

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Научный журнал

ВЕСТНИК
Сибирского государственного
индустриального университета

№ 3 (45), 2023

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 (45), 2023

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

30.09.2023 г.

Выход в свет

30.09.2023 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл.печ.л. 4,3.

Уч.-изд.л. 4,6.

Тираж 300 экз.

Заказ № 280.

Цена свободная

Signed to the press

30.09.2023

Coming out

30.09.2023

The paper size is 60×88 1/8.

Writing paper.

Offset printing.

Usl.pech.l. 4,3.

Uch.-ed.l. 4,6.

The circulation is 300 copies.

Order no. 280.

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, заведующий кафедрой 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

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., доцент, 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

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

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

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

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

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

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

Осколкова Татьяна Николаевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры обработки металлов давлением и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК, 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

Рыбенко Инна Анатольевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры 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 Джамия 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 тепломассопереноса, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

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

Темлянцева Михаил Викторович, д.т.н., профессор, проректор по учебной работе, 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

Шиплюк Александр Николаевич, член-корреспондент Российской академии наук, д.ф.-м.н., Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, 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., доцент, 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

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

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

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, Head 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

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, Associate Professor, Department of Management and Sectoral Economics, Siberian State Industrial University, Novokunetsk, Russia

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

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

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

Oskolkova Tatyana Nikolaevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Metal Forming and Metal Science. EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

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

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

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

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

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

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

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, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, 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

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

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

Shiblyuk Alexander Nikolaevich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A. Khristianovich Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

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, Associate Professor, Rector, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Ганиев И.Н., Саидов М.М., Файзуллоев У.Н., Амонзода И.Т.** Влияние церия на температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функции алюминиевого сплава $AlCu_{4.5}Mg_1$ 9
- Юлдашев Н.Х., Маматов О.М., Селькин А.В.** Квантово-размерная фотолюминесценция в гетероструктуре $p - CdTe/n - CdS$ с микрокристаллами $CdTe$ 19
- Почетуха В.В., Башенко Л.П., Гостевская А.Н., Будовских Е.А., Громов В.Е., Чапайкин А.С.** Структура и свойства плазменных покрытий из быстрорежущей стали после высокотемпературного отпуска30

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Коршунов С.Ю., Макаров Г.В., Загидулин И.Р., Свинцов М.М.** Управление распределенными системами технологического комплекса 39

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Думова Л.В., Протопопов Е.В., Уманский А.А.** Анализ процессов формирования металлургического качества железнодорожных рельсов из электростали47
- Иванов Ю.Ф., Порфирьев М.А., Громов В.Е., Попова Н.А., Серенков Ю.С., Сиддики А.Н., Шляров В.В.** Механизмы упрочнения рельсовой стали при сжатии ...58
- Баранникова С.А., Надежкин М.В., Колосов С.В., Перовская М.В., Исхакова П.В.** Исследование локализации пластического течения в режиме холодной деформации медно-никелевого сплава72
- Пинаев Е.А., Темлянцев М.В., Симачев А.С., Темлянцева Е.Н., Бессонова О.В.** Исследование высокотемпературной газовой коррозии низколегированного хромокремнистого чугуна в среде анодных газов алюминиевых электролизеров81

CONTENTS

CONDENSED MATTER PHYSICS

- Ganiev I.N., Saidov M.M., Fayzulloev U.N., Amonzoda I.T.** Influence of cerium on temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of aluminum alloy $AlCu_{4.5}Mg_1$ 9
- Yuldashev N.H., Mamatov O.M., Selkin A.V.** Quantum-dimensional photoluminescence in $p - CdTe/n - CdS$ heterostructure with $CdTe$ microcrystals19
- Pochetukha V.V., Baschenko L.P., Gostevskaya A.N., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Chapaikin A.S.** Structure and properties of high-speed steel plasma coatings after high-temperature tempering30

INFORMATION TECHNOLOGY

- Korshunov S.Yu., Makarov G.V., Zagidulin I.R., Svintsov M.M.** Management of distributed systems technological complex39

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

- Dumova L.V., Protopopov E.V., Umansky A.A.** Analysis of the processes of formation of metallurgical quality of railway rails from electric steel47
- Ivanov Yu.F., Porfiriev M.A., Gromov V.E., Popova N.A., Serenkov Yu.S., Siddiquee A.N., Shlyarov V.V.** Mechanisms of hardening of rail steel under compression58
- Barannikova S.A., Nadezhkin M.V., Kolosov S.V., Perovskaya M.V., Iskhakova P.V.** Study of localized plastic flow in in cold deformation mode of copper-nickel alloy72
- Pinaev E.A., Temlyantsev M.V., Simachev A.S., Temlyantseva E.N., Bessonova O.V.** Research of high temperature gas corrosion of low-alloy chrome-silicon cast iron in an environment of anodic gases of aluminum electrolyzers81

Протопопов Е.В., Уманский А.А., Морозов С.И., Шакиров М.К. Математическая модель режимов взаимодействия кислородных струй с расплавом при верхней продувке конвертерной ванны.....87	Protopopov E.V., Umanskii A.A., Morozov S.I., Shakirov M.K. Mathematical model of the modes of interaction of oxygen jets with the melt during upper purging converter bath.....87
---	---

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

Бобошко Д.Ю., Трейстарь Д.М. Теоретические основы формирования экосистемных моделей российских банков.....94
Мирюкова М.А., Соколова В.Ф. Формирование социально-экономической безопасности как системообразующего элемента национальной безопасности.....104
Нагайцев И.А. Оценка источников выбросов парниковых газов на угледобывающих предприятиях.....111

REGIONAL AND SECTORAL ECONOMY

Boboshko D.Y., Treistar' D.M. Theoretical basis for the formation of ecosystem models of russian banks.....94
Miryukova M.A., Sokolova V.F. Formation of socio-economic security as a system-forming element of national security104
Nagaitsev I.A. Assessment of sources of greenhouse gas emissions from coal mining operations.....111

ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ, БИОГРАФИИ

Юрьев А.Б., Савельев А.Н., Коновалов С.В. Научная школа Западной Сибири в области тяжелого технологического оборудования124
Рожихина И.Д. Рецензия на монографию Е.В. Протопопова, М.В. Темлянцев «Современные технологии повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров». – Новосибирск: СО РАН, 2023. – 324 с.141
Якушевич Н.Ф. Рецензия на монографию «Современные технологии повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров» / Е.В. Протопопов, М.В. Темлянцев. – Новосибирск: СО РАН, 2023. – 324 с.142

RESPONSES, REVIEWS, BIOGRAPHIES

Yur'ev A.B., Savel'ev A.N., Konovalov S.V. Scientific school of Western Siberia in the field of heavy technological equipment.....124
Rozhikhina I.D. Review of the monograph by E.V. Protopopov, M.V. Temlyantsev "Modern technologies for increasing the resistance of lining of oxygen converters". – Novosibirsk: SB RAS, 2023. – 324 p.141
Yakushevich N.F. Review of the monograph by "Modern technologies for increasing the resistance of lining of oxygen converters" / E.V. Protopopov, M.V. Temlyantsev. – Novosibirsk: SB RAS, 2023. – 324 p.142

