долг. При этом необходимо обратить внимание, что к «частному сектору» отнесли компании и банки, имеющие долю государства в капитале. В 2021 г. произошло погашение государством основного долга в размере 919,9 млн долларов и процентов по ним на сумму 370,9 млн долларов. Коммерческие предприятия и организации выплатили кредиторам 4,5 и 523,3 млн долларов.

Следуя тенденциям большинства стран, Центральный банк Республики 17 марта 2022 г. уве-

Т а б л и ц а 4

Макроэкономических показателей
Table 4. Macroeconomic indicators

Показатель	Значение показателя по годам				Рост/снижение, 2021 к 2018 гг., %
	2018	2019	2020	2021	
ВВП по среднегодовому курсу, млрд долл.	52,2	62,2	59,4	69,1	132,4
Доходы консолидированного бюджета по среднегодовому курсу, млрд долл.	13,7	16,1	15,4	18,5	135
Официальный курс сума к доллару в среднем за год, сум	7787,8	8513,6	10 148,3	10625,5	136,4
Совокупный внешний долг, млрд долл.	17,2	24,6	34,2	39,6	212,8
в т. ч. государственный внешний долг, млрд долл.	10	15,9	21,4	23,9	239
Отношение государственного (внешнего и внутреннего) долга к ВВП, %	28,3	29,7	39	38	-
Сумма соглашений о внешнем заимствовании под госгарантию, в млрд долл.	3	8,9	5,5	5	-
Золотовалютные резервы, млрд долл.	27,9	28,8	34,2	35,1	125,8
Внешнеторговый оборот (всего), млрд долл.	33,8	42,2	35,4	42,1	124,5
в т.ч. экспорт, млрд долл.	14,3	17,9	14,9	16,6	116
в т.ч. импорт, млрд долл.	19,5	24,3	20,4	25,5	130,7
Отрицательное сальдо внешнеторгового оборота, млрд долл.	-5,3	-6,3	-6,0	-8,8	-
Ставка рефинансирования Центрального банка, %	14	16	15	14	-
Средняя банковская ставка по депозитам в сумах					
для физических лиц, %	18,5	17	17	20,2	-
для юридических лиц, %	15,2	14	14,4	15,1	-
Объем валютных переводов гражданами в Узбекистан, млрд долл.	5	6	6	8,1	162
Средняя заработная плата, сум	1 800 000	2 300 000	2 700 000	3 200 000	177,7
Минимальная установленная заработная плата, сум	202 730	634 880	679 330	822 000	405,5

личил ставку рефинансирования до 17 %, в результате наметилось замедление роста инвестиций. Причиной этого послужили зависимость от российского импорта капитала и банковского финансирования государственных и частных инвестиционных проектов: сокращение «свободной» денежной массы в российской экономике, более жесткие требования к заемщикам во избежание финансирования терроризма обусловили более серьезный отбор проектов для финансирования. Растущая цена на сырье на мировых рынках (в том числе золото, медь и природный газ), снижение объема денежных переводов на 6 % валового внутреннего продукта в совокупности послужили причиной увеличения дефицита счета текущих операций в 2022 г., который может рефинансироваться путем новых государственных заимствований или использованием резервов. В результате прогнозируется общий дефицит бюджета порядка 4 % и государственный долг на уровне 42 % [20].

В качестве четвертого исследуемого направления налоговой реформы рассмотрим совершенствование и обеспечение стабильности налогового законодательства, нормативно-правовой базы, усиление защиты прав и законных интересов добросовестных налогоплательщиков.

Упрощение налогового законодательства преимущественно было ориентировано на крупный и средний бизнес. В то же время малый бизнес столкнулся с усложнением налогового законодательства, особенно для компаний с оборотом более 1 млрд сумов. Если до 2019 г. компании платили три достаточно простых для исчисления налога, то с 2019 г. они стали платить более сложные налоги для исчисления и контроля за правильностью определения (НДС и налог на прибыль), что повлекло возникновение новых проблем [21 – 23].

Проделана работа по предотвращению противоречий и нестыковок в налоговых и сопряженных нормативно-правовых актах в той или иной мере, кроме того государственным налоговым комитетом достаточно эффективно проводится работа по поддержке добросовестных налогоплательщиков.

Стабильность налогового законодательства возможно обеспечить в результате осуществления следующих мер: за 30 лет независимости Республики Узбекистан это уже четвертое кардинальное изменение налогового законодательства. При этом начатая еще в 2018 г. налоговая реформа до сих пор не реализована в полной мере. Ежегодно вносятся те или иные изменения и дополнения, что приводит к сложностям у налогоплательщиков. Например, начиная с 2019 г., принята про-

межуточная система исчисления НДС. С вступлением в силу в 2020 г. Налогового кодекса рассматриваемая система была отменена. Изначально была внедрена система, ограничивающая зачет НДС по приобретенным основным фондам, однако через год данные ограничения были сняты. Такие введения ограничений и их скорые отмены имели место почти ежегодно с начала реформ. Идет развитие налоговой системы, однако частые изменения законодательства вызывают путаницу и сложности у налогоплательщиков; возникают просрочки платежей.

В качестве заключительного (пятого) исследуемого направления налоговой реформы рассмотрим совершенствование форм, механизмов и инструментария налогового контроля, в том числе путем повсеместного внедрения современных информационно-коммуникационных технологий.

По этой части налогового реформирования реализованы или еще находятся в стадии завершения масштабные мероприятия. В частности, за последние три года введены (и вводятся) информационно-коммуникационные технологии по налоговому контролю:

- электронные системы (анализ налогового риска с сегментацией налогоплательщиков в зависимости от уровня риска неисполнения или неполного исполнения ими налоговых обязательств; налоговая отчетность через личный кабинет налогоплательщика; регистрация налогоплательщиков и их счетов);
- специальная система регистрационного учета плательщиков НДС;
- электронные счета-фактуры с внедрением идентификационных кодов товаров и услуг (ИКПУ), а также система выдачи информации о коэффициентах налогового разрыва по НДС;
- система регистрации и сканирования специальных контрольных меток на основе QR-кодов;
- информационная система онлайн-кассовых аппаратов и онлайн-терминалов;
- электронный сервис E-Ijara (ijara.soliq.uz), предназначенный для учета договоров аренды недвижимости;
- информационная система E-Aktiv (E-ombor, виртуальный склад) для учета основных средств, нематериальных активов и товарно-материальных ресурсов, ведения анализа, онлайн-учета и отслеживания поступлений и остатка товаров.

Наряду с позитивной оценкой, проделанной в большом объеме работы по автоматизации налогового контроля, необходимо отметить следующее:

1. Часто вышеуказанные продукты вводятся не до конца отработанными и не прошедшими экспертную оценку. Например, перечень номенклатурных позиций товаров и услуг, зарегистрированных в ИКПУ, включает 88 000 наименований. При этом предприниматели обнаруживали достаточно распространенные и простые ошибки (одинаковая продукция имела разные коды, наименования содержали грамматические ошибки, те или иные товары отображались в несвойственных им категориях). Разработчики признали, что количество товаров может быть более 1 млн единиц, что обусловило появление ошибок в формировании кодов.

2. Не всегда эффект от внедрения систем был положительным и ощутимым. Например, внедрение в 2020 г. системы маркировки алкогольной и табачной продукции с целью ее легализации не сопровождалось последующим ростом объема и доходов от продажи этой продукции по итогам 2021 г.

3. Электронные продукты, которые внедрялись в 2020 – 2021 гг., были предварительно не апробированы налогоплательщиками, в результате у них возникали многочисленные вопросы и недовольства. Это побуждало разработчиков к изменению сроков внедрения систем, отмене или отсрочке штрафов, если налогоплательщики не исполняли требования этих систем – к доработке и тестированию среди налогоплательщиков. Стремление внедрить рассматриваемые системы в кратчайшие сроки снижает их эффективность в результате необходимости последующих корректировок и в целом негативно отражается на эффективности системы налогового администрирования.

Выводы

Несмотря на полученные позитивные результаты трансформации системы налогообложения, сохраняются определенные резервы улучшения ее функционирования методологического и практического характеров.

Имеют место проблемы возврата НДС налогоплательщикам. Определенная часть налогоплательщиков по-прежнему прибегает к услугам фирм-однодневок при осуществлении своей деятельности. Статистика Государственного налогового комитета Республики Узбекистан свидетельствует, что анализ ситуации по уплате НДС на основе использования программного продукта «Риск-анализ» позволил увеличить список предварительно выявленных 396 «сомнительных» компаний еще на 129 единиц. Обеспечение обоснованного возврата НДС требует разработки научно обоснованной методики, которая бы

включала четкие положения обо всех используемых процедурах.

Как показывает опыт ряда стран, комплексная трансформация налоговой политики немыслима без совершенствования налогового регулирования рационального природопользования. В то же время в действующей налоговой системе Узбекистана экологическим налогам пока не уделяется значительного внимания. В стране не проработан механизм и отсутствуют соответствующие финансовые инструменты, направленные на предотвращение загрязнения окружающей среды или компенсации ущерба природе. Следовательно, возникает еще один важный вопрос, который необходимо учитывать в перспективе для улучшения системы налогов – это усиление экологической направленности налогообложения.

Развития налоговой системы в перспективе видится по следующим направлениям: снижение налогового бремени предприятий, влияния уровня налогов на совокупные расходы и цены продукции (работ, услуг), повышение значимости перераспределительной функции налогового механизма, в части имущественных налогов, стимулирование инвестиционной активности компаний, увеличение суммы возврата (возмещения) налоговых средств для налогоплательщиков (с целью минимизации неофициальной деятельности).

Современная налоговая система призвана обеспечить в экономике такие условия, которые бы стимулировали рост конкурентоспособности производств и субъектов, способствовали опережающему росту доходов работников, занятых в реальном секторе экономики, ресурсосбережению на различных этапах производственного процесса, экологической устойчивости, здоровому образу жизнедеятельности населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муминова Э.А., Усманова З.М. Исследование влияния налоговых реформ на функционирование системы налогообложения Республики Узбекистан. Часть 1. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;2(48):159–167. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-159-167](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-159-167).
2. Сидорова Е.Ю., Джураев А.М. Совершенствование налоговой системы Узбекистана. *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2021;17(7(400)):1392–1408.
3. Шодиев О.А. Особенности применения упрощенной системы налогообложения в Узбекистане. *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2018;5-2:180–183.

4. Муратбаев Б.Б. Проблемы совершенствования бюджетно-налоговой системы Узбекистана. *Экономика и социум*. 2023;1-2(104): 385–390.
5. Холмуминов З.А. Налоговая политика Узбекистана: цели, структура и перспективы. *Бенефициар*. 2020;85:18–24.
6. Kurpayanidi K.I., Tolibov I.Sh., Yakubzhonova F. To the problem of need of reforming of tax systems in the Republic of Uzbekistan. *Economy and Business: Theory and Practice*. 2018;12-2:13–16.
7. Кузиева Н.Р. Пути совершенствования налогового механизма для субъектов малого бизнеса и предпринимательства в Республике Узбекистан. *Бенефициар*. 2019;46: 31–36.
8. Боротов Ш.Ж.У. Основные направления совершенствования налоговой системы Республики Узбекистан в условиях цифровой экономики. *Вестник науки и образования*. 2021;7-3(110):44–46.
9. Расулев А.Ф., Воронин С.А. Новая архитектура построения налоговой системы Республики Узбекистан. *Экономика и финансы (Узбекистан)*. 2020;3:51–84.
10. Расулев А., Воронин С., Мухитдинов З. Реформа налогообложения в Республике Узбекистан: используемые подходы и их соответствие положениям ведущих научных школ. *Общество и экономика*. 2020;7: 75–85.
11. Тулаков У.Т. Результаты налоговых реформ, осуществляемых в Узбекистане. *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2020;3-2(61):190–194.
12. Оганьян А.Г., Янченко Д.В. Оптимизация налогового регулирования как фактор устойчивого развития региональных социально-экономических систем. *Финансовая экономика*. 2022;12:52–54.
13. Юлдашов К.М. Особенности налоговой политики в республике Узбекистан. В кн.: *Многополярный мир в фокусе новой действительности. Материалы XIII Евразийского экономического форума молодежи*. Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет, 2023:137–143.
14. Гиясов С.А., Ваккосов С.А. Анализ результатов реформ, проведенных в сфере администрирования налога на добавленную стоимость. *Бенефициар*. 2020;82:3–5.
15. Воронин С.А., Корабоев Б.У., Убайдуллаева А.Х. Развитие промышленного комплекса Узбекистана в условиях кардинальной реформы налогообложения. В кн.: *Национальные экосистемы. Сборник научных трудов по итогам проведения I-III Международных научно-практических конференций*. Курган, 2023: 217–222.
16. Rasulev A., Voronin S. Reform of taxation in the republic of Uzbekistan: new risks and new opportunities. *Часопис економічних реформ*. 2020;2(38):60–70.
17. Niyazmetov I.M., Rakhmonov A.S., Otabekov O. Economic growth and optimal tax burden: a case of Uzbekistan's economy. *Journal of Tax Reform*. 2023;9(1):47–63.
18. Abdieva R., Baigonushova D. Globalization and tax competition in central Asian countries. *Reforma*. 2022;1(93):45–52.
19. Сержанов А.М. Приоритетные направления совершенствования налоговой системы региона. В кн.: *Фотинские чтения – 2023 (весеннее собрание). Сборник материалов юбилейной, X Международной научно-практической конференции*. Ижевск, 2023: 310–314.
20. Конфликт на Украине замедлит экономический рост в Узбекистане до 3,6 процента вместо ожидаемых 6 процентов – Всемирный банк. URL: <https://podrobno.uz/cat/economic/konflikt-na-ukraine-zamedlit-ekonomicheskij-rost-v-uzbekistane-do-3-6-protsesta-vmesto-ozhidaemykh-6> (дата обращения 06.09.2024).
21. Niyazmetov I.M. Estimating value added tax gap in Uzbekistan. *Finance: Theory and Practice*. 2023;27(2):131–139. <http://dx.doi.org/10.26794/2587-5671-2023-27-2-131-139>.
22. The Central Bank of Uzbekistan (CBU). Monetary policy review. IV quarter, 2021. *Central Bank of the Republic of Uzbekistan*. Tashkent; 2022. Available at: https://cbu.uz/upload/iblock/968/Monetary-Policy-Review-for-Q4_-2021_.pdf. (дата обращения 06.09.2024).
23. Awasthi R., Engelschalk M. Taxation and the shadow economy: How the tax system can stimulate and enforce the formalization of business activities. *World Bank Policy Research Working Paper*. 2018;(8391). URL: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/29603/WPS8391.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (дата обращения 06.09.2024).

REFERENCES

1. Muminova E.A., Usmanova Z.M. Investigation of the influence of tax reforms on the functioning of the taxation system of the Republic of Uzbekistan. Part 2. *Bulletin of the Siberian*

- State Industrial University*. 2024;2(48): 159–167. (In Russ.).
[http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-159-167](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-159-167)
2. Sidorova E.Yu., Juraev A.M. Improvement of the tax system of Uzbekistan. *Nacional'nye interesy: priority i bezopasnost'*. 2021;17(7(400)):1392–1408. (In Russ.)
 3. Shodiev O.A. Features of the simplified taxation system in Uzbekistan. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika*. 2018;5-2:180–183. (In Russ.)
 4. Muratbayev B.B. Problems of improving the budget and tax system of Uzbekistan. *Ekonomika i socium*. 2023;1-2(104):385–390. (In Russ.)
 5. Kholmuminov Z.A. Tax policy of Uzbekistan: goals, structure and prospects. *Beneficiar*. 2020;85:18–24. (In Russ.)
 6. Kurpayanidi K.I., Tolibov I.Sh., Yakubzhonova F. To the problem of need of reforming of tax systems in the Republic of Uzbekistan. *Economy and Business: Theory and Practice*. 2018;12-2:13–16. (In Russ.)
 7. Kuzieva N.R. Ways to improve the tax mechanism for small businesses and entrepreneurship in the Republic of Uzbekistan. *Beneficiar*. 2019;46:31–36. (In Russ.)
 8. Borotov Sh.Zh.U. The main directions of improving the tax system of the Republic of Uzbekistan in the digital economy. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2021;7-3(110):44–46. (In Russ.)
 9. asulev A.F., Voronin S.A. New architecture of the tax system of the Republic of Uzbekistan. *Ekonomika i finansy (Uzbekistan)*. 2020;3:51–84. (In Russ.)
 10. Rasulev A., Voronin S., Mukhitdinov Z. Tax reform in the Republic of Uzbekistan: the approaches used and their compliance with the provisions of leading scientific schools. *Ekonomika i finansy (Uzbekistan)*. 2020;7: 75–85. (In Russ.)
 11. Tulakov U.T. The results of tax reforms implemented in Uzbekistan. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika*. 2020;3-2(61):190–194. (In Russ.)
 12. Ohanyan A.G., Yanchenko D.V. Optimization of tax regulation as a factor of sustainable development of regional socio-economic systems. *Finansovaya ekonomika*. 2022;12:52–54. (In Russ.)
 13. Yuldashov K.M. Features of tax policy in the Republic of Uzbekistan. In: *Mnogopolyarnyj mir v fokuse novoj dejstvitel'nosti. Materialy XIII Evrazijskogo ekonomicheskogo foruma molodezhi. Ural'skij gosudarstvennyj ekonomicheskij universitet*. Ekaterinburg, 2023:137–143. (In Russ.)
 14. Giyasov S.A., Vakkosov S.A. Analysis of the results of reforms carried out in the field of value added tax administration. *Beneficiary*. 2020; 82:3–5. (In Russ.)
 15. Voronin S.A., Koraboev B.U., Ubaidullayeva A.H. The development of the industrial complex of Uzbekistan in the context of cardinal tax reform. In: *National ecosystems. collection of scientific papers on the results of the I-III International scientific and practical conferences*. Kurgan, 2023: 217–222. (In Russ.)
 16. Rasulev A., Voronin S. Reform of taxation in the republic of Uzbekistan: new risks and new opportunities. *Часопис економічних реформ*. 2020;2(38):60–70.
 17. Niyazmetov I.M., Rakhmonov A.S., Otabekov O. Economic growth and optimal tax burden: a case of Uzbekistan's economy. *Journal of Tax Reform*. 2023;9(1):47–63.
 18. Abdieva R., Baigonushova D. Globalization and tax competition in central Asian countries. *Reforma*. 2022;1(93):45–52.
 19. Serzhanov A.M. Priority directions for improving the tax system of the region. In: *Fotinsky readings – 2023 (spring meeting). Collection of materials of the jubilee, X International scientific and practical conference*. Izhevsk. 2023:310–314. (In Russ.)
 20. *Conflict in Ukraine will slow down economic growth in Uzbekistan to 3.6 percent instead of the expected 6 percent – World Bank*. Available at: <https://podrobno.uz/cat/economic/konflikt-na-ukraine-zamedlit-ekonomicheskij-rost-v-uzbekistane-do-3-6-protseta-vmesto-ozhidaemykh-6> (Accessed: 06.09.2024). (In Russ.)
 21. Niyazmetov I.M. Estimating value added tax gap in Uzbekistan. *Finance: Theory and Practice*. 2023;27(2):131–139.
<http://dx.doi.org/10.26794/2587-5671-2023-27-2-131-139>.
 22. The Central Bank of Uzbekistan (CBU). Monetary policy review. IV quarter, 2021. *Central Bank of the Republic of Uzbekistan. Tashkent*; 2022. Available at: https://cbu.uz/upload/iblock/968/Monetary-Policy-Review-for-Q4_-2021_.pdf. (Accessed: 06.09.2024).
 23. Awasthi R., Engelschalk M. Taxation and the shadow economy: How the tax system can stimulate and enforce the formalization of business activities. *World Bank Policy Research Working Paper*. 2018;(8391). URL: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/29603/WPS8391.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (Accessed: 06.09.2024).

Сведения об авторах:

Муминова Элнорахон Абдукаримовна, Dsc, профессор, заведующий кафедрой «Экономика» Ферганского политехнического института, Узбекистан, г. Фергана

E-mail: e.muminova@ferpi.uz

ORCID: 0000-0002-1226-7568

Усманова Зулфия Мусаевна, старший преподаватель кафедры «Экономика» Ферганского политехнического института, Узбекистан, г. Фергана

E-mail: z.usmanova@ferpi.uz

ORCID: 0000-0002-6018-8266

Information about the authors:

Elnorakhon A. Muminova, Dsc., Professor, Head of the Department of Economics of the Fergana Polytechnic Institute, Uzbekistan, Fergana

E-mail: e.muminova@ferpi.uz

ORCID: 0000-0002-1226-7568

Zulfiya M. Usmanova, Senior lecturer of the Department of Economics of the Fergana Polytechnic Institute, Uzbekistan, Fergana

E-mail: z.usmanova@ferpi.uz

ORCID: 0000-0002-6018-8266

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 24.05.2024

После доработки 30.05.2024

Принята к публикации 03.06.2024

Received 24.05.2024

Revised 30.05.2024

Accepted 03.06.2024

Оригинальная статья

УДК 316.43

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-121-129

**РЕАЛИЗАЦИЯ ПОЛИТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В ОБЛАСТИ
ФОРМИРОВАНИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ
(НА ПРИМЕРЕ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛ.)**

© 2024 г. М. А. Мирюкова¹, И. А. Кан²

¹Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (Западный филиал) (Россия, 236038, Калининград, ул. Артиллерийская, д. 62)

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

Аннотация. Социально-экономическая стабильность государства в целом, и отдельных регионов в частности, является приоритетным направлением обеспечения безопасности страны. Определено, что устойчивость экономики характеризует прочность и надежность ее элементов, вертикальных, горизонтальных и других связей внутри системы, способность выдерживать внутренние и внешние «нагрузки». Социальная стабильность в России означает устойчивое развитие общества, обеспечивающее равные возможности для всех граждан, социальную защиту и поддержку уязвимых слоев населения, а также гармоничное взаимодействие между различными социальными группами. Выделены основные факторы, характеризующие социально-экономическую стабильность, и способы ее обеспечения. Проведен анализ текущей социально-экономической ситуации в Калининградской обл., определены основные проблемы и выявлен потенциал для дальнейшего развития региона. Проанализированы статистические показатели Калининградской обл. социально-экономической ситуации в регионе, представленные в виде объема инвестиций в основной капитал по г. Калининград, развития транспортной инфраструктуры, человеческого капитала, туристического потенциала региона, а также результаты реализации социальной подпрограммы «Создание условий для легкого старта и комфортного ведения бизнеса», направленной на увеличение численности занятых в сфере малого и среднего предпринимательства в Калининградской обл. Отражены основные приоритетные направления развития социально-экономической политики региона: развитие научно-инновационной сферы, обеспечение устойчивого экономического роста, повышение качества и уровня жизни, развитие человеческого капитала и социальной сферы. Отмечена важность использования комплексного подхода, с помощью которого будет достигнуто стабильное социально-экономическое развитие региона, выражающееся в высоком уровне жизни, положительных демографических показателях, экономической устойчивости.

Ключевые слова: качество жизнедеятельности, национальная безопасность, социальная безопасность, социальная справедливость, социальная стабильность, социальное развитие, устойчивое развитие, экономическая стабильность, экономическая устойчивость

Для цитирования: Мирюкова М.А., Кан И.А. Реализация политики Российской Федерации в области формирования социально-экономической стабильности (на примере Калининградской обл.). *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):121–129. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-121-129](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-121-129)

Original article

IMPLEMENTATION OF THE POLICY OF THE RUSSIAN FEDERATION IN THE FIELD OF FORMATION OF SOCIO-ECONOMIC STABILITY (ON THE EXAMPLE OF THE KALININGRAD REGION)

© 2024 M. A. Miryukova¹, I. A. Kan²

¹**Russian Academy of National Economy and Public Service under the President of the Russian Federation (Western branch)** (62 Artillery Str., Kaliningrad, Kaliningrad region 26038, Russian Federation)

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

Abstract. Socio-economic stability of the state as a whole, and of individual regions in particular, is a priority for ensuring the security of the country. It is determined that stability of the economy characterizes the strength and reliability of its elements, vertical, horizontal and other connections within the system, the ability to withstand internal and external "stresses". Social stability in Russia means sustainable development of society, ensuring equal opportunities for all citizens, social protection and support for vulnerable segments of the population, as well as harmonious interaction between various social groups, the main factors characterizing socio-economic stability and ways to ensure it are highlighted. The analysis of the current socio-economic situation in the Kaliningrad Region has been carried out, the main problems have been identified and the potential for further development of the region has been identified. The statistical indicators of the Kaliningrad region on the socio-economic situation in the region, presented in the form of the volume of investments in fixed capital in the city of Kaliningrad, on the development of transport infrastructure, human capital, tourism potential of the region, as well as the results of the implementation of the social subprogram "Creating conditions for an easy start and comfortable running of business", aimed at increasing the number of people employed in the sphere of small and medium entrepreneurship in the Kaliningrad region, are analyzed. The main priority directions of the development of socio-economic policy of the region are reflected: development of the scientific and innovative sphere, ensuring sustainable economic growth, improving the quality and standard of living, development of human capital and the social sphere. The importance of using an integrated approach was noted, with the help of which stable socio-economic development of the region will be achieved, expressed in a high standard of living, positive demographic indicators, and economic sustainability.

Keywords: quality of life, national security, social security, social justice, social stability, social development, sustainable development, economic stability, economic stability

For citations: Miryukova M.A., Kan I.A. Implementation of the Policy of the Russian Federation in the Field of Socio-Economic Stability (on the Example of the Kaliningrad Region). *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):121–129. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-121-129](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-121-129)

Введение

Современное положение России в геополитическом пространстве определяет основные приоритетные направления развития страны. Существующее внешнеэкономическое санкционное давление требует незамедлительной ответной реакции в виде стабилизации внутренних экономических и социальных систем в рамках обеспечения безопасности государства.