К сведению авторов.....144

For the information of the authors.....144

Оригинальная статья

УДК 669.71

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-9-18

ВЛИЯНИЕ ЦЕРИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ СПЛАВА $\text{AlCu}_{4,5}\text{Mg}_1$

© 2023 г. И. Н. Ганиев¹, М. М. Саидов², У. Н. Файзуллоев³, И. Т. Амонзода⁴

¹Институт химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана (Республика Таджикистан, 734063, Душанбе, ул. Айни, 299/2)

²Республиканский медицинский колледж (Республика Таджикистан, 734063, Душанбе, 38XV+C86)

³Филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» в г. Душанбе (Республика Таджикистан, 734042, Душанбе, ул. Назаршоева, 7)

⁴Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими (Республика Таджикистан, 734042, Душанбе, пр. Академиков Раджабовых, 10)

Аннотация. Применение алюминия и его сплавов как конструкционных материалов обусловлено их стойкостью к коррозии. Алюминиевые сплавы обладают высокой стойкостью к коррозии в атмосферных и морских условиях, в щелочных растворах и растворах кислот с малой плотностью, хорошо обрабатываются резанием. Высокая коррозионная стойкость алюминиевых сплавов в различных средах определяется образованием оксидной пленки, задерживающей коррозионный процесс. Высокая прочность сплавов системы $\text{Al} - \text{Cu} - \text{Mg}$ связана с увеличением искажения кристаллической решетки с повышением содержания меди и магния в твердом растворе. Для повышения коррозионных и механических свойств в алюминиевые сплавы вводят добавки различных металлов. Одной из важнейших характеристик алюминиевых сплавов является теплоемкость. Знание теплоемкости и ее температурной зависимости имеет большое значение в исследованиях сплавов. В настоящей работе проведено изучение температурной зависимости теплофизических свойств и термодинамических функций алюминиевого сплава $\text{AlCu}_{4,5}\text{Mg}_1$ с церием. В работе применяется метод сравнения кривых охлаждения эталонного и исследуемого образцов с использованием алюминиевого эталона (алюминий А5N) в интервале 300 – 800 К. Впервые исследовано влияние добавки церия на теплофизические свойства и изменения термодинамических функций алюминиевого сплава $\text{AlCu}_{4,5}\text{Mg}_1$. Установлены математические модели, которые описывают температурную зависимость теплоемкости сплава от содержания церия и изменение термодинамических функций в указанном температурном диапазоне. С ростом температуры теплоемкость, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается. Полученные характеристики и термодинамические функции алюминиевых сплавов $\text{AlCu}_{4,5}\text{Mg}_1$ с церием пополняют базы данных материалов и могут использоваться при проектировании деталей машин из указанных сплавов.

Ключевые слова: сплав $\text{AlCu}_{4,5}\text{Mg}_1$, церий, удельная теплоемкость, режим охлаждения, коэффициент теплоотдачи, термодинамические функции

Для цитирования: Саидов М.М., Файзуллоев У.Н., Амонзода И.Т. Влияние церия на температурную зависимость теплоемкости и изменения термодинамических функций сплава $\text{AlCu}_{4,5}\text{Mg}_1$ // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 9 – 18. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-9-18](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-9-18)

Original article

INFLUENCE OF CERIUM ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE HEAT CAPACITY AND CHANGES IN THE THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF ALLOY AlCu4.5Mg1

© 2023 I. N. Ganiev¹, M. M. Saidov², U. N. Faizulloev³, I. T. Amonzoda⁴

¹**Institute of Chemistry, in and. Nikitin National Academy of Sciences of Tajikistan** (299/2, st. Aini, Dushanbe, 736043, Republic of Tajikistan)

²**Republican Medical College** (38XV+C86, Dushanbe, 736043, Republic of Tajikistan)

³**Branch of the National Research Technological University "MISiS" in Dushanbe** (7, st. Nazarshoeva, Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan)

⁴**Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi** (10, Akademikov Radzhabov Ave., Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan)

Abstract. Statement of the problem (relevance of the work): The use of aluminum and its alloys as structural materials is due to their resistance to corrosion. Aluminum alloys have high resistance to corrosion in atmospheric and marine conditions, in alkaline and acid solutions, low density, good machinability. In terms of corrosion resistance, these alloys are significantly superior to cast alloys of other aluminum-based systems. The high corrosion resistance of aluminum alloys in various media is determined by the formation of a hydrated film that delays the corrosion process. The high strength of the alloys of this system is associated with an increase in the distortion of the crystal lattice with an increase in the content of copper and magnesium in the solid solution. To improve the corrosion and mechanical properties, additives of various metals are introduced into aluminum alloys. One of the most important characteristics of aluminum alloys is heat capacity. Knowledge of the heat capacity and its temperature dependence plays an important role in the study of alloys. The purpose of the work: to study the temperature dependence of the thermophysical properties and thermodynamic functions of the AlCu4.5Mg1 aluminum alloy with cerium. Methods used: Many methods are known for measuring the heat capacity of a solid. In this work, a method is used to compare the cooling curves of the reference and test samples in the "cooling" mode using an aluminum standard (Al A5N) in the range of 300 – 800 K. 5Mg1. Result: mathematical models have been established that describe the temperature dependence of the heat capacity of the alloy on the cerium content and the change in their thermodynamic functions in the specified temperature range. As a result of the studies carried out, it was shown that with increasing temperature, the heat capacity, enthalpy and entropy of alloys increase, and the value of the Gibbs energy decreases. Practical significance: the obtained characteristics of thermophysical properties and thermodynamic functions of aluminum alloy AlCu4.5Mg1 with cerium fill up the pages of the relevant reference books on the thermophysics of materials and can be used in the design of parts and machines from these alloys.

Keywords: AlCu4.5Mg1 aluminum alloy, cerium, specific heat capacity, "cooling" mode, heat transfer coefficient, thermodynamic functions

For citation: Ganiev I.N., Saidov M.M., Faizulloev U.N., Amonzoda I.T. Influence of cerium on the temperature dependence of heat capacity and changes in the thermodynamic functions of alloy AlCu4.5Mg1. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 9 – 18. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-9-18](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-9-18)

Введение

В настоящее время алюминий и его сплавы по объемам производства и потребления занимают второе место после стали. В последние десятилетия производство алюминия развивается опережающими темпами. Сферы потребления алюминия постоянно расширяются. В ряде областей промышленности он успешно вытесняет традиционно применяемые металлы и сплавы [1, 2].

Одним из мощных стимулов развития технологии плавки и литья алюминиевых сплавов является постоянное повышение требований к качеству материалов авиационного назначения и ряда других материалов. Для освоенных новых высокопрочных литейных и деформируемых сплавов потребовались усовершенствования процессов литья [3 – 5].

Алюминиевые деформируемые сплавы являются основным конструкционным материалом в самолетостроении, а также широко используются и в

других отраслях промышленности. Применение алюминиевых сплавов в строительстве дало возможность архитекторам создавать красивые, легкие, но в то же время очень прочные здания и сооружения. Использование алюминиевых сплавов в судостроении позволило создать новые типы скоростных комфортабельных кораблей. Возрастает применение алюминиевых сплавов на транспорте, в химической и пищевой промышленности, в сельском хозяйстве. Новые области применения сплавов, более совершенные конструкции требуют создания новых высокопрочных, коррозионноустойчивых, хорошо сваривающихся алюминиевых сплавов и усовершенствования технологических процессов их обработки [6 – 8].