Стабильность и устойчивость национальной экономики предполагает защиту собственности во всех ее формах, создание надежных условий и гарантий для предпринимательской активности, сдерживание факторов, способных дестабилизировать ситуацию (борьба с криминальными

структурами в экономике, недопущение серьезных разрывов в распределении доходов, грозящих вызвать социальные потрясения и другие) [1]. Устойчивость экономики характеризует прочность и надежность ее элементов, вертикальных, горизонтальных и других связей внутри системы, способность выдерживать внутренние и внешние «нагрузки» [2].

В странах Европейского Союза накоплен определенный опыт по стабилизации экономической системы, объединяющий административные (ужесточение нормативов социальной и экологической устойчивости, а также контроля их выполнения) и экономические меры государства (налоговые льготы, государственные инвести-

ции в развитие инфраструктуры и другие), создающие надлежащие правовые и информационные условия для активизации деятельности общественных организаций экологической и социальной направленности [3 – 11].

Социальная стабильность в России означает устойчивое развитие общества, обеспечивающее равные возможности для всех граждан, социальную защиту и поддержку уязвимых слоев населения, а также гармоничное взаимодействие между различными социальными группами.

Социальная и экономическая стабильности тесно взаимосвязаны [12]. Социальная стабильность обеспечивает социальную защиту населения, гарантирует минимальный уровень жизни и способствует развитию человеческих ресурсов. Это, в свою очередь, создает условия для экономического роста и развития экономики [13]. Экономическая стабильность позволяет государству проводить эффективную социальную политику, обеспечивать доступность образования, здравоохранения и других социальных услуг. Это повышает качество жизни населения и укрепляет социальную стабильность.

Социально-экономическая стабильность – это состояние общества, при котором достигается устойчивое развитие экономики, обеспечивается социальная справедливость и равенство возможностей для всех граждан. Она является основой для устойчивого роста и развития страны, способствует повышению уровня жизни населения и созданию благоприятных условий для предпринимательства и инвестиций.

Социально-экономическая стабильность может характеризоваться следующими факторами:

- устойчивость к внешним шокам и способность развиваться вне зависимости от внешних обстоятельств (например, в 2020 г. Россия меньше других стран «упала» и быстрее восстановилась);
- низкий уровень госдолга (определяющую роль здесь играет устойчивый торговый баланс, торговый экспорт превышает импорт);
- сдерживание инфляции (превалирование экспорта над импортом позволило рублю укрепиться, это внесло свой вклад в сдерживание инфляции);
- рост промышленного производства (например, в машиностроении, металлообработке и пищевой промышленности);
- стабильный валовой внутренний продукт (ВВП) на душу населения (по состоянию на конец 2022 г. по данным Всемирного банка этот показатель оставался относительно стабильным) [14].

Социально-экономическая стабильность в России обеспечивается путем принятия различных мер:

- адресная поддержка различных категорий граждан, оказавшихся в трудной жизненной ситуации, при необходимости осуществляют единовременные денежные выплаты;
- сохранение доступности социальных услуг для граждан;
- бесперебойное функционирование объектов жизнеобеспечения, транспортной, логистической, социальной инфраструктуры, объектов образования, здравоохранения, социального обслуживания, энергетики, промышленности и связи;
- мониторинг розничных цен на товары первой необходимости, лекарственные препараты, медицинские изделия и наличия их в организациях торговли;
- устранение повышенного спроса на отдельные виды товаров, работ, услуг;
- мониторинг ситуации на рынке труда и реализация мер проактивной поддержки занятости населения (включая организацию переобучения и повышения квалификации);
- оказание мер поддержки организациям, индивидуальным предпринимателям, самозанятым гражданам, в том числе в виде предоставления денежных средств, другого имущества, иных льгот и преференций;
- поддержка социально ориентированных некоммерческих организаций, осуществляющих деятельность по социальному обслуживанию, поддержке и защите граждан, оказанию помощи беженцам и вынужденным переселенцам.

Полный перечень мер по обеспечению социально-экономической стабильности в России можно найти в Указе Президента РФ от 16.03.2022 № 121.

Эмпирической основой анализа текущей социально-экономической ситуации в Калининградской обл. выступили статистические данные о результатах реализации социальных программ региона, направленных на стабилизацию его социально-экономического положения.

Основные результаты

Основой для противостояния внутренним и внешним угрозам в области социально-экономической безопасности страны является совместное использование экономических и правовых институтов как системы государственных и негосударственных субъектов безопасности. Задачу обеспечения социально-экономической безопасности взяло на себя государство, поскольку именно ему принадлежит право, а, следовательно, и обязанность, создавать соответствующие органы и структуры [15].

Социально-экономическая стабильность является неотъемлемым фактором в формировании национальной безопасности, особенно на

региональном уровне. Калининградская обл., находящаяся в западной части России, является ярким примером региона, попавшего в сложную геополитическую ситуацию, оказывается особенно зависимой от макроэкономической обстановки и внешних факторов. Поддержание устойчивого социально-экономического развития является не только основой для процветания региона, но и ключевым элементом национальной безопасности. Перспективы развития в Калининградской обл. связаны с укреплением экономической базы и улучшением жизненного уровня населения. Область является экономически развивающимся регионом с уникальным географическим положением: она является единственным российским выходом к Балтийскому морю. Это создает как преимущества, так и сложности для развития экономики, обеспечения безопасности региона.

Анализ текущей социально-экономической ситуации в Калининградской обл. позволил определить основные проблемы, с которыми сталкиваются жители региона, и выявить потенциал для дальнейшего развития.

Одной из основных проблем Калининградской обл. является отсутствие сухопутных путей сообщения с остальной частью России. Это создает дополнительные сложности для развития экономики и привлечения инвестиций. Однако, регион обладает другими преимуществами (уникальное географическое положение и близость к странам Европы). Эти факторы предоставляют региону возможности для развития международного сотрудничества и привлечения иностранных инвестиций [16].

В 2022 г. Европейской комиссией было принято решение о приостановлении сотрудничества с Россией в рамках программ приграничного сотрудничества [17]. Правительством Калининградской обл. были направлены обращения в МИД России с предложением рассмотреть перспективы создания и реализации своих российских программ международного сотрудничества. Особое внимание было уделено внедрению программного подхода в систему взаимодействия с регионами Республики Беларусь. Разработана концепция Программы трансграничного сотрудничества между регионами Российской Федерации и Республики Беларусь. Эта инициатива послужила импульсом к увеличенному количеству совместных мероприятий и встреч с белорусской стороной. В отчетном году в целях осуществления международного сотрудничества было проведено восемь крупных мероприятий, в том числе с регионами Белоруссии, Казахстана и Узбекистана. Обсуждались вопросы перспектив и возможности сотрудничества в сфере сельско-

го хозяйства, промышленности, строительства, гуманитарного направления, а также вопросы трудовой миграции.

Одной из важнейших задач для формирования социально-экономической стабильности в Калининградской обл. является создание благоприятной инвестиционной среды. Это возможно через улучшение условий для предпринимательства, упрощение процедур регистрации и получения разрешений, снижение бюрократической нагрузки на предпринимателей. Калининградская обл. должна быть привлекательной для инвесторов как на российском, так и на международном уровнях.

За 2023 г. инвестиции в основной капитал по г. Калининград составили 72,2 % всех инвестиций, осуществленных за рассматриваемый период в Калининградской обл.

Объем инвестиций в основной капитал, осуществленных организациями, не относящимся к субъектам малого предпринимательства, за 2023 г. составил 118 308,16 млн рублей, что в 1,7 раза больше, чем за 2022 г. (71 378,44 млн рублей).

Сложившаяся ситуация обусловлена как эффектом «низкой базы» кризисного 2022 г., когда экономика только начала адаптироваться к санкционным барьерам, так и продолжающимся строительством на территории городского округа объектов для федеральных государственных нужд (строительство Кольцевого маршрута в районе Приморской рекреационной зоны с реконструкцией Северного обхода Калининграда, строительство интеллектуального пространства будущего «Кампус Канта» ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени И. Канта», строительство второй и третьей очереди Главного корпуса музея «Мирового океана»), так и перезапуском производств, остановленных в 2022 г. (в первую очередь в автопроме) и реализацией инвестиционных проектов в отрасли транспортировки и хранения.

Наибольший вклад в общем объеме инвестиций в основной капитал крупных и средних организаций в 2023 г. составили инвестиции в транспортировку и хранение (22,4 %). На втором месте по объему инвестиций в основной капитал были инвестиции в обрабатывающие производства (16,0 %), на третьем месте – инвестиции в деятельность по обеспечению электрической энергией, газом и паром, кондиционированием воздуха (6,6 %).

По итогам 2023 г. в структуре инвестиций крупных и средних организаций по источникам финансирования собственные средства занимают 50,1 %, привлеченные средства – 49,9 % от общего объема инвестиций в основной капитал

(более половины которых являются средства бюджетов всех уровней).

Еще одной важной задачей является развитие транспортной инфраструктуры. Модернизация и улучшение дорожной сети, ремонт и строительство новых аэропортов, развитие железнодорожной инфраструктуры – все это способствует улучшению транспортного сообщения региона с остальным миром и созданию благоприятных условий для ведения бизнеса. Среди наиболее важных приоритетных проектов является строительство порта в г. Пионерский, реконструкция Калининградского канала для обеспечения гарантийных уровней прохода больших судовых кораблей. В Калининградской обл. портовое хозяйство и морской транспорт являются одним из приоритетов стратегии социально-экономического развития региона. По объему перерабатываемых грузов портом Калининграда можно сделать сравнение количества грузоперерабатываемых портами иностранных Прибалтийских государств [19]. На 20-ти километрах причальных линий порта функционируют 15 стивидорных компаний по перевалке различных грузов, проектные возможности которых позволяют перегружать до 33 млн т в год. Производственный потенциал позволяет порту обрабатывать ежегодно более 1000 российских и иностранных судов и более 25 000 железнодорожных вагонов. Грузопассажирский транспорт связывает порт Калининграда контейнерными линиями с портами Санкт-Петербурга, Голландии, Англии, Германии, Бельгии, Финляндии, Дании и стран Балтии, грузопассажирскими паромными линиями с Санкт-Петербургом, железнодорожно-паромной линией с Усть-Лугой (Ленинградская обл.). В Калининграде открыты офисы контейнерных операторов Maersk, MSC, CMA CGM, Unifeeder паромного оператора DFDS LISCO. В порт заходят круизные суда с туристами (до десяти судозаходов в год). На начало 2022 г. между Усть-Лугой и Балтийском (Калининградская обл.) ходили два парома, ужесточение санкционного давления неизбежно потребовали усиления перевозок и развития контейнерных линий. В результате в 2023 г. грузоперевозки между портами Калининградской обл., Санкт-Петербурга и Ленинградской обл. обеспечивали 19 судов (четыре из которых железнодорожные паромы), 14 сухогрузов и один нефтеналивной танкер.

Для обеспечить комфортное проживание необходимо развивать внутреннюю связь региона. Это напрямую зависит от качества дорог и инфраструктуры города. Работы на строительных участках 14 областных дорог общей протяженностью 220 км завершились в 2023 г. в Калининградской обл. (национальный проект

«Безопасные качественные дороги»). Одним из крупнейших объектов прошлого года стал Северный обход. На этой важной для Калининграда магистрали было открыто техническое движение по новой транспортной развязке на Советском проспекте. Также специалисты улучшили 15 мостовых сооружений, отремонтировали 10 автобусных остановок, обустроили освещение на областных дорогах, проходящих через 19 поселков, а также на трассе, ведущей к паромному терминалу в Балтийске. На объектах установлены знаки и сигнальные столбики. Строительство Северного обхода продолжится.

Особое внимание следует уделять развитию человеческого капитала. Образование и наука, развитие медицинской и социальной сферы – все это является неотъемлемыми составляющими социально-экономического развития региона. Калининградская обл. должна предлагать качественное образование и медицинскую помощь, чтобы привлекать и удерживать высококвалифицированных специалистов и обеспечивать благополучие населения.

В 2022 г. объем выполненных работ и оказанных услуг (без НДС, акцизов и других аналогичных платежей) организациями, не относящимися к субъектам малого предпринимательства, в области научных исследований и разработок составил 5051,2 млн рублей. В 2022 г. по сравнению с 2021 г. численность работников в организациях, выполняющих научные исследования и разработки, увеличилась на 5,7 % и составила 1445 человек. Численность обучающихся аспирантов в 2022 г. составила 518 человек (102,0 % к уровню 2021 г.). В 2022 г. выпущено 72 аспиранта, внутренние затраты на исследования и разработки составили 2228,2 млн рублей (по сравнению с 2021 г. возросли на 12,0 %). Основу (93,2 %) в общем объеме внутренних затрат занимают текущие затраты, 60,2 % которых приходились на оплату труда. В январе – сентябре 2023 г. затраты на научные исследования и разработки составили 1335,8 млн рублей, из них внутренние затраты – 1209,7 млн рублей.

Еще одной важной задачей является развитие туристического потенциала региона. Богатое культурное наследие Калининградской обл., ее природные красоты и уникальное географическое положение позволяют развивать туризм. Привлечение туристов способствует увеличению доходов региона, созданию новых рабочих мест и повышению уровня жизни населения [19].

В 2023 г. Калининградская обл. приняла более 2 млн туристов. Большинство из них прилетали в регион самолетом (через аэропорт Храброво). Воздушный узел впервые обслужил более

4 млн пассажиров, улучшив показатель 2022 г. на 15,4 %. Поездами дальнего следования за январь – ноябрь из российских регионов в Калининград и обратно перевезли 293 000 человек – на 11,7 % больше, чем в 2022 г.

Средняя загрузка отелей в регионе по итогам 2023 г. составила около 70 – 71 %. Наибольший спрос на места в них фиксировался летом: уровень бронирования в некоторых отелях на побережье Балтики достигал 98 – 99 %, а в Калининграде – 90 %

По итогам реализации региональной госпрограммы «Туризм» в 2023 г. субсидии предоставляли на реализацию 17 проектов в 11 муниципальных образованиях. Были реализованы такие проекты как парковка у замка Инстербург и у маяка в Заливино, обустройство пляжной зоны в Советске, благоустройство прилегающей территории к бассейну с минеральной водой в г. Славск и другие.

В 2023 г. реализовывалась программа по выдаче социального сертификата на бесплатные путешествия по региону для школьников 5 – 9 классов. В этом году с мая по ноябрь смогли отправиться в бесплатную турпоездку 4 200 ребят. В реализации программы приняли участие 12 туроператоров. Всего было предложено 36 различных маршрутов. Как и в прошлом году, часть из них имела профориентационный характер, часть была посвящена истории Калининградской обл.

По президентскому национальному проекту «Туризм» регион получил средства на модульные некапитальные средства размещения. Объем предоставляемой субсидии в 2023 и 2024 гг. составил в общей сложности 334,4 млн рублей. По итогам реализации указанной меры поддержки Минэкономразвития поддержало 13 региональных проектов с общим номерным фондом в 230 номеров. В следующем году Калининградская обл. на развитие туристической инфраструктуры получит из средств федерального бюджета 118 млн рублей, с учетом софинансирования из областного бюджета общий объем возможной поддержки составит 121,5 млн рублей. В 2024 г. ООО «ПроГород» по заказу Минэкономразвития России планирует приступить к разработке туристической схемы макротерритории «Русская Балтика». Результатом работы должен стать перечень конкретных инфраструктурных решений.

Важным аспектом формирования социально-экономической стабильности является повышение уровня жизни и социальной защищенности населения. Для этого необходимо развивать систему социального обеспечения, гарантировать доступность и качество образования и здравоохранения, а также создавать условия для развития

культуры и спорта. Важно также уделять внимание снижению неравенства в доходах и возможностях для разных социальных групп, а также развитие инфраструктуры. Необходимо создание комфортной городской среды с развитыми транспортными системами и сферой услуг, а также доступным ЖКХ. Одной из основных проблем является высокий уровень безработицы, особенно среди молодежи. Необходимо направить усилия на создание новых рабочих мест и поддержку предпринимательства.

На конец декабря 2023 г. в государственных центрах занятости населения состояло на учете 3849 незанятых трудовой деятельностью граждан, из них 2625 человек имели статус безработного. Уровень регистрируемой безработицы составил 0,5 % от рабочей силы (экономически активного населения) [20].

В целях увеличения численности занятых в сфере малого и среднего предпринимательства в Калининградской обл. реализуется социальная подпрограмма «Создание условий для легкого старта и комфортного ведения бизнеса». В 2022 г. количество уникальных граждан, желающих вести бизнес, начинающих и действующих предпринимателей, получивших услуги, составило 3,8 тыс. единиц, что в 2,2 раза выше запланированного значения, 3000 гражданам, желающим вести бизнес, начинающим и действующим предпринимателям предоставлен комплекс консультационных и образовательных услуг в офлайн и онлайн форматах, 88 представителей молодежного и социального предпринимательства получили комплекс услуг, гранты [21].

Выводы

Калининградская обл. является экономически и стратегически значимым регионом, особенно в контексте его границы с Европейским союзом. Этот регион находится под постоянным влиянием геополитических и экономических факторов, которые могут существенно повлиять на его стабильность и безопасность. Сильная экономика, высокий уровень занятости, социальное благополучие и развитая инфраструктура являются основными факторами, способствующими обеспечению социально-экономической стабильности в регионе.

Управление социально-экономической стабильностью в Калининградской обл. требует комплексного подхода. Одной из ключевых задач является реализация стратегических программ по развитию экономики, инфраструктуры и социальной сферы региона. Также необходимо учитывать особенности транспортной логистики и таможенного контроля.

В Калининградской обл. в рамках комплексного и системного подходов были приняты ме-

ры и разработаны инструменты, направленные на обеспечение социально-экономической стабильности. Одной из ключевых мер является развитие инфраструктуры, особенно важной для транспортного сообщения с материковой частью России. В области активно поддерживается развитие малого и среднего бизнеса, создание новых рабочих мест и повышение уровня жизни населения, создание благоприятной инвестиционной среды, осуществление реформ в образовании и здравоохранении, а также развитие туристического потенциала. Государственные программы и инвестиционные проекты способствуют устойчивому развитию региона. Реализация этих мер позволяет обеспечить социально-экономическую стабильность в Калининградской обл., что является основой для формирования национальной безопасности.

Однако формирование социально-экономической стабильности невозможно без граждан и их активного участия в жизни региона. Необходимо усилить механизмы гражданского участия и развить партнерство между государственными органами, бизнесом и общественными организациями. Важно развивать местное самоуправление и повышать осведомленность и образованность населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербина В.О., Карапетян И.Р. Теоретические аспекты экономической безопасности социально-экономических систем. В кн.: *Актуальные проблемы экономики в условиях реформирования современного общества. Материалы IV междунар. науч.-практ. конф., посвященной 140-летию со дня основания НИУ «БелГУ»* (г. Белгород, 25 ноября 2015 г.). Белгород: ООО «Эпицентр». 2016:419–421.
2. Клейнхоф И.А. Социально-экономическая устойчивость Российской Федерации: предпосылки сдерживающие факторы // *Стратегии бизнеса*. 2015;3(11). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialno-ekonomicheskaya-ustoychivost-rossiyskoy-federatsii-predposylki-sderzhivayuschie-factory> (дата обращения: 18.06.2024).
3. Ibn-Mohammed T., Mustapha K.B., Godsell J., Adamu Z., Babatunde K.A., Akintade D.D., Koh S.C.L. A critical analysis of the impacts of COVID-19 on the global economy and ecosystems and opportunities for circular economy strategies. *Resour. Conserv. Recycl.* 2021; 164:105169.
4. Berg E.J., Ostri J.O. Inequality and unsustainable growth: two sides of the same coin. *Bulletin of International Organizations: education, science, new economy*. 2013;8(4):77–99.
5. Johannisson B. Entrepreneurship in a corporatist state: the case of Sweden. *Entrepreneurship in Europe: The Social Processes*. 2015:131–142.
6. Mingaleva Z., Sheresheva M., Oborin M., Gvarliani T. Networking of small cities to gain sustainability. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. 2017:140–156.
7. Bullock R. Mill town' identity crisis: reframing the culture of forest resource dependence in single industry towns. *Social transformation in rural Canada: new insights into community, cultures and collective action*. 2013:69–290.
8. *Inequalities and the Post-2015 Development Agenda A Concept Note. United Nations Research Institute for Social Development*. URL: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjcglclefind-mkaj/https://www.files.ethz.ch/isn/159691/02%20-%20Inequalities.pdf> (дата обращения 04.08.2023).
9. Bowles S., Carlin W. Inequality as experienced difference: A reformulation of the Gini coefficient. *Economics Letters*. 2020;186:108789. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165176519303969> (дата обращения 04.08.2023).
10. Yong Tao, Xiangjun Wu, Changshuai Li. Rawls' Fairness, Income Distribution and Alarming Level of Gini Coefficient. *United Nations Research Institute for Social Development*. 2017;2017(67):19. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.3979>
11. Casas T., Cozzi G. Elite Quality Report 2021. *Country Scores and Global Rankings*. 2021:324
12. Авдучевская Е.А. Воспроизводство человеческого капитала в целях обеспечения экономической безопасности региона в контексте цифровой трансформации. *Естественно-гуманитарные исследования*. 2023;4(48):18–21. EDN UCYLXA.
13. Садыков Р.М. Благосостояние населения как фактор социальной устойчивости территорий. *Современные проблемы науки и образования*. 2015;2-1:624. EDN UHXFWR.
14. Phil, Butler Rusty Tanks, Exchange Rate Hysteria, and Borrowing Like There's No Tomorrow (Butler Phil). *New Eastern Outlook*. – URL: <https://journal-neo.su/2023/09/02/rusty-tanks-exchange-rate-hysteria-and-borrowing-like-theres-no-tomorrow/> (дата обращения: 18.06.2024).
15. Мирюкова М.А., Соколова В.Ф. Формирование социально-экономической безопасности как системообразующего элемента

- национальной безопасности. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;3(45):104–110. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-104-110](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-104-110)
16. Васильева А.В. Пространственная организация рекреационной системы приграничных регионов Российской Федерации: специальность 08.00.05: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. эконом. наук. Санкт-Петербург, 2020:23.
 17. Комментарий официального представителя МИД России М.В. Захаровой в связи с приостановкой Европейской комиссией российского участия в программах приграничного и трансграничного сотрудничества между Россией и государствами-членами Евросоюза. *Министерство иностранных дел Российской Федерации*. – URL: https://www.mid.ru/ru/foreign_policy/news/1803130/ (дата обращения: 18.06.2024).
 18. Ковальский Л.В., Морковцева Ю.Н. Транспортная инфраструктура Калининградской области. *Юный ученый*. 2023;2(65):199–200.
 19. Овчинников, Д. Е. Управление региональными проектами как основа социально-экономического развития территории: специальность 5.2.3. автореф. дис. на соискание ученой степени канд. эконом. наук. Санкт-Петербург, 2024:23.
 20. Социально-экономическое положение Калининградской области в 2023 году. *Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Калининградской области*. 2024. – URL: https://39.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/И%201.1%2012_23d.pdf (дата обращения: 19.06.2024).
 21. Годовой отчет о ходе реализации и оценке эффективности государственной программы Калининградской области «Модернизация экономики» в 2022 году. *Министерство экономического развития, промышленности и торговли Калининградской области*. 2023. – URL: [https://economy.gov39.ru/deyatelnost/strategicheskoe-planirovanie/gosudarstvennye-programmy/Годовой%20отчет%20ГП%20МЭ%202022%20\(на%20сайт\).pdf](https://economy.gov39.ru/deyatelnost/strategicheskoe-planirovanie/gosudarstvennye-programmy/Годовой%20отчет%20ГП%20МЭ%202022%20(на%20сайт).pdf) (дата обращения: 19.06.2024)
- ### REFERENCES
1. Shcherbina V.O., Karapetyan I.R. Theoretical aspects of economic security of socio-economic systems. In: *Actual problems of the economy in the context of reforming modern society. Materials of the IV International scientific and practical conference dedicated to the 140th anniversary of the founding of the National Research University "BelSU"* (Belgorod, November 25, 2015). Belgorod: ООО «Epitsentr». 2016:419–421. (In Russ.).
 2. Kleinkhof I.A. Socio-economic stability of the Russian Federation: prerequisites constraining factors. *Strategii biznesa*. 2015;3(11). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialno-ekonomicheskaya-ustoychivost-rossiyskoy-federatsii-predposylki-sderzhivayuschiefactory> (Accessed: 18.06.2024). (In Russ.).
 3. Ibn-Mohammed T., Mustapha K.B., Godsell J., Adamu Z., Babatunde K.A., Akintade D.D., Koh S.C.L. A critical analysis of the impacts of COVID-19 on the global economy and ecosystems and opportunities for circular economy strategies. *Resour. Conserv. Recycl.* 2021; 164:105169.
 4. Berg E.J., Ostri J.O. Inequality and unsustainable growth: two sides of the same coin. *Bulletin of International Organizations: education, science, new economy*. 2013;8(4):77–99.
 5. Johannisson B. Entrepreneurship in a corporatist state: the case of Sweden. *Entrepreneurship in Europe: The Social Processes*. 2015:131–142.
 6. Mingaleva Z., Sheresheva M., Oborin M., Gvarliani T. Networking of small cities to gain sustainability. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*. 2017:140–156.
 7. Bullock R. Mill town' identity crisis: reframing the culture of forest resource dependence in single industry towns. *Social transformation in rural Canada: new insights into community, cultures and collective action*. 2013:69–290.
 8. *Inequalities and the Post-2015 Development Agenda A Concept Note*. United Nations Research Institute for Social Development. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.files.ethz.ch/isn/159691/02%20-%20Inequalities.pdf> (Accessed: 04.08.2023).
 9. Bowles S., Carlin W. Inequality as experienced difference: A reformulation of the Gini coefficient. *Economics Letters*. 2020;186:108789. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165176519303969> (Accessed: 04.08.2023).
 10. Yong Tao, Xiangjun Wu, Changshuai Li. Rawls' Fairness, Income Distribution and Alarming Level of Gini Coefficient. *United Nations Research Institute for Social Development*. 2017;2017(67):19. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.3979>