Широко применяемые сплавы системы Al – Cu – Mg были разработаны в 1909 г. после открытия А. Вильмом эффекта упрочнения алюминия с добавками меди и магния. Такой сплав после нагрева до 500 °С, охлаждения в воде и выдержки в течение 4 сут при комнатной температуре имел повышенные прочность и твердость, сохраняя относительное удлинение (эффект естественного старения). Упрочнение сплава Al – Cu – Mg (дюралюминов по имени помощника Цепелина-Дюрра) происходит благодаря изменению и искажению кристаллической решетки при образовании дискообразных участков меди, так называемых зон Гинье-Престона [7].

Сплавы системы Al – Cu – Mg (дюралюмины) представляют собой наиболее старую и наиболее важную по своему значению группу сплавов, нашедших широкое применение в различных отраслях машиностроения и особенно в авиации. Наиболее важные сплавы в группе дюралюминов – сплав Д16 и его улучшенные модификации Д16ч и 1163, которые применяются в основном в естественно состаренном состоянии. Эти сплавы характеризуются хорошим сочетанием вязкости разрушения, выносливости, скорости роста усталостной трещины. По прочности и по коррозионной стойкости эти сплавы уступают высокопрочным сплавам системы Al – Zn – Mg – Cu (В95, В95пч, В95оч), однако имеют преимущество перед сплавами типа В95 по выносливости, сопротивлению росту усталостной трещины при одинаковой относительной прочности и уровнях напряжений и плотности. Поэтому сплавы 1163, Д16ч применяются для изготовления деталей с повышенной выносливостью в условиях растягивающих напряжений [7, 9].

Режим старения дюралюминов заключается в выдерживании сплавов после закалки в течение 4 – 5 сут при комнатной температуре (естественное старение) или кратковременной выдержке при нагреве (искусственное старение) [6].

Церий добавляют в литейные сплавы в основном в виде мишметалла (смесь редкоземельных металлов, содержащая 50 – 60 % Се) для повышения жидкотекучести и уменьшения налипания металла на стенки формы [6].

Целью настоящей работы является исследование влияния добавки церия на теплофизические свойства и термодинамические функции алюминиевого сплава AlCu4,5Mg1 типа дюралюминия, так как подобные сведения в литературе отсутствуют.

Материалы и методика исследования

Теплоемкость C_p – это количество теплоты, которое поглощает тело в процессе нагревания на один градус при постоянном давлении. То же самое справедливо и для отвода теплоты в процессе охлаждения. При более точном математическом описании рассматривается количество теплоты δQ_p , поглощенное (или отданное) системой при бесконечно малом изменении температуры dT . Если теплоемкость системы отнести к ее массе m , то получаем удельную теплоемкость C_{p2}^0 , определяемую по формуле

$$C_{p2}^0 = \frac{\delta Q}{mdT}. \quad (1)$$

В представленной формуле δ означает, что теплота является функцией процесса, а d – что температура является функцией состояния системы. Теплоемкость сплавов определяли по формуле

$$C_{p2}^0 = \frac{C_{p1}^0 m_1 \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_1}{m_2 \left(\frac{dT}{d\tau} \right)_2}, \quad (2)$$

где $m_1 = \rho_1 V_1$ – масса эталона; $m_2 = \rho_2 V_2$ – масса исследуемого образца; $\left(\frac{dT}{d\tau} \right)_1$, $\left(\frac{dT}{d\tau} \right)_2$ – скорости охлаждения эталона и изучаемых образцов при данной температуре.

Правомочность использования уравнения (2) для определения теплоемкости показана в работах [10 – 17].

Для определения теплоемкости строят кривые охлаждения исследуемых образцов и эталона (алюминий А5N). Кривая охлаждения представляет собой зависимость температуры образца от времени при охлаждении его в неподвижном воздухе. Алюминиевый сплав AlCu4,5Mg1 с церием получали в шахтной лабораторной печи

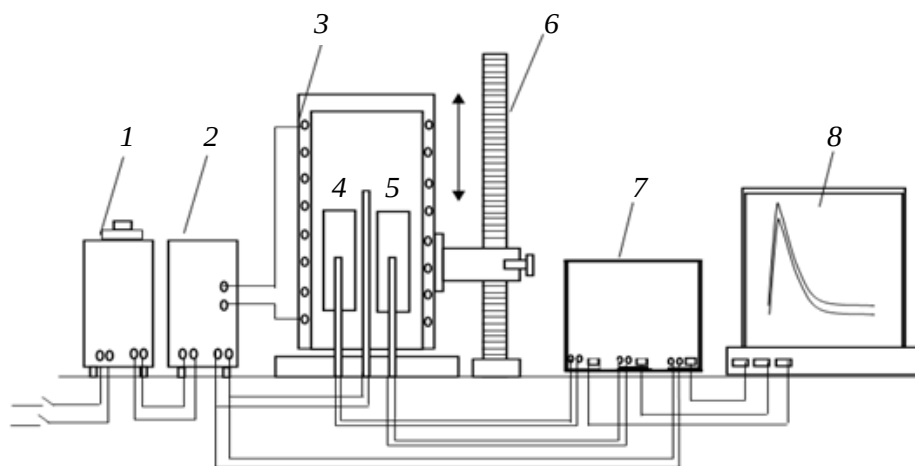


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме «охлаждения»
Fig. 1. Installation for determining the heat capacity of solids in the "cooling" mode

сопротивления типа СШОЛ при температуре 750 – 800 °С. Содержание церия в сплавах варьировали в пределах 0,01 – 1,00 % (по массе). Из полученных сплавов отливали цилиндрические образцы диаметром 16 мм и длиной 30 мм в графитовую изложницу. Содержание основных компонентов сплава определяли в Центральной заводской лаборатории ОАО «ТалКо». Содержание церия в сплавах определяли гравиметрическим методом путем перевода его в оксалат.

Измерение теплоемкости проводилось по методике, описанной в работах [18 – 21] на установке, схема которой представлена на рис. 1. Установка состоит из следующих узлов: электропечь 3 смонтирована на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец 4 и эталон 5 (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндры длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термодатчики 4 и 5. Концы термодатчиков подведены к цифровому многоканальному термометру 7, который подсоединен к компьютеру 8.

Электропечь 3 включается через автотрансформатор 1, с помощью терморегулятора 2 устанавливается нужная температура. По показаниям цифрового многоканального термометра 7 отмечается значение начальной температуры. Измеряемый образец 4 и эталон 5 устанавливаются в электропечь 3 и нагреваются до нужной температуры, проводится контроль температуры по показаниям цифрового многоканального термометра на компьютере 8. Далее измеряемый образец и эталон одновременно вынимаются из электропечи. С этого момента фиксируется снижение температуры. Записываются показания цифровых термометров на компьютере через фиксированное время 10 с. Образец и эталон охлаждаются до температуры ниже 30 °С.

Обработку результатов измерений и построение графиков проводили с помощью программ MS Excel и Sigma Plot. Значения коэффициента корреляции ($R^2 \geq 0,9998$) подтверждают правильность выбора аппроксимирующей функции. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 до 400 °С составляла ± 1 %, а в интервале более 400 °С – $\pm 2,5$ %. Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4 %. В рассматриваемом случае погрешность измерения теплоемкости составляла не более 1,2 %.