11. Casas T., Cozzi G. Elite Quality Report 2021. *Country Scores and Global Rankings*. 2021:324
12. Avduevskaya E.A. Reproduction of human capital in order to ensure the economic security of the region in the context of digital transformation. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya*. 2023;4(48):18–21. EDN UCYLXA. (In Russ.).
13. Sadykov R.M. Welfare of the population as a factor of social stability of territories. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015;2-1:624. EDN UHXFWR. (In Russ.).
14. Phil, Butler Rusty Tanks, Exchange Rate Hysteria, and Borrowing Like There's No Tomorrow (Butler Phil). *New Eastern Outlook*. – URL: <https://journal-neo.su/2023/09/02/rusty-tanks-exchange-rate-hysteria-and-borrowing-like-theres-no-tomorrow/> (Accessed: 18.06.2024).
15. Miryukova M.A., Sokolova V.F. Formation of socio-economic security as a system-forming element of national security. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;3(45):104–110. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)104-110](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)104-110).
16. Vasilyeva A.V. Spatial organization of the recreational system of the border regions of the Russian Federation: specialty 08.00.05: abstract. for the degree of Candidate of Economics. sciences'. St. Petersburg, 2020:23. (In Russ.).
17. Comment by the official representative of the Russian Foreign Ministry, M.V. Zakharova, in connection with the suspension by the European Commission of Russian participation in cross-border and cross-border cooperation programs between Russia and the EU member states. The Ministry of Foreign Affairs of the Russian Federation. – URL: https://www.mid.ru/ru/foreign_policy/news/1803130/ (Accessed: 18.06.2024). (In Russ.).
18. Koval'skii L.V., Morkovtseva Yu.N. Transport infrastructure of the Kaliningrad region. *Yunyi uchenyi*. 2023;2(65):199–200.
19. Ovchinnikov D.E. Regional project management as a basis for socio-economic development of the territory: specialty 5.2.3. Author's abstract. dis. to seek the degree of Candidate of Economics. sciences'. Saint Petersburg, 2024:23. (In Russ.).
20. *The socio-economic situation of the Kaliningrad region in 2023. The territorial body of the Federal State Statistics Service for the Kaliningrad region*. 2024. – URL: https://39.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/I%201.1%2012_23d.pdf (Accessed: 19.06.2024).
21. *Annual report on the implementation and evaluation of the effectiveness of the Kaliningrad Region's state program "Modernization of the Economy" in 2022. Ministry of Economic Development, Industry and Trade of the Kaliningrad Region*. 2023. – URL: [https://economy.gov39.ru/deyatelnost/strategicheskoe-planirovanie/gosudarstvennyie-programmy/Godovoi%20otchet%20GP%20ME%2022%20\(na%20sait\).pdf](https://economy.gov39.ru/deyatelnost/strategicheskoe-planirovanie/gosudarstvennyie-programmy/Godovoi%20otchet%20GP%20ME%2022%20(na%20sait).pdf) (Accessed: 19.06.2024).

Сведения об авторах

Мария Александровна Мирюкова, к.с.н., доцент кафедры юриспруденции, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (Западный филиал)
E-mail: miryukova-ma@ranepa.ru

Ирина Анатольевна Кан, преподаватель кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный университет
E-mail: ira_kan@inbox.ru

Information about the authors:

Maria A. Miryukova, Cand.Sci. (Soc.), Assoc. Prof. of the Department of Jurisprudence, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Western Branch)
E-mail: miryukova-ma@ranepa.ru

Irina A. Kan, Lecturer at the Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University
E-mail: ira_kan@inbox.ru

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

Поступила в редакцию 20.08.2024
 После доработки 30.08.2024
 Принята к публикации 03.09.2024

Received 20.08.2024
 Revised 30.08.2024
 Accepted 03.09.2024

Оригинальная статья

УДК 353.8

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-3(49)-130-139

**МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПРАКТИКИ ИНСТИТУЦИОНАЛЬНОГО
СТИМУЛИРОВАНИЯ МАЛОГО И СРЕДНЕГО БИЗНЕСА: ОПЫТ КАЗАХСТАНА**

© 2024 г. К. И. Курпаяниди^{1, 2}

¹Международный институт пищевых технологий и инженерии (Республика Узбекистан, 150105, Фергана, ул. Ал-Ферганий, 204)

²Ферганский политехнический институт (Республика Узбекистан, 150107, Фергана, ул. Ферганская, 86)

Аннотация. В статье проведен всесторонний анализ государственных мер поддержки, направленных на развитие малого и среднего предпринимательства (МСП) в Республике Казахстан. Исследуется текущее состояние субъектов МСП, а также выявляются основные препятствия, сдерживающие их рост и развитие. Особое внимание уделяется проблемам, связанным с кредитованием, налогообложением и доступом к информационным ресурсам. Авторы рассматривают эффективные стратегии казахстанского правительства, реализуемые через национальные программы и инициативы, и оценивают их результативность на основе доступных эмпирических данных. Также проведен анализ международного опыта для выявления наиболее эффективных механизмов стимулирования. В работе предлагаются конкретные рекомендации по улучшению институциональной среды и разработке комплексной системы поддержки приоритетных направлений развития МСП. Обсуждается важность создания благоприятных условий для инновационной деятельности и увеличения экспортного потенциала предприятий. Рассмотрены вопросы стратегического планирования на государственном уровне с целью достижения устойчивого социально-экономического развития.

Ключевые слова: малое и среднее предпринимательство, государственная поддержка, республика Казахстан, экономическое развитие, кредитование, налогообложение, информационные ресурсы, инновационная деятельность, экспортный потенциал, стратегическое планирование

Для цитирования: Курпаяниди К.И. Международные практики институционального стимулирования малого и среднего бизнеса: опыт Казахстана. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;3(49):130–139. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-130-139](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-130-139)

Original article

**INTERNATIONAL PRACTICES OF INSTITUTIONAL STIMULATION OF SMES:
KAZAKHSTAN'S EXPERIENCE**

© 2024 K. I. Kurpayanidi^{1, 2}

¹International Institute of Food Technology and Engineering (Republic of Uzbekistan, 150105, Fergana, 204 Al-Ferganiy str.)

²Ferghana Polytechnic Institute (Republic of Uzbekistan, 150107, Fergana, 86, Fergana str.)

Abstract. The article provides a comprehensive analysis of state support measures aimed at the development of small and medium-sized enterprises (SMEs) in the Republic of Kazakhstan. The current state of SMEs is investigated, and the main obstacles constraining their growth and development are identified. Particular attention is paid to problems related to credit, taxation and access to information resources. The authors review the effective strategies of the Kazakhstani government implemented through national programmes and initiatives and assess their effectiveness based on available empirical data. International experience is also analysed to identify the most effective incentive mechanisms. The paper offers specific recommendations for improving the institutional

environment and developing a comprehensive system of support for priority areas of SME development. The importance of creating favourable conditions for innovation and increasing the export potential of enterprises is discussed. The final part is devoted to strategic planning at the state level in order to achieve sustainable socio-economic development.

Keywords: small and medium-sized enterprises, state support, the Republic of Kazakhstan, economic development, crediting, taxation, information resources, innovation activity, export potential, strategic planning

For citation: Kurpayanidi K.I. International practices of institutional stimulation of smes: Kazakhstan's experience. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;3(49):130–139. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3\(49\)-130-139](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-3(49)-130-139)

Введение

Современное экономическое развитие невозможно представить без активного участия малого и среднего бизнеса (МСБ), который играет ключевую роль в создании рабочих мест, стимулировании инноваций и обеспечении социальной стабильности. Анализ международной практики поддержки и развития МСБ показывает, что наиболее эффективные инструменты и механизмы стимулирования могут быть адаптированы и применены в различных национальных контекстах.

Малый и средний бизнес способствуют развитию конкуренции, диверсификации экономики и расширению экспортного потенциала страны. Однако существует ряд факторов, сдерживающих рост и развитие МСБ, таких как недостаток финансовых ресурсов, ограниченный доступ к новым технологиям, несовершенство регуляторной среды [1; 2].

Государственные структуры различных стран оказывают поддержку МСБ через финансовые стимулы, налоговые льготы, упрощение законодательства, создание платформ для инновационного сотрудничества и улучшение доступа к международным рынкам.

Выбор инновационного пути может кардинально изменить традиционный подход к стимулированию МСБ. Примеры стран с различными экономическими системами демонстрируют широкий спектр инновационных инструментов, успешно применяемых в разных условиях. Такой подход предполагает не только копирование зарубежного опыта, но и глубокое понимание специфики отечественного МСБ и сопутствующих социально-экономических условий.

Актуальность настоящего исследования подчеркивается важностью иностранных инновационных стратегий в контексте глобальной экономической интеграции и стремления к устойчивому развитию на основе внедрения инноваций.

Степень научной разработанности проблемы

Проблемы стимулирования малого и среднего предпринимательства являются частью более

широкого контекста государственного регулирования предпринимательской деятельности. Теоретические основы этого регулирования были изучены в работах таких авторов, как Г. Берл, П. Друкер, М. Кассон, М. Мескон, Дж.Г. Беннетт, М. Кастельс, А. Мак-Кошен, Н. Сирополис, Р. Херберт, Р. Хизрич. Внимание ученых, включая исследования Н.Д. Кондратьева, А. Смита, Ж.-Б. Сэя, Й.А. Шумпетера и других, было обращено на общие вопросы функционирования предпринимательской деятельности в рыночной экономике.

В контексте стран СНГ проблемы развития, регулирования и поддержки предпринимательства изучались многими авторами, включая В.И. Агасарову, А.О. Блинова, М.Я. Веселовского, А. Виленского, А.З. Гусова, М.А. Икрамова, Р.В. Ишутину, А.М. Кадырова, К.И. Курпаяниди, В.Д. Мамонтова, О.Б. Репкину, К.Ю. Решетова, В.Д. Секерина, А.М. Чернопотова и др. Они анализировали институциональные аспекты стимулирования предпринимательства, опираясь на работы Дж.Р. Коммонса, Р. Коуза, Д.С. Норта, а также на результаты исследований отечественных и зарубежных ученых, таких как Ю.Н. Александрина, К.Ж. Альжаханова, А.С. Васильева, А. Гайнетдинов, А.С. Махимов, А.С. Нурмаганбетов, С. Сейтжанов, Ш. Тлеубергенов, Д. Тростянский, А.Ф. Расулев.

Однако в работах отечественных ученых остается много нерешенных вопросов, касающихся инструментария и практик государственной и муниципальной поддержки малого предпринимательства. Используемые концепции и терминология не всегда являются едиными и полностью адекватными. Кроме того, в исследованиях редко используется комплексный подход к анализу организации муниципальной поддержки малого предпринимательства, который учитывает влияние реформ местного самоуправления и административной реформы на этот процесс. Многие аспекты государственного стимулирования малого и среднего предпринимательства остаются недостаточно исследован-

ными, что и определило актуальность выбора темы для дальнейшего исследования.

Теоретическая и методологическая база исследования

В теоретическом плане настоящее исследование опирается на фундаментальные положения по государственному регулированию предпринимательства и работы как отечественных, так и зарубежных ученых, затрагивающих проблемы функционирования системы государственного регулирования предпринимательства.

Методологическая база исследования включает в себя общенаучные методы диалектического познания, которые позволяют рассмотреть проблему совершенствования системы государственного стимулирования малого предпринимательства с позиции системного подхода.

Анализ и результаты

В соответствии с поставленными целью и задачами исследуется широкий спектр вопросов, связанных с государственным стимулированием приоритетных направлений малого и среднего предпринимательства (МСП) в системе его регулирования.

1. Государственное стимулирование

Государственное стимулирование МСП представляет собой совокупность мер, направленных на повышение мотивации субъектов хозяйственной деятельности к предпринимательской активности в сферах, имеющих стратегическое значение для общества и государства [3; 4]. В этом контексте концепция "государственного регулирования предпринимательства" обширнее, чем "государственное стимулирование предпринимательства". Под "государственной поддержкой предпринимательства" понимается отдельный аспект стимулирования, когда помимо косвенных стимулирующих мероприятий используются меры финансовой и нефинансовой поддержки.

Целями государственного стимулирования предпринимательской деятельности в любой экономической системе являются:

- создание благоприятных условий для экономического роста;
- поддержка развития предпринимательства как движущей силы устойчивого социально-экономического развития;
- содействие местным производителям;
- обеспечение занятости населения и снижение уровня безработицы.

Стимулирование МСП осуществляется через программы, основанные на законодательных и нормативных актах [5]. Эти программы разрабатываются и реализуются государством, а мони-

торинг и контроль за их выполнением позволяют разрабатывать стратегические решения.