Экспериментально полученные временные зависимости температуры образцов описывают уравнения вида

$$T = ae^{-b\tau} + pe^{-k\tau}, \quad (3)$$

где a , b , p , k – постоянные для данного образца; τ – время охлаждения.

Дифференцируя уравнение (3) по времени τ , получаем уравнение для определения скорости охлаждения образцов

$$\frac{dT}{d\tau} = -abe^{-b\tau} - pk^{-k\tau} \quad (4)$$

По этой формуле были вычислены скорости охлаждения эталона (алюминий А5Н) и образцов из алюминиевого сплава AlCu_{4,5}Mg1 с церием.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

По результатам проведенных экспериментов построены зависимости температуры образцов от времени охлаждения (рис. 2, а). Зависимости скорости охлаждения образцов от температуры, вычисленные по формуле (4), представлены на рис. 2, б.

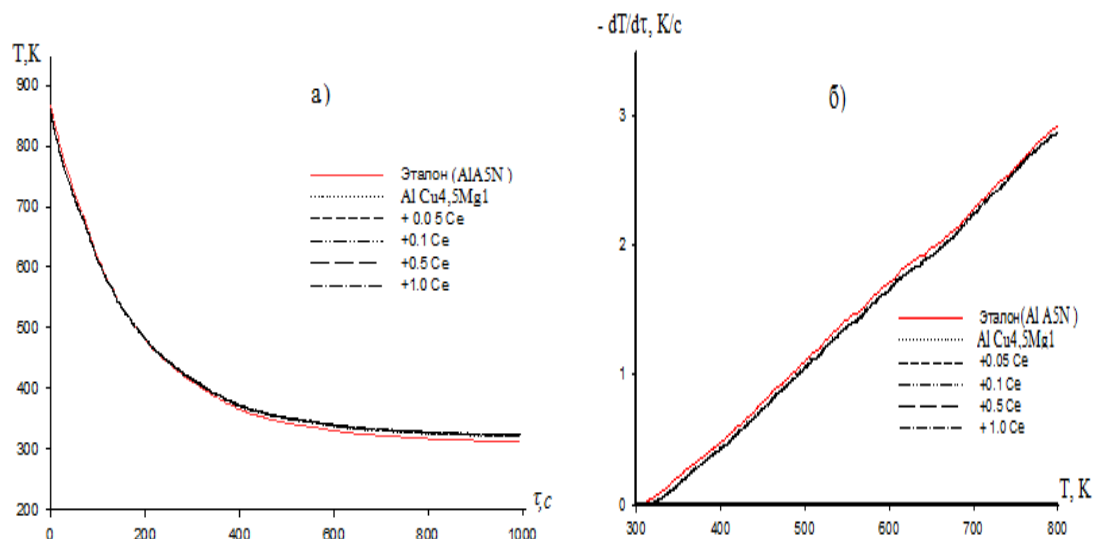


Рис. 2. Зависимости температуры от времени охлаждения (а) и скорости охлаждения от температуры (б) для эталона (алюминий А5N) и образцов из алюминиевого сплава AlCu4,5Mg1 с церием
 Fig. 2. Temperature dependences on the cooling time (a) and the cooling rate on the temperature (б) for the reference (aluminum A5N) and samples of aluminum alloy AlCu4,5Mg1 with cerium

Путем обработки кривых скоростей охлаждения образцов установлены экспериментальные значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнения (4), которые приведены в табл. 1.

Удельную теплоемкость сплавов определяли по уравнению (2) с учетом скоростей охлаждения образцов из исследуемых сплавов. Температурная зависимость теплоемкости сплавов описывается общим уравнением вида

$$C_p^0 = a + bT + cT^2 + dT^3. \quad (5)$$

Значения коэффициентов a, b, c, d в уравнении (5) представлены в табл. 2.

Вычисленные значения C_p^0 для алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием через 100 К представлены в табл. 3 и на рис. 3, а.

По приведенным данным видно, что в исследованном температурном интервале с ростом температуры теплоемкость алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием растет, а с увеличением содержания церия уменьшается. Рассчитанные значения теплоемкости алюминия марки А5N хорошо согласуются с данными, представленными в справочниках [22, 23].

Используя вычисленные данные по теплоемкости алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием и экспериментально полученные значения скорости охлаждения образцов, был рассчитан коэффициент теплоотдачи $\alpha(T)$ для алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 по следующей формуле:

Т а б л и ц а 1

Значения коэффициентов a, b, p, k, ab, pk в уравнении (4) для эталона (алюминий А5N) и алюминиевого сплава Al4,5Cu1Mg с церием

Table 1. The values of the coefficients a, b, p, k, ab, pk in equation (4) for the reference (aluminum A5N) and aluminum alloy Al4,5Cu1MD with cerium

Содержание церия в сплаве, % (по массе)	a, K	$b \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	p, K	$k \cdot 10^{-5}, c^{-1}$	$ab, K \cdot c^{-1}$	$pk \cdot 10^{-3}, K \cdot c^{-1}$
0	517,45	6,13	332,88	4,20	3,17	1,40
0,05	517,45	6,13	333,68	4,19	3,17	1,40
0,10	517,45	6,13	334,68	4,17	3,17	1,40
0,50	517,45	6,13	334,78	4,17	3,17	1,40
1,00	517,45	6,13	335,78	4,16	3,17	1,40
Эталон	540,10	6,12	315,20	5,61	3,30	1,77

Значения коэффициентов a, b, c, d в уравнении (5) для эталона (алюминий А5N) и
алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием

Table 2. The values of the coefficients a, b, c, d in equation (5) for the reference (aluminum A5N) and
aluminum alloy AlSu4.5Mg1 with cerium

Содержание церия в сплаве, % (по массе)	a , Дж/(кг·К)	b , Дж/(кг·К ²)	$c \cdot 10^{-2}$, Дж/(кг·К ³)	$d \cdot 10^{-7}$, Дж/(кг·К ⁴)	Коэффициент корреляции R^2
0	676,60	0,97	1,22	8,69	0,9998
0,05	677,86	0,96	1,21	8,66	0,9998
0,10	679,15	0,95	1,20	8,63	0,9998
0,50	678,31	0,94	1,16	8,36	0,9998
1,00	680,42	0,90	1,11	8,12	0,9998
Эталон	690,34	1,01	1,27	9,13	1,00

$$\alpha = \frac{C_p^0 m \frac{dT}{dT}}{(T - T_0)S}, \quad (6)$$

где S – площадь поверхности образца, м².

Для алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием температурная зависимость коэффициента теплоотдачи представлена на рис. 3, б. Видно, что с ростом температуры коэффициент теплоотдачи увеличивается, а с увеличением содержания церия – уменьшается.

Для расчета изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса по формулам (7) – (9) для алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием были использованы интегралы от удельной теплоемкости по уравнению (5):

$$[H^0(T) - H^0(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (7)$$

$$[S^0(T) - S^0(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (8)$$

$$[G^0(T) - G^0(T_0)] = [H^0(T) - H^0(T_0)] - T[S^0(T) - S^0(T_0)], \quad (9)$$

где $T_0 = 298,15$ К.

Результаты расчета температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием через 100 К представлены в табл. 4.

Энтальпия и энтропия сплавов при увеличении температуры растут, а с ростом содержания церия – уменьшаются. Энергии Гиббса имеет обратную зависимость. Увеличение содержания церия уменьшает энтальпию и энтропию и увеличивает энергию Гиббса сплава AlCu4.5Mg1.

Значения удельной теплоемкости алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием
и эталона (алюминий А5N)

Table 3. Values of specific heat capacity of aluminum alloy AlSu4.5Mg1 with cerium
and reference (aluminum A5N)

Содержание церия в сплаве, % (по массе)	C_p^0 , Дж/(кг·К), при T , К					
	300	400	500	600	700	800
0	881,57	925,42	965,73	1007,70	1056,57	1117,53
0,05	881,26	924,90	965,13	1007,13	1056,12	1117,27
0,10	880,95	924,39	964,53	1006,56	1055,66	1117,01
0,50	878,50	922,22	962,81	1005,30	1054,66	1115,95
1,00	875,45	918,80	959,42	1002,22	1052,04	1113,77
Эталон	903,70	949,58	991,97	1036,35	1088,20	1153,00

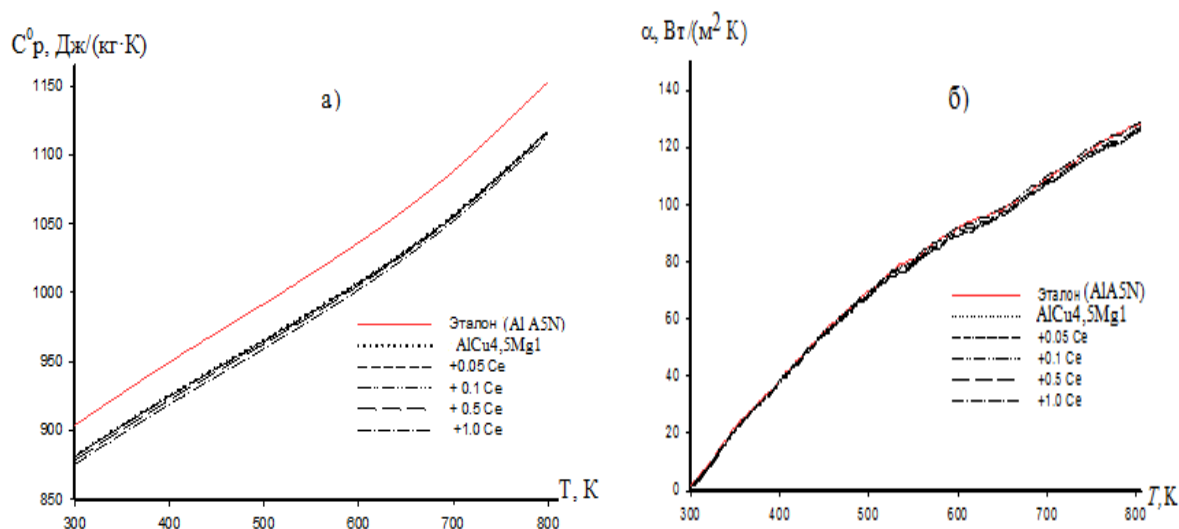


Рис. 3. Температурная зависимость удельной теплоемкости (а) и коэффициента теплоотдачи (б) алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием и эталона (алюминий А5N)

Fig. 3. Temperature dependence of specific heat capacity (a) and heat transfer coefficient (b) of AlCu4.5Mg1 aluminum alloy with cerium and reference (Al A5N)

Выводы

В режиме «охлаждения» исследована температурная зависимость теплоемкости и коэффициента теплоотдачи алюминиевого сплава

AlCu4.5Mg1 с церием. Получены полиномы температурной зависимости теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 с церием. Установ-

Т а б л и ц а 4

Температурная зависимость изменений термодинамических функций алюминиевого сплава Al Cu4.5Mg1 с церием и эталона (алюминий А5N)

Table 4. Temperature dependence of changes in thermodynamic functions of aluminum alloy Al Cu4.5Mg1 with cerium and standard (Al A5N)

Содержание церия в сплаве, % (по массе)	Значение функции при T , К					
	300	400	500	600	700	800
	$[H^0(T) - H^0(T_0^*)]$, кДж/кг					
0	1,630	92,030	186,596	285,232	388,367	496,950
0,05	1,629	91,985	186,492	285,067	388,148	496,692
0,10	1,628	91,945	186,396	284,914	387,945	496,455
0,50	1,624	91,696	185,944	284,303	387,212	495,613
1,00	1,618	91,338	185,206	283,196	385,765	493,861
Эталон	1,670	94,386	191,471	292,848	398,991	510,921
$[S^0(T) - S^0(T_0^*)]$, кДж/(кг·К)						
0	0,0054	0,2652	0,4760	0,6557	0,8146	0,9595
0,05	0,0054	0,2650	0,4758	0,6554	0,8142	0,9590
0,10	0,0054	0,2649	0,4755	0,6550	0,8137	0,9586
0,50	0,0054	0,2642	0,4744	0,6536	0,8122	0,9568
1,00	0,0054	0,2632	0,4725	0,6510	0,8090	0,9533
Эталон	0,0055	0,2719	0,4884	0,6731	0,8366	0,9860
$[G^0(T) - G^0(T_0^*)]$, кДж/кг						
0	-0,005	-14,055	-51,4364	-108,238	-181,902	-270,708
0,05	-0,005	-14,049	-51,4106	-108,181	-181,803	-270,561
0,10	-0,005	-14,043	-51,3872	-108,128	-181,712	-270,425
0,50	-0,005	-14,016	-51,2774	-107,901	-181,347	-269,906
1,00	-0,005	-13,950	-51,0510	-107,436	-180,581	-268,792
Эталон	-0,005	-14,412	-52,7590	-111,054	-186,69	-277,922