Под "государственной поддержкой предпринимательства" понимается система мер, направленных на укрепление и дополнительное стимулирование развития стратегически важных направлений предпринимательства, включая инновационное предпринимательство. Примерами эффективных мер являются государственно-частное партнерство и субсидирование. Роль государственной поддержки обусловлена необходимостью преодоления слабых сторон МСП и смягчения последствий экономических и ресурсных ограничений [6 – 8].

Таким образом, государственное стимулирование предпринимательства направлено на создание благоприятного предпринимательского окружения, а государственная поддержка является одним из ее аспектов, сосредотачиваясь на стратегически важных направлениях развития предпринимательства.

2. Основные компоненты механизма государственного стимулирования МСП

Система государственного стимулирования МСП является частью системы государственного регулирования, которая действует через механизм, включающий принципы, методы и соответствующий инструментарий. Методы государственного регулирования подразумевают использование различных средств и инструментов. Например, правовые методы основаны на законодательных актах, в то время как административные и организационные инструменты разрабатываются на основе нормативно-правовых актов.

Экономический инструментарий включает разнообразные меры, направленные на поддержку МСП, такие как налоговые льготы и льготное кредитование. Информационный инструментарий, в свою очередь, представляет собой спектр государственных услуг и коммуникационных каналов, которые обеспечивают взаимодействие между государством и предпринимателями.

Регулирование осуществляется через различные сферы экономической политики, такие как фискальная, бюджетная, денежно-кредитная, инновационная, амортизационная, инвестиционная [9 – 12].

Создание эффективной системы государственного стимулирования предпринимательства должно способствовать развитию МСП в соответствии со стратегическими целями государства. Результаты функционирования системы государственного стимулирования МСП формируют благоприятные условия для предпринимательской активности. Разработка и реализация

целевых программ развития предпринимательства представляют собой комплексный инструмент, определяющий приоритеты государства и направления воздействия на предпринимательскую среду и субъектов предпринимательской деятельности.

Концепция "предпринимательский климат" описывает среду, в которой функционирует предпринимательство. Этот климат формируется под воздействием различных факторов, включая состояние экономики, законодательную базу, инфраструктуру инвестиций, финансовые и кредитные условия, уровень развития производства и статус инвесторов.

Государственное стимулирование МСП осуществляется в рамках институциональной среды предпринимательства, которая включает в себя рыночные и нерыночные институты, создающие нормативные условия и инфраструктуру для деятельности предпринимателей.

3. Методологические основы приоритетных направлений МСП

Методологические основы определения приоритетных направлений МСП рассмотрен на примере Республики Казахстан. Государство, ответственное за стимулирование и поддержку МСП, применяет ряд мер, направленных на оптимизацию деятельности предпринимательских структур в стране, особенно выделяя приоритетные отрасли экономики. Для определения этих приоритетных направлений необходимо учитывать региональные особенности бизнеса и ресурсную базу развития каждого региона. Такой подход позволяет создать систему стимулирования МСП, адаптированную к конкретным потребностям и возможностям регионов. При этом система стимулирования должна соответствовать экономической стратегии государства.

В Казахстане одним из приоритетов является развитие малого и среднего бизнеса в контексте формирования новой модели экономики. В последние пять лет наблюдается устойчивый рост доли МСП в ВВП страны. Однако в этой сфере все еще существует множество проблем, требующих решения.

Данные Министерства национальной экономики свидетельствуют о значительном росте участия МСП в экономике Казахстана за период с 2019 по 2023 годы. По данным Министерства национальной экономики, за период с 2019 по 2023 годы участие казахстанского МСП в экономике выросло с 31,7 до 36,4 %, то есть на 4,7 %. Общая численность занятых в 2023 году увеличилась на 23,8 % и достигла 4,2 млн человек.

По состоянию на 1 января 2024 года количество зарегистрированных юридических лиц составило 526 290 единиц, в том числе 421 209

действующих юридических лиц. Количество зарегистрированных субъектов индивидуального предпринимательства составило 1 719 279, в том числе 1 638 998 действующих субъектов. Количество зарегистрированных субъектов МСП составило 2 178 951 единиц, в том числе действующих – 2 002 199.

Важно отметить, что структура развития МСП в Республике Казахстан неоднородна по регионам [10; 13 – 15]. Например, количество зарегистрированных юридических лиц растет год от года, особенно за счет малых юридических лиц. Однако динамика средних и крупных юридических лиц имеет нестабильный характер.

В исследовании было осуществлено детальное рассмотрение условий функционирования и роста количества малых и средних предприятий на территории Республики Казахстан, где среда предпринимательской активности демонстрирует существенные региональные диспаритеты, как представлено в таблице. Статистический анализ показывает, что за последнее десятилетие (2013 – 2023 годы) наблюдается увеличение количества юридических лиц на 55,3 % (с 338 981 до 526 290). Особенно выделяется тенденция роста в секторе малого бизнеса с ежегодным приростом в среднем на 4,6 %. В то же время динамика развития средних и крупных юридических лиц характеризуется отсутствием устойчивого роста, с заметными колебаниями, отмечаются спады на 1,3, 1,4, 3,1 %.

К началу 2024 года, проанализировав данные за декабрь 2023 года и сопоставив их с ноябрьскими показателями того же года, было обнаружено сокращение количества регистрируемых юридических лиц на 0,4 %, тогда как в годовом сравнении количество новых юридических субъектов продемонстрировало увеличение на 3,6 %. Также обозначилось небольшое снижение (–0,2 %) количества активных юридических лиц по сравнению с предыдущим месяцем, тогда как в годовом исчислении этот показатель вырос на 5,5 %. Данные по отраслям показывают, что на начало 2024 года самая высокая доля регистраций приходится на сферу оптовой и розничной торговли и ремонта автомобилей и мотоциклов, которая составляет 27,7 %. Следом идут секторы строительства и предоставления различных услуг (13,3 и 9,9 % соответственно). Эти три сферы деятельности в сумме формируют 50,9 % от общего количества зарегистрированных юридических лиц.

Таким образом, понимание приоритетных направлений МСП и адаптация стимулирующих мер к региональным особенностям являются ключевыми элементами успешной политики

**Зарегистрированные и действующие субъекты по размерности и признаку активности
по состоянию на 1 января 2024 г. [16]
Registered and active entities by dimension and activity as of January 1, 2024 [16]**

	Юридические лица		Субъекты индивидуального предпринимательства		Филиалы и филиалы иностранных юридических лиц		Субъекты малого и среднего предпринимательства	
	зарегистрированные	действующие	зарегистрированные	действующие	зарегистрированные	действующие	зарегистрированные	действующие
Всего	526 290	421 209	1 719 279	1 638 998	32 062	22 305	2 178 951	2 002 199
Малые	517 123	412 186	–	–	30 931	21 188	2 175 927	1 999 259
Средние	6 689	6 575	–	–	632	623	3 024	2 940
Крупные	2 478	2 448	–	–	499	494	–	–

государственной поддержки предпринимательства в Республике Казахстан.

По состоянию на 1 января 2024 года количество действующих субъектов МСП по сравнению с предыдущим годом увеличилось на 10,1 %. Распределение субъектов МСП по видам представлено следующим образом: индивидуальные предприниматели составляют 66,2 %, юридические лица малого предпринимательства – 21 %, крестьянские или фермерские хозяйства – 12,7 %, юридические лица среднего предпринимательства – 0,1 %.

Среди различных видов экономической деятельности наибольшая доля зарегистрированных субъектов МСП приходится на отрасли "Оптовая и розничная торговля; ремонт автомобилей и мотоциклов" – 35,9 %, а также на "Предоставление прочих видов услуг" – 15 %. Сельское, лесное и рыбное хозяйство составляют 14,5 %.

Центры поддержки предпринимательства (ЦПП) функционируют по принципу "одного окна", где представители различных учреждений и компаний консультируют, информируют о программах поддержки предпринимательства, разъясняют условия сотрудничества с финансовыми институтами, помогают в сборе документов для получения поддержки, а также оказывают консультации по правовым вопросам.

Среди услуг, предоставляемых ЦПП, можно выделить:

- консультирование по вопросам открытия, закрытия и ведения бизнеса;
- информирование о программах поддержки предпринимательства, таких как "ДКБ-2020", "ДКЗ-2020", "Агробизнес", "Экспортер-2020", "Производительность-2020";
- разъяснение условий сотрудничества с финансовыми институтами, такими как АО ФРП "Даму", АО КИРИ и БВУ, АО "Фонд финансовой поддержки" и другие;
- консультирование по сбору необходимых документов для получения поддержки;
- консультирование по правовым вопросам;
- сбор заявок на участие в обучающих проектах;
- сбор заявок на оказание специализированных сервисных услуг для ведения действующего бизнеса.

На сегодняшний момент в районах Южно-Казахстанской области действуют 14 ЦПП, где консультанты бесплатно информируют предпринимателей и жителей с предпринимательскими инициативами о государственных программах поддержки бизнеса.

По итогам первого полугодия было зарегистрировано 6222 клиента, которым были оказаны 14401 консультация, 192 проекта получили одобрение на субсидирование процентной ставки и гарантирование кредита в рамках Единой

программы поддержки и развития бизнеса "ДКБ-2020", а также было одобрено микрокредитование по программе "Дорожная карта занятости-2020".

С целью рационального размещения производства объединение бизнес-субъектов различного масштаба может способствовать созданию симбиоза между крупным бизнесом и МСП. Например, формирование инновационно-производственных объединений позволит реализовать стратегические приоритеты научных направлений в области передовых технологий. Создание сельскохозяйственных объединений с полным циклом производства поможет эффективно использовать ресурсы и сосредоточиться на разработке новых технологий в этой сфере [17].

Приоритетные направления стимулирования МСП включают в себя инновационное предпринимательство, производственное предпринимательство и услуги. Развитие информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) требует консолидации аутсорсинговых компаний и частных предпринимателей вокруг стратегических проектов, таких как создание общих проектных команд.

Сотрудничество в этой области позволяет осуществлять проекты в сфере информационно-коммуникационных технологий как для крупных бизнесов, так и в рамках государственного заказа [18, 19]. Государственная поддержка включает в себя создание специализированных ИКТ технопарков. Актуальными направлениями являются цифровизация и развитие инновационной экосистемы, а также переход к "цифровому государству" и развитие человеческого капитала.

Товарное производство и оказание услуг стандартного спроса, как правило, совершаемые малыми и средними предприятиями, не всегда находятся в сфере активной систематической поддержки. Тем не менее, необходимы стимулирующие меры со стороны государства для ключевых секторов, в числе которых выделяется развитие импортозамещающих отраслей и поддержка экспортной деятельности. По инновационному вектору МСП могут участвовать в выполнении заказов для крупного бизнеса через механизмы подряда и аутсорсинга, что способствует установлению взаимовыгодного взаимодействия между различными рыночными субъектами. Такое сотрудничество порождает синергетический эффект, значительно повышая потенциал обеих сторон, и, следовательно, заслуживает комплексной поддержки. Эта поддержка может быть реализована через государственные инициативы по созданию инновационных технологических кластеров и развитию крупно-

масштабных проектов, проводимых на условиях государственно-частного партнерства (ГЧП).

Обсуждение

Исследования показывают, что система стимулирования МСП должна включать следующие компоненты: финансово-кредитную, организационно-информационную и административную.

Государственная поддержка приоритетных направлений МСП должна осуществляться с использованием финансово-кредитных, информационно-консультативных и законодательных инструментов. Нормативные акты, регулирующие развитие и поддержку МСП, формируют организационно-правовую основу, но не всегда направлены на прямое стимулирование. Приоритетные направления стимулирования МСП включают инновационное предпринимательство, производственное предпринимательство и услуги.

Для развития ИКТ требуется объединение аутсорсинговых компаний и частных предпринимателей вокруг стратегических проектов. Такое сотрудничество позволит реализовать проекты в сфере ИКТ как для представителей крупного бизнеса, так и в рамках государственных заказов. Важно предусмотреть государственную поддержку через создание специализированных ИКТ технопарков.

Цифровизация и развитие инновационной экосистемы сегодня являются актуальными направлениями экономики. Важными шагами в этом направлении являются переход к "цифровому государству" и развитие человеческого капитала. Для этого необходима поддержка, включая гранты [20].

Система критериев эффективности государственного стимулирования МСП должна включать релевантные показатели, по которым оценивается эффективность поддержки на финансово-кредитном, регуляторном, организационном и информационно-консультационном уровнях.

Анализ эффективности государственного стимулирования МСП в Республике Казахстан показал, что прямые меры поддержки следует рассматривать только как дополнительный механизм. Эффективнее использовать опосредованные инструменты, такие как целевые программы финансирования и консультационная помощь. Результаты оценки эффективности государственной поддержки МСП зависят от институциональной и экономической среды предпринимательства и могут различаться в разных национальных экономиках.

Предложены направления государственного регулирования и стимулирования МСП с акцен-

том на государственные приоритеты. Предлагается распределение полномочий по функциональному принципу с созданием единого центра ответственности и координации в системе поддержки МСП.