лено, что с ростом температуры теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а с увеличением содержания церия – уменьшаются. Энергия Гиббса имеет обратную зависимость. Увеличение содержания церия уменьшает энтальпию и энтропию и увеличивает энергию Гиббса сплава AlCu4.5Mg1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альтман М.Б., Андереев А.Д., Балахонцев Г.А. и др. Плавка и литье алюминиевых сплавов. Москва: Металлургия, 1983. 351 с.
- Нильсен Х., Хуфнагель В., Ганулис Г. Алюминиевые сплавы (свойства, обработка, применение). Москва: Металлургия, 1979. 678 с.
- Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. Самара: Самарский гос. тех. Университет, 2013. 81 с.
- Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология применение). Киев: «КОМИНТЕХ», 2005. 365 с.
- Промышленные алюминиевые сплавы / С.Г. Алиева, М.Б. Альтман, С.М. Амбарцумян и др. Москва: Металлургия, 1984. 527 с.
- Фридляндер И.Н. Высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы. Москва: Оборонгиз, 1960. 291 с.
- Shikun X., Rongxi Y., Zhi G., Xiang X., Chagen H., Xiuyan G. Effects of rare earth Ce on casting properties of Al-4.5Cu Alloy // *Advanced Materials Research*. 2010. Vol. 136. P. 1–4. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.136.1>
- Chaubey A.K., Mohapatra S., Jayasankar K., Pradhan S.K., Satpati B., Sahay S.S., Mishra B.K., Mukherjee P.S. Effect of cerium addition on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy // *Transactions of The Indian Institute of Metals*. 2009. Vol. 62. No. 6. P. 539–543.
- Gröbner J., Mirkovic D., Schmid-Fetzer R. Thermodynamic Aspects of the constitution, grain refining, and solidification enthalpies of Al-Ce-Si alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2004. Vol. 35. P. 33–49.
- Игишева А.Л., Соболева Э.Г. Измерение удельной теплоемкости твердого тела методом монотонного охлаждения. В кн.: Современное состояние и проблемы естественных наук. Сб. трудов 2-й Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Юрга, 4-5 июня 2015 г. Томск: ТПУ, 2015. С. 74–78.
- Киров С.А., Козлов А.В., Салецкий А.М., Харабадзе Д.Э. Измерение теплоемкости и теплоты плавления методом охлаждения. Москва: ООП Физический факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, 2022, 26 с.
- Тарсин А.В., Костерин К.С. Определение теплоемкости металлов методом охлаждения. Лабораторные занятия. Ухта: УГТУ, 2014. 98 с.
- Рогачев Н.М., Гусева С.И. Определение удельной теплоемкости твердых тел. Самара: СГАУ им. С.П. Королёва, 2012. 115 с.
- Бодряков В.Ю. О корреляции температурных зависимостей теплового расширения и теплоемкости вплоть до точки плавления тугоплавкого металла: молибден // *Теплофизика высоких температур*. 2014. Т. 52. № 6. С. 863–868. <https://doi.org/10.7868/S004036441404005X>
- Кокин С.М., Стояхин С.Г., Мухин С.В. Постановка лабораторной работы «Определение удельной теплоемкости металла методом охлаждения». В кн: Сборник научных трудов XXVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Проблемы учебного физического эксперимента». Глазов: ГГПИ им. В.Г. Короленко, 2022. С. 49–51.
- Антонов Е.А., Соболев В.В. Определение удельной теплоемкости металлов методом охлаждения. Ижевск: ИГТУ им. М.Т. Калашникова, 2015. 24 с.
- Ростокин В.И. Исследование зависимости теплоемкости металлов от температуры // *Физическое образование в ВУЗах*. 2011. Т. 17. № 3. С. 54–65.
- Ганиев И.Н., Аминбекова М.С., Окилов Ш.Ш. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцово-сурьмяного сплава CSu_3 , легированного кадмием // *Материаловедение*. 2023. № 1. С. 3–8.
- Ганиев И.Н., Ширинов М.Ч., Олимов Н.С., Иброхимов Н.Ф. Модифицирующее влияние кальция, стронция и бария на температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций алюминиевого сплава АК9 // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2022. № 4. С. 67–78.
- Ганиев И.Н., Шоназаров Р.С., Элмурод А., Файзуллоев У.Н., Ходжаназаров Х.М. Влияние добавок стронция на теплоемкость и термодинамические функции алюминиевого сплава AlCu4.5Mg1 // *Вестник Казанского государственного технического уни-*

верситета им. А.Н. Туполева. 2022. № 3. С. 35–42.

21. Худойбердизода С.У., Ганиев И.Н., Эшов Б.Б., Отаджонов С.Э., Муллоева Н.М. Температурная зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций свинцово-сурьмяного сплава SSu_3 , легированного теллуром // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 4. С. 3–10.
 22. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Москва: Металлургия, 1989. С. 384.
 23. Равдель А.А. Краткий справочник физико-химических величин. Москва: ТИД «АРИС», 2010. 240 с.
- REFERENCES**
1. Altman M.B., Andreev A.D., Balakhontsev G.A., et al. *Smelting and casting of aluminium alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1983, 351 p. (In Russ.).
 2. Nielsen H., Hufnagel V., Ganoulis G. *Aluminum alloys (properties, processing, application)*. Moscow: Metallurgiya, 1979, 678 p. (In Russ.).
 3. Lutz A.R., Suslina A.A. *Aluminum and its alloys*. Samara: CamGTU, 2013, 81 p. (In Russ.).
 4. Beletsky V.M., Krivov G.A. *Aluminum alloys (composition, own, technology application)*. Kiev: «KOMINTEH», 2005. 365 p. (In Russ.).
 5. Aliyeva S.G., Altman M.B., Ambartsumyan S.M., et al. *Industrial aluminum alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1984, 527 p. (In Russ.).
 6. Friedland I.N. *Aluminum alloys. Deformiruyemye splavy*. Moscow: Mashinostroenie, 1964, 408 p. (In Russ.).
 7. Shikun X., Rongxi Y., Zhi G., Xiang X., Chagen H., Xiuyan G. Effects of rare earth Ce on casting properties of Al-4.5Cu Alloy. *Advanced Materials Research*. 2010, vol. 136, pp. 1–4. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.136.1>
 8. Chaubey A.K., Mohapatra S., Jayasankar K., Pradhan S.K., Satpati B., Sahay S.S., Mishra B.K, Mukherjee P.S. Effect of cerium addition on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2009, vol. 62, no. 6, pp. 539–543.
 9. Gröbner J., Mirkovic D., Schmid-Fetzer R. Thermodynamic aspects of the constitution, grain refining, and solidification enthalpies of Al–Ce–Si alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2004, vol. 35, pp. 33–49.
 10. Igisheva A.L., Soboleva E.G. *Measurement of specific heat capacity of a solid by monotonous cooling*. In book: *Modern state and problems of natural sciences*. Tomsk: TPU, 2015, pp. 74–78. (In Russ.).
 11. Kirov S.A., Kozlov A.V., Saletsky A.M., Kharabadze D.E. *Measurement of heat capacity and heat of melting by cooling*. Moscow: OOP Fizicheskij fakul'teta MGU im. M.V. Lomonosova, 2022, 26 p. (In Russ.).
 12. Tarsin A.V., Kosterin K.S. *Determination of the heat capacity of metals by cooling. Laboratory classes*. Uhta: UGTU, 2014, 98 p. (In Russ.).
 13. Rogachev N.M., Guseva S.I. *Determination of specific heat capacity of solid bodies*. Samara: SGAU im. S.P. Korolyova, 2012, 115 p. (In Russ.).
 14. Bodryakov Yu.V. On correlation of temperature dependencies of thermal expansion and heat capacity up to melting point of refractory metal: molybdenum. *Teplofizika vysokih temperatur*. 2014, vol. 52, no. 6, pp. 863–868. <https://doi.org/10.7868/S004036441404005X>. (In Russ.).
 15. Kokin S.M., Stoyukhin S.G., Mukhin S.V. *Production of laboratory work "Determination of specific heat capacity of metal by cooling."* In: *Collection of scientific works of the XXVII All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation "Problems of educational physical experiment."* Glazov. 2022, pp. 49–51. (In Russ.).
 16. Antonov E.A., Sobolev V.V. *Determination of specific heat capacity of metals by cooling*. Izhevsk, 2015, 24 p. (In Russ.).
 17. Rostokin V.I. Study of the dependence of the heat capacity of metals on temperature. *Fizicheskoe obrazovanie v VUZah*. 2011, vol. 17, no. 3, 54–65 p. (In Russ.).
 18. Ganiev I.N., Aminbekova M.S., Okilov Sh.Sh. Temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of lead-antimony alloy SSu_3 doped with cadmium. *Materialovedenie*. 2023, no. 1, pp.3–8. (In Russ.).
 19. Ganiev I.N., Shirinov M.Ch., Olimov N.S., Ib-rokhimov N.F. Modificiruyemye influence of calcium, strontium and barium on temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of aluminum alloy AK9. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2022, no. 4, pp. 67–78. (In Russ.).
 20. Ganiev I.N., Shonazarov R.S., Elmurod A, Fayzullov U.N., Khojanazarov H.M. Influence of strontium additives on heat capacity and thermodynamic functions of aluminum alloy Al-Cu4.5Mg1. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im A.N. Tupoleva*. 2022, no.3, pp. 35–42. (In Russ.).
 21. Khudoiberdizoda S.U., Ganiev I.N., Eshov B.B., Otadzhonov S.E., Mulloeva N.M. Tem-

perature dependence of heat capacity and changes in the thermodynamic functions of the lead-antimony alloy of CCy3 doped with tellurium. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 4, pp. 3–10. (In Russ.).

22. Zinoviev V.E. Thermophysical properties of metals at high temperatures. Moscow: Metallurgiya, 1989, pp. 384. (In Russ.).

23. Rawdel A.A. *Brief reference book of physical and chemical quantities*. Moscow: TID «ARIS», 2010, 240 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Изатулло Наврузович Ганиев, академик НАНТ, д.х.н., профессор, заведующий лабораторией, Институт химии В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана

E-mail: ganiev48@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2791-6508

Мунаваршо Мирзоалиевич Саидов, ассистент кафедры естественных наук и математики, Республиканский медицинский колледж

E-mail: saidov.m96@mail.ru

ORCID: 0009-0002-9231-6231

Убайдулло Нарзуллоевич Файзуллоев, к.т.н., старший преподаватель, Филиал Национального исследовательского технологического университета (НИТУ) «МИСиС»

Илхом Темур Амазонда, д.т.н., доцент кафедры технологии машиностроения, металлорежущих

станков и инструментов, Таджикский технический университет им. М.С. Осими

Information about the authors

Izatullo N. Ganiev, Academician at NAST, Dr. Sci. (Chemical), professor, head of the laboratory, V.I. Nikitin Institute of Chemistry of the National Academy of Sciences of Tajikistan

E-mail: ganiev48@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2791-6508

Munavarsho Saidov, Assistant of the Department of Natural Sciences and Mathematics, Republican Medical College

E-mail: saidov.m96@mail.ru

ORCID: 0009-0002-9231-6231

Ubaidullo N. Fayzulloev, Ph.D., Art. Lecturer, Branch of the National Research Technological University (NUST) "MISIS"

Ilhom T. Amazonda, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Engineering technology, metal cutting machines and tools, Tajik Technical University named after M.S. Osimi

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 12.04.2023

После доработки 20.06.2023

Принята к публикации 27.06.2023

Received 12.04.2023

Revised 20.06.2023

Accepted 27.06.2023

Оригинальная статья

УДК 538.958:975

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-19-29

**КВАНТОВО-РАЗМЕРНАЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ
 p -CdTe/ n -CdS С МИКРОКРИСТАЛЛАМИ CdTe**

© 2023 г. Н. Х. Юлдашев¹, О. М. Маматов¹, А. В. Селькин²

¹Ферганский политехнический институт (Республика Узбекистан, 150107, Фергана, ул. Фергана, 86)

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (Россия, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26)

Аннотация. Исследован новый механизм формирования прикраевой фотолюминесценции, обусловленной наличием тонкого поликристаллического слоя CdTe в пленочной гетероструктуре p -CdTe/ n -CdS. Рассмотрена возможность регистрации низкоразмерных эффектов в микрокристаллах, линейный размер которых порядка микрона. Обнаружен эффект, заключающийся в возникновении в низкотемпературных спектрах фотолюминесценции микрокристаллов CdTe доминирующей узкой «супергорячей» полосы излучения из области спектра, расположенной по энергии выше фундаментального края собственного поглощения объемного материала. Развита теоретическая модель, согласно которой аномальная полоса излучения возникает в результате оптических переходов электронов с приповерхностных уровней пространственного квантования в состояния валентной зоны. Показано, что дополнительная подсветка гетероструктуры со стороны прозрачной подложки светом из спектральной области собственного поглощения CdS приводит к тушению аномальной коротковолновой полосы излучения и одновременному возгоранию экситон-поляритонной люминесценции CdTe. Такой эффект находит естественное объяснение, если принять во внимание индуцированную подсветкой генерацию дополнительных носителей заряда, которые компенсируют положительный заряд поверхности микрокристалла и отрицательный объемный заряд акцепторов. В дальнейшем исследования спектров люминесценции пленочных гетероструктур p -CdTe/ n -CdS с прозрачными омическими контактами представляют интерес, прежде всего, с прикладной точки зрения с целью создания на их основе новых пленочных солнечных элементов. Такие исследования должны включать в себя более тщательный анализ зависимостей от размера микрокристаллов, толщины слоев CdS и CdTe, метода легирования, температуры, а также спектрального состава и интенсивности освещения. Необходимо разработать метод теоретического расчета спектра супергорячего излучения в условиях приповерхностной квантово-размерной рекомбинации фотоносителей с учетом механизмов слабой локализации фотоэлектронов и кулоновского взаимодействия их со свободными фотодырками валентной зоны.

Ключевые слова: фотолюминесценция, микрокристаллы CdTe, пленочная гетероструктура p -CdTe/ n -CdS, треугольная потенциальная яма, квантово-размерный эффект, экситон-поляритон

Для цитирования: Юлдашев Н.Х., Маматов О.М., Селькин А.В. Квантово-размерная фотолюминесценция в гетероструктуре p -CdTe/ n -CdS с микрокристаллами CdTe // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 19 – 29. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-19-29](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-19-29)

Original article

**QUANTUM-DIMENSIONAL PHOTOLUMINESCENCE IN THE p -CdTe/ n -CdS
HETEROSTRUCTURE WITH CdTe MICROCRYSTALS**

© 2023 N. Kh. Yuldashev¹, O. M. Mamatov¹, A. V. Sel'kin²

¹Fergana Polytechnic Institute (86, Fergana str., Fergana, 150107, Republic of Uzbekistan)

²The Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences (26, Polytechnical str., Saint-Petersburg, 194021, Russian Federation)

Abstract. A new mechanism for the formation of near-edge photoluminescence due to the presence of a thin polycrystalline CdTe layer in a p -CdTe/ n -CdS film heterostructure has been studied. The possibility of detecting low-dimensional effects in microcrystals of the linear size being on the order of one micron is considered. The effect has been found that shows the appearance in the low-temperature photoluminescence spectra of CdTe microcrystals of a dominant narrow "superhot" emission band which is located in energy above the fundamental edge of the intrinsic absorption of the bulk material. A theoretical model is developed according to which an anomalous emission band arises as a result of optical transitions of electrons from near-surface levels of spatial quantization to states of the valence band. It is shown that additional illumination of the heterostructure from the side of the transparent substrate with light from the CdS intrinsic absorption spectral region leads to quenching of the anomalous short-wavelength emission band and simultaneous "ignition" of the CdTe exciton-polariton luminescence. This effect finds a natural explanation if we take into account the illumination-induced generation of additional charge carriers, which compensate for the positive charge of the microcrystal surface and the negative space charge of acceptors. In the future, studies of the luminescence spectra of p -CdTe/ n -CdS film heterostructures with transparent ohmic contacts are of interest, first of all, from the applied point of view in order to create new film solar cells on their basis. Such studies should include a more thorough analysis of the dependences on the size of microcrystals, the thickness of the CdS and CdTe layers, the doping method, temperature, the spectral composition of illumination, and its intensity, as well. It is necessary to develop a method for the theoretical calculation of the spectrum of superhot radiation under conditions of near-surface quantum-well recombination of photoelectrons taking into account their Coulomb interaction with free photoholes, which can be considered rigorously only in the framework of many-particle problem.