В рамках государственных программ активно взаимодействуют Правительство, Фонд развития предпринимательства "Даму" и Национальная палата предпринимателей "Атамекен". В контексте Республики Казахстан определена важная роль Правительства в качестве центрального координатора системы поддержки МСП.

Подчеркивается необходимость развития ИКТ через объединение компаний и предпринимателей вокруг стратегических проектов и создание специализированных ИКТ технопарков.

Можно отметить, что обычная деятельность субъектов МСП не требует системной государственной поддержки, однако некоторые виды деятельности, такие как импортозамещающее производство и экспорт, должны стимулироваться.

Предложены направления стимулирования и поддержки МСП в регионах, учитывая их специфику:

- Западный Казахстан: развитие взаимодействия крупного бизнеса и МСП, особенно в частных проектах; создание единой биржевой площадки по аутсорсингу;

- Центральный и Северный Казахстан: диверсификация промышленности и сельского хозяйства с учетом специфики каждого сектора;

- Восточный и Южный Казахстан: индустриальное предпринимательство, туристический сектор и экологически ориентированное аграрное хозяйство. Рассматривается выгодное географическое положение Восточного Казахстана, соседствующего с Китаем, что открывает перспективу для развития оптовых торговых отношений с присущими им логистическими операциями. Как потенциальные экспортные товары и услуги для китайского рынка выделяются аутсорсинговые услуги для мелкосерийного производства, экологически чистое лекарственное сырье и продукция сельскохозяйственных ферм. Кроме того, подчеркивается привлекательность горных районов Южно-Восточного Казахстана для развития туристической отрасли, включая зимние развлечения, что предъявляет высокие требования к капиталовложениям в туристическую инфраструктуру и подчеркивает необходимость государственной поддержки МСП в этой сфере. Дальнейшее развитие сельского туризма предполагает предоставление грантов и организационную поддержку на продвижение туристических продуктов не только на внутреннем рынке, но и на глобальном уровне.

Выводы

Акцентирование внимания на приоритетных для каждого региона отраслях представляет собой оптимальную стратегию стимулирования МСП, адаптированную к уникальным характеристикам экономической структуры каждой страны. Усовершенствование системы поддержки МСП через разработку линейно-функциональной организационной модели, подразумевающей строгое разграничение ролей и обязанностей между различными уровнями власти и негосударственными институтами, позволит устранить функциональные дублирования и повысить общую эффективность механизмов стимулирования.

В контексте инновационной экономики одним из ключевых приоритетов государственной политики становится стимулирование развития передовых технологий. Малое и среднее предпринимательство обладают высокой адаптивностью, оперативностью и склонностью к инновационному прогрессу, являются идеальными субъектами для достижения этой цели. Очевидно, что инновационное предпринимательство должно занимать центральное место в стратегии государственной поддержки, направленной на ускоренное развитие национальной инновационной системы.

Настоящее исследование подчеркивает значимую роль государства в создании благоприятных условий для развития инновационной активности и предпринимательства. Методологический подход к анализу экономической политики представляет важную основу для разработки действенных мер стимулирования, которые ориентированы на долгосрочную перспективу устойчивого развития страны.

Исследование охватывает ключевые аспекты (инфраструктурные, технологические, финансовые и рыночные компоненты) и предоставляет целостное понимание взаимосвязей между различными элементами предпринимательской экосистемы. Это, несомненно, способствует разработке комплексных стратегий и политик, направленных на содействие процветанию МСП в Казахстане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тузубекова М.К., Бекбусинова Г.К., Капенова А.З. Современное состояние формирования инновационных кластеров в Республике Казахстан. *Мемлекеттік аудит – государственный аудит*. 2024;62(1):94–110. <https://doi.org/10.55871/2072-9847-2024-62-1-94-110>
2. Мусаева А.А. Оценка эффективности функционирования инновационной инфраструктуры Казахстана. *Вестник Атырауского университета имени Халела Досмухамедова*. 2024;72(1):86–98. <https://doi.org/10.47649/vau.2024.v.72.i1.09>
3. Сарсен К.А., Кирдасинова К.А., Орозонова А.А. Мировые тренды измерения инновационного потенциала предприятия. *Economics: the strategy and practice*. 2023;18(1):6–19. <https://doi.org/10.51176/1997-9967-2023-1-6-19>
4. Цатхланова Т. Анализ проблем развития интеллектуального потенциала казахстана в условиях инновационной экономики. *Вестник Атырауского университета имени Халела Досмухамедова*. 2023;70(3):63–75. <https://doi.org/10.47649/vau.2023.v70.i3.07>
5. Kurpayanidi K., Abdullaev A., Ashurov M., Nabyeva N., Ilyosov A., Turgunov M. Ai's Uses in Industry 7.0: An Industry Growth. 2024 4th International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE). Greater Noida, India, 2024. 2024;1503–1508. <https://doi.org/10.1109/ICACITE60783.2024.10617238>
6. Чанчарова Г., Ошаганова М., Малгараева Ж.К., Кенжалина Ж.Ш. Развитие предпринимательства в Казахстане. *Foundations and Trends in Modern Learning*. 2023;(2). <https://doi.org/10.5281/zenodo.7882250>
7. Ондаш А., Нургабылов М., Хамзаева А. Проблемы и перспективы финансового обеспечения индустриально-инновационного развития Республики Казахстан в условиях трансформации глобальной финансовой системы. *ECONOMIC Series of the Bulletin of the LN Gumilyov ENU*. 2024;(1):191–209. <https://doi.org/10.32523/2789-4320-2024-1-191-209>
8. Kurpayanidi K. Innovation and competitiveness: Modelling future economic growth through the national innovation system of Uzbekistan. *E3S Web of Conferences*. 2023;460:03013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346003013>
9. Aubakirova G.M., Isatayeva F.M. New approaches to the construction of a diversified economy: The experience of Kazakhstan. *Studies on Russian Economic Development*. 2021;32(6):712–718. <https://doi.org/10.1134/S1075700721060034>
10. Баймахамбетова Г.И., Камали К.М., Балапанова Э.С., Нургабылов М.Н., Баетова М.Т. Экономические механизмы государственной поддержки малого инновационного

- предпринимательства в Республике Казахстан. *Научный журнал «Вестник НАН РК»*. 2023;405(5):318–334.
<https://doi.org/10.32014/2023.2518-1467.594>
11. Темирлан К. Совершенствование системы государственного регулирования малого и среднего бизнеса в РК. In: *Publisher. agency: Proceedings of the 3rd International Scientific Conference «Progress in Science» (July 27-28, 2023)*. SAE Institute. (2023, July). Brussels, Belgium, 2023;190.
 12. Брылёва В.А. Особенности ведения малого бизнеса в Казахстане. *Экономические исследования и разработки*. 2023;3(2):13–21.
https://doi.org/10.54092/25420208_2023_32_13
 13. Альпеисова Ш.Е., Булхайрова Ж.С., Саймагамбетова Г.А., Бермухамедова Г.Б. Современное состояние государственного регулирования предпринимательской деятельности в Казахстане. *Вестник университета «Туран»*. 2023;(2(98)):143–158.
<https://doi.org/10.46914/1562-2959-2023-1-2-143-158>
 14. Каиртай Т., Бокаев Б. Совершенствование системы государственного регулирования малого и среднего бизнеса в Республике Казахстан. *Scientific Collection «InterConf.»*. 2023;(165):6–19.
 15. Nurmaganbetov A.C., Shakeev S.S., Serikbayeva V.M. Предпосылки развития «зеленого» предпринимательства в Казахстане. *Bulletin of the Karaganda university Economy series*. 2024;11429(2):166–177.
<https://doi.org/10.31489/2024ec2/166-177>
 16. Статистика предприятий. – URL: <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-org/publications/113761/> (дата обращения 20.09.2024)
 17. Каратаев Ю.А. Особенности малого и среднего предпринимательства в Республике Казахстан. *Инновации и инвестиции*. 2023;(2):262–264.
 18. Сарпеков Р.К., Дюсенов Е.А. Правовое регулирование инвестиций в малый и средний бизнес: опыт Республики Казахстан. *Журнал российского права*. 2020;(1):43–55.
doi.org/10.12737/jrl.2020.004
 19. Успанова М., Омарова А., Сальжанова З., Накипова Г. Совершенствование конкурентоспособности малого и среднего бизнеса как фактор развития экономики. *«Мемлекеттік аудит – государственный аудит»*. 2023;61(4):170–183.
<https://doi.org/10.55871/2072-9847-2023-61-4-170-183>
 20. Хасенова С.М., Кунязов Е.К., Амирова М.А., Нурбаева Г.Н., Бекниязова Д.С. Совершенствование системы государственной поддержки предпринимательства в Республике Казахстан. *Научный журнал «Вестник НАН РК»*. 2023;405(5):570–588.
<https://doi.org/10.32014/2023.2518-1467.610>

REFERENCE

1. Tusupbekova M.K., Bekbusinova G.K., Kape-nova A.Z. The current state of the formation of innovation clusters in the Republic of Kazakhstan Memlekettic audit – state audit". 2024;62(1):94–110. (In Russ.).
<https://doi.org/10.55871/2072-9847-2024-62-1-94-110>
2. Musayeva.A. Assessment of the effectiveness of the functioning of the innovation infrastructure of Kazakhstan. *Bulletin of Atyrau University named after Halela Dosmukhamedova* 2024;72(1):86–98. (In Russ.).
<https://doi.org/10.47649/vau.2024.v.72.i1.09>
3. Sarsen K.A., Kirdasinova K.A., Orozonova A.A. Global Trends in Measuring the Innovative Potential of an Enterprise. *Economy: strategy and practice*. 2023;18(1):6–19. (In Russ.).
<https://doi.org/10.51176/1997-9967-2023-1-6-19>
4. Tsatkhlanova T. Analysis of the problems of development of intellectual potential of Kazakhstan in the conditions of innovative economy. *Bulletin of the Khalel Dosmukhamedov Atyrau University*. 2023;70(3):63–75. (In Russ.).
<https://doi.org/10.47649/vau.2023.v70.i3.07>
5. Kurpayanidi K., Abdullaev A., Ashurov M., Nabiyeveva N., Ilyosov A., Turgunov M. Ai's Uses in Industry 7.O: An Industry Growth. 2024 4th International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE). Greater Noida, India, 2024. 2024;1503–1508.
<https://doi.org/10.1109/ICACITE60783.2024.10617238>
6. Changcharova G., Oganova M., Malgaraeva Zh.K., Kenzhalina Zh.Sh. Development of entrepreneurship in Kazakhstan. *Foundations and Trends in Modern Learning*. 2023;(2). (In Russ.).
<https://doi.org/10.5281/zenodo.7882250>
7. Ongdash A., Nurgabylov M., Khamzayeva A. Problems and prospects of financial support for the industrial and innovative development of the Republic of Kazakhstan in the context of the transformation of the global financial system. *ECONOMIC Series of the Bulletin of the LN Gumilyov ENU*. 2024;(1):191–209. (In Russ.).
<https://doi.org/10.32523/2789-4320-2024-1-191-209>
8. Kurpayanidi K. Innovation and competitiveness: Modelling future economic growth through the national innovation system of Uz-

- bekistan. *E3S Web of Conferences*. 2023;460:03013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346003013>
9. Aubakirova G.M., Isatayeva F.M. New approaches to the construction of a diversified economy: The experience of Kazakhstan. *Studies on Russian Economic Development*. 2021;32(6):712–718. <https://doi.org/1134/S1075700721060034>
 10. Baimakhambetova G.I., Kamali K.M., Balobanova E.S., Nurgabylov M.N., Baetova M.T. Economic mechanisms of state support for small innovative entrepreneurship in the Republic of Kazakhstan. *Scientific journal "Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan"*. 2023;405(5):318–334. (In Russ.). <https://doi.org/10.32014/2023.2518-1467.594>
 11. Temirlan K. Improvement of the system of state regulation of small and medium business in the Republic of Kazakhstan. In: Publisher. agency: Pro-ceedings of the 3rd International Scientific Conference 'Progress in Sci-ence' (July 27-28, 2023). SAE Institute. (2023, July). Brussels, Belgium, 2023;190. Electronic resource. (In Russ.).
 12. Bryleva V.A. Features of small business in Kazakhstan. *Economic research and development*. 2023;3(2):13–21. (In Russ.). https://doi.org/10.54092/25420208_2023_32_13
 13. Alpeisova Sh.E., Bulkhairova Zh.S., Saimagambetova G.A., Bermukhamedova G.B. The current state of state regulation of entrepreneurial activity in Kazakhstan. *Bulletin of the Turan University*. 2023;(2(98)):143–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.46914/1562-2959-2023-1-2-143-158>
 14. Kairtai T., Bokaev B. Improving the system of state regulation of small and medium-sized businesses in the Republic of Kazakhstan. *Scientific Collection «InterConf»*. 2023;(165):6–19. (In Russ.).
 15. Nurmaganbetov A.C., Shakeev S.S., Serikbayeva B.M. Prerequisites for the development of "green" entrepreneurship in Kazakhstan. *Bulletin of the Karaganda university Economy series*. 2024;11429(2):166–177. (In Russ.). <https://doi.org/10.31489/2024ec2/166-177>
 16. Enterprise statistics. – URL: <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-org/publications/113761/> (дата обращения 20.09.2024). (In Russ.).
 17. Karataev Yu.A. Features of small and medium-sized enterprises in the Republic of Kazakhstan. *Innovation and investment*. 2023;(2):262–264. (In Russ.).
 18. Sarpekov R.K., Dyusenov E.A. Legal regulation of investments in small and medium-sized businesses: the experience of the Republic of Kazakhstan. *Journal of Russian Law*. 2020;(1):43–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/jrl.2020.004>
 19. Uspanova M., Omarova A., Salzhanova Z., Nakipova G. Improving the competitiveness of small and medium-sized businesses as a factor in economic development. *"Memlekettik audit – state audit"*. 2023;61(4):170–183. (In Russ.). <https://doi.org/10.55871/2072-9847-2023-61-4-170-183>
 20. Khasanova S.M., Kunyazov E.K., Amirova M.A., Nurbayeva G.N., Bekniyazova D.S. Improving the system of state support for entrepreneurship in the Republic of Kazakhstan. *Scientific journal "Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan"*. (In Russ.). 2023;405(5):570–588. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-1467.610>

Сведения об авторах

Константин Иванович Курпаяниди, профессор, профессор Российской академии естествознания, Международный институт пищевых технологий и инженерии; профессор кафедры экономики, Ферганский политехнический институт
E-mail: antinari@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8354-1512
SPIN-код: 2321-7606

Information about the authors:

Konstantin Ivanovich Kurpayanidi, Professor of the Russian Academy of Natural Sciences, International Institute of Food Technologies and Engineering, Professor, Department of Economics, Fergana Polytechnic Institute
E-mail: antinari@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8354-1512
SPIN-код: 2321-7606

Поступила в редакцию 20.08.2024
 После доработки 27.08.2024
 Принята к публикации 09.09.2024

Received 20.08.2024
 Revised 27.08.2024
 Accepted 09.09.2024

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

С 22 июня 2023 г. журнал «Вестник Сибирского государственного индустриального университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальностям:

1.3.8. *Физика конденсированного состояния (физико-математические; технические);*

2.6.1. *Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические);*

2.6.2. *Металлургия черных, цветных и редких металлов (технические);*

2.6.17. *Материаловедение (технические).*

В журнале публикуются оригинальные, ранее не публиковавшиеся статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера по следующим направлениям:

- физика конденсированного состояния;
- информационные технологии;
- металлургия и материаловедение;
- региональная и отраслевая экономика.

К рукописи следует приложить рекомендацию соответствующей кафедры высшего учебного заведения, экспертное заключение, разрешение ректора или проректора высшего учебного заведения (для неучебного предприятия – руководителя или его заместителя) на опубликование результатов работ, выполненных в данном вузе (предприятии), авторское согласие.

В редакцию следует направлять материалы статьи в электронном виде и два экземпляра текста статьи на бумажном носителе. Для ускорения процесса рецензирования статей электронный вариант статьи и скан-копии сопроводительных документов рекомендуется направлять по электронной почте по адресу *e-mail: vestnicsibgu@sibsiu.ru*. При направлении материалов в редакцию необходимо указывать раздел, в котором статья будет опубликована.

Таблицы, библиографический список и подписуемый текст следует представлять на отдельных страницах. В рукописи необходимо сделать ссылки на таблицы, рисунки и литературные источники, приведенные в статье.

Иллюстрации нужно представлять отдельно от текста на носителе информации. Пояснительные надписи в иллюстрациях должны быть выполнены шрифтом Times New Roman Italic (греческие буквы – шрифтом Symbol Regular) размером 9. Тоновые изображения, размер которых не должен превышать 75×75 мм (фотографии и другие изображения, содержащие оттенки черного цвета), следует направлять в виде растровых графических файлов (форматов *.bmp, *.jpg, *.gif, *.tif) в цветовой шкале «оттенки серого» с разрешением не менее 300 dpi (точек на дюйм). Штриховые рисунки (графики, блок-схемы и т.д.) следует представлять в «черно-белой» шкале с разрешением не менее 600 dpi. На графиках не нужно наносить линии сетки, а экспериментальные или расчетные точки (маркеры) без крайней необходимости не «заливать» черным. Штриховые рисунки, созданные при помощи распространенных программ MS Excel, MS Visio и др., следует представлять в формате исходного приложения (*.xls, *.vsd и др.).

Шрифтовое оформление физических величин: латинские буквы в светлом курсивном начертании, русские и греческие – в светлом прямом. Числа и единицы измерения – в светлом прямом начертании. Особое внимание следует обратить на правильное изображение индексов и показателей степеней. Формулы набираются с помощью редакторов формул Equation или Math Type, масштаб формул должен быть 100 %. Масштаб устанавливается в диалоговом окне «Формат объекта». В редакторе формул для латинских и греческих букв исполь-

зовать стиль «Математический» («Math»), для русских – стиль «Текст» («Text»). Размер задается стилем «Обычный» («Full»), для степеней и индексов – «Крупный индекс / Мелкий индекс» («Subscript / Sub-Subscript»). Недопустимо использовать стиль «Другой» («Other»).

Необходимо избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, графиках и тексте статьи. Объем статьи не должен превышать 18 – 20 страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала.

Рукопись должна быть тщательно выверена, подписана автором (при наличии нескольких авторов, число которых не должно превышать пяти, – всеми авторами); в конце рукописи указывают полное название высшего учебного заведения (предприятия) и кафедры, дату отправки рукописи, а также полные сведения о каждом авторе (Ф.И.О., место работы, должность, ученая степень, звание, служебный и домашний адреса с почтовыми индексами, телефон, e-mail, ORCID). Необходимо указать, с кем вести переписку.

Цитируемую в статье литературу следует давать общим списком в порядке упоминания в статье с обозначением ссылки в тексте порядковой цифрой. Перечень литературных источников рекомендуется не менее 20.

Библиографический список оформляют в соответствии с ГОСТ 7.0.100 – 2018: а) для книг – фамилии и инициалы авторов, полное название книги, номер тома, место издания, издательство и год издания, общее количество страниц; б) для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, полное название журнала, название статьи, год издания, номер тома, номер выпуска, страницы, занятые статьей; в) для статей из сборников – фамилии и инициалы авторов, название сборника, название статьи, место издания, издательство, год издания, кому принадлежит, номер или выпуск, страницы, занятые статьей.

Иностранные фамилии и термины следует давать в тексте в русской транскрипции, в библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводят в оригинальной транскрипции.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

К статье должны быть приложены аннотация объемом 200 – 250 слов, ключевые слова.

В конце статьи необходимо привести на английском языке: название статьи, Ф.И.О. авторов, место их работы, аннотацию и ключевые слова.

Краткие сообщения должны иметь самостоятельное научное значение и характеризоваться новизной и оригинальностью. Они предназначены для публикации в основном аспирантских работ. Объем кратких сообщений не должен превышать двух страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, включая таблицы и библиографический список. Под заголовком в скобках следует указать, что это краткое сообщение. Допускается включение в краткое сообщение одного несложного рисунка, в этом случае текст должен быть уменьшен. Приводить в одном сообщении одновременно таблицу и рисунок не рекомендуется.

Количество авторов в кратком сообщении должно быть не более трех. Требования к оформлению рукописей и необходимой документации те же, что к оформлению статей.

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 (Журнал «Вестник СибГИУ»)).

TO THE AUTHORS ATTENTION

On June 22, 2023 the journal, "Bulletin of Siberian State Industrial University" was included in the List of peer-reviewed scientific editions. The journal should publish the main scientific results of dissertations for the degrees of Candidates and Doctors of Sciences in following specialties:

1.3.8. *Condensed matter physics (physical and mathematical; engineering);*

2.6.1. *Metallurgy and heat treatment of metals and alloys (engineering);*

2.6.2. *Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals (engineering);*

2.6.17. *Materials science (engineering).*

The journal "Bulletin of the Siberian State Industrial University" received K2 category.

The journal publishes original, previously unpublished articles containing the most significant results of scientific and technical experimental research, as well as the results of problematic work in the following areas:

- *Condensed matter physics;*
- *IT;*
- *Metallurgy and materials science;*
- *Regional and sectorial economics.*

The paper should be accompanied by the recommendation of the relevant department of the higher education institution, expert opinion, permission of the rector or vice-rector of the higher education institution (for a non-academic enterprise - the head or his deputy) to publish the results of the work performed in this university (enterprise), author's consent.

The editorial office should receive the materials of the article in electronic form and two copies of the text of the article in hard copy. To speed up the review process, it is recommended to send the electronic version of the article and scanned copies of accompanying documents by e-mail to vestnicsibgiu@sibsiu.ru. You should indicate the section in which the article will be published before sending materials to the editorial office.

Tables, reference list, and captions should be presented on separate pages. You need to make references to tables, figures and references cited in the article.

Illustrations should be presented separately from the text. Explanatory inscriptions in illustrations should be made in Times New Roman Italic font size 9 (Greek letters - in Symbol Regular font). Gray-scale images, the size of which should not exceed 75×75 mm (photographs and other images containing shades of black), should be sent as raster graphic files (formats *.bmr, *.jpg, *.gif, *.tif) in the color scale "shades of gray" with a resolution of at least 300 dpi. Stroke drawings (graphs, flowcharts, etc.) should be presented in "black and white" scale with a resolution of at least 600 dpi. You do not need to draw grid lines on the graphs, and to "fill" black experimental or calculation points (markers) without absolute necessity. Stroke drawings created using common programs MS Excel, MS Visio, etc., should be presented in the format of the original application (*.xls, *.vsd, etc.).

Typography of physical quantities: Latin letters in light italic, Russian and Greek letters in light straight type. Numbers and units of measurement are in light-colored straight type. Particular attention should be paid to the correct representation of indexes and degree indicators. Formulas are typed with the help of formula editors' Equatn or Math Ture, the scale of formulas should be 100%. The scale is set in the Format Object dialog box. In the formula editor, use the "Math" style for Latin and Greek letters, and the "Text" style for Russian letters. The size should be "Full", for degrees and

indexes – "Subscript / Sub-Subscript". Do not use the "Other" style.

It is necessary to avoid repetition of the same data in tables, graphs and the text of the article. The volume of the article should not exceed 18 – 20 pages of text, printed in font 14 at one and a half intervals.

The manuscript should be carefully checked, signed by the author (if there are several authors, the number of which should not exceed five – by all authors). At the end of the manuscript indicate the full name of the higher education institution (enterprise) and department, the date of submission of the manuscript, as well as complete information about each author (full name, place of work, position, academic degree, title, office and home addresses with postal codes, telephone, e-mail, ORCID). It is necessary to indicate with whom to correspond.

References cited in the article should be given in a general list in the order of mentioning in the article, with the reference in the text indicated by a serial number. The list of literature sources is recommended no less than 20.

The references shall be arranged in accordance with GOST 7.0. 100 – 2018: a) for books – surnames and initials of authors, full title of the book, volume number, place of publication, publisher and year of publication, total number of pages; b) for journal articles - surnames and initials of authors, full title of the journal, title of the article, year of publication, volume number, issue number, pages covered by the article; c) for articles from collections – surnames and initials of authors, title of the collection, title of the article, place of publication, publisher, year of publication, to whom it belongs, number or issue, pages covered by the article.

Foreign names and terms should be given in the text in Russian transcription. In the references, the names of authors, full names of books and journals should be given in their original transcription.

References to unpublished works are not allowed.

The article should be accompanied by an abstract of 200 – 250 words and key words.

The title of the article, full name of the authors, place of their work, abstract and key words should be given in English at the end of the article.

Short reports should have independent scientific value and be characterized by novelty and originality. These are mainly meant for the publication of postgraduate papers. Short reports should not exceed two pages of text, typed in 14-point font at one and a half intervals, including tables and bibliography. It should be indicated in brackets under the title that it is a short paper. You can include one simple figure in a brief message; in this case, the text should be reduced. We do not recommend including both a table and a figure in the same paper.

The number of authors in a short report should not exceed three. The requirements for the submission of manuscripts and required documentation are identical to those for the submission of articles. As a rule, corrections of articles are not forwarded to the authors.

If the article is returned to the author for correction (or in case of reduction), the date of submission is considered to be the day of receiving the final text.

Articles submitted to the editorial office are subject to public review.

The articles of the journal are indexed in the Russian Science and Technology Center (RSCI), presented on the websites <https://vestnik.sibsiu.ru/> and <https://www.sibsiu.ru> in the section Science and Innovations (Periodical Scientific Editions (Journal "Vestnik SibGIU").

Н а д н о м е р о м р а б о т а л и

Коновалов С.В., главный редактор

Запольская Е.М., ответственный секретарь

Бащенко Л.П., ведущий редактор

Гашиникова А.О., ведущий редактор

Темлянцева Е.Н., верстка

Олендаренко Е.В., менеджер по работе с клиентами

Безродная Е.А., администратор сайта