Keywords: photoluminescence, CdTe microcrystals, p -CdTe/ n -CdS film heterostructure, triangular potential well, quantum-dimensional effect, exciton-polariton

For citation: Yuldashev N.Kh., Mamatov O.M., Sel'kin A.V. Quantum-dimensional photo-luminescence in the p -CdTe/ n -CdS heterostructure with CdTe microcrystals. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 19 – 29. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-19-29](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-19-29)

Введение

В последнее время резко возрос интерес к солнечным элементам из тонкопленочных гетероструктур p -CdTe/ n -CdS с основным поглощающим слоем CdTe, который обладает специфическими свойствами фотонных кристаллов, обусловленными присутствием микрокристаллов. Вопросы формирования фотолюминесценции (ФЛ) таких пленок исследованы недостаточно. Ранее было показано [1], что в отличие от монокристаллов [2], крупноблочных поликристаллов [3] и одиночных микрокристаллов [4, 5] в спектрах ФЛ мелкозернистых (с характерными размерами зерна $d_{cr} \leq 10^{-6}$ м) пленок не проявляются каналы излучения экситонов и донорно-акцепторных пар.

Целью настоящей работы является изучение новых механизмов формирования спектров ближней краевой ФЛ, которые проявляются в тонком поликристаллическом слое CdTe пленочной гетероструктуры p -CdTe/ n -CdS. Рассматривается возможность проявления низкоразмерных эффектов в микрокристаллах, линейный размер которых порядка микрона, что существенно превышает характерное значение боровского радиуса экситона a_{ex} . Обнаруженный эффект заключается в регистрации в спектрах низкотемпературной ФЛ микрокристаллов CdTe доминирующей узкой «супергорячей» полосы излучения из спектральной области, расположенной по энергии выше фундаментального края собственного поглоще-

ния объемного материала. Развита теоретическая модель, в основе которой допускается существование внутри микрокристалла слоя пространственного заряда, приводящего к формированию вблизи поверхности треугольной потенциальной ямы для электрона. Аномальная полоса излучения возникает в результате оптических переходов электронов с приповерхностных уровней пространственного квантования в квазинепрерывные состояния валентной зоны.

Объекты исследования и экспериментальные результаты

Исследуемая тонкопленочная гетероструктура p -CdTe/ n -CdS была изготовлена методом термического испарения в вакууме на прозрачной стеклянной подложке в едином технологическом цикле [6]. Нижний фоторезистивный слой CdS толщиной 0,2 – 0,4 мкм обладал электронной проводимостью и под действием освещения ртутной лампой ($I_{Hg} \approx 10^4$ лх) его сопротивление падало на 2 – 3 порядка. Верхний активно поглощающий слой p -CdTe толщиной $h \sim 0,5 \div 0,8$ мкм выращивался со скоростью осаждения 1,5 – 2,0 Å/с при температуре подложки $T = 523 \div 623$ К и имел зернистую структуру с размерами кристаллических зерен кубической модификации $d_{cr} \sim 0,8 \div 1,0$ мкм.

Спектры ФЛ регистрировались в режиме счета фотонов на установке, собранной на базе спектрометра ДФС-24. Гетероструктура p -CdTe/ n -CdS погружалась непосредственно

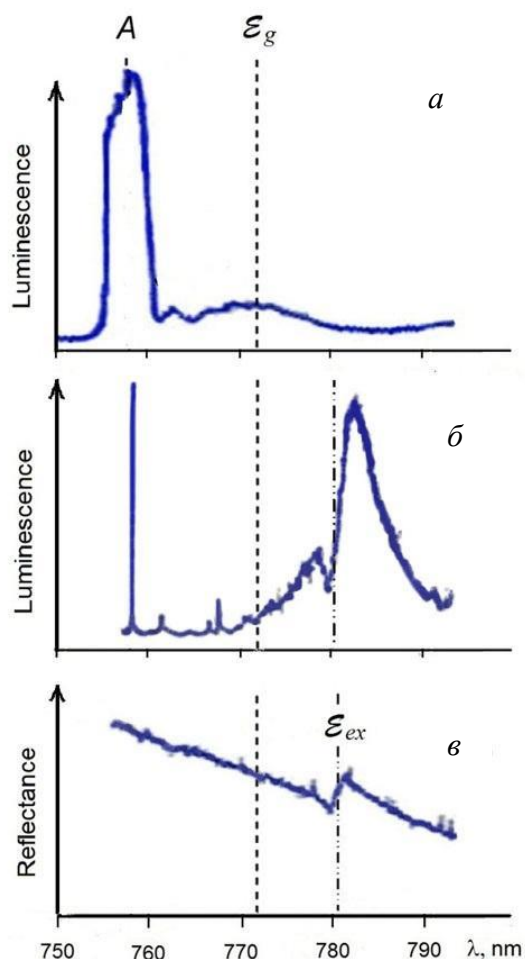


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции гетероструктуры $p\text{-CdTe}/n\text{-CdS}$ ($T = 2\text{ K}$) при фронтальном возбуждении слоя CdTe светом Ar^+ -лазера на длине волны $\lambda = 476,5\text{ nm}$ без дополнительной подсветки (а), с одновременной подсветкой со стороны подложки светом лампы накаливания из спектральной области собственного поглощения CdS (б) и спектр зеркального отражения света от той же структуры со стороны слоя CdTe (в)

Fig. 1. Photoluminescence spectra of the $p\text{-CdTe}/n\text{-CDs}$ heterostructure ($T = 2\text{ K}$) under frontal excitation of the CdTe layer by Ar^+ laser light at a wavelength $\lambda = 476.5\text{ nm}$ without additional illumination (a), with simultaneous illumination from the substrate by incandescent light from the spectral region of the CDs self-absorption (b) and the spectrum specular reflection of light from the same structure from the side of the CdTe layer (c)

в откачиваемый жидкий гелий при температуре примерно 2 K. Возбуждение люминесценции слоя CdTe осуществлялось на длине волны $\lambda = 476,5\text{ nm}$ светом Ar^+ -лазера, сфокусированным на поверхность слоя CdTe в пятно размерами $\sim 0,4 \times 4,0\text{ mm}$ при мощности светового потока $\sim 7\text{ мВт}$. Фотовозбуждение и регистрация спектров излучения осуществлялись в направлениях, близких к нормали относительно излучающей поверхности гетероструктуры.

На рис. 1, а представлен спектр ФЛ при фронтальном возбуждении слоя CdTe в гетероструктуре $p\text{-CdTe}/n\text{-CdS}$. В спектре присутствует интенсивная и доминирующая А-полоса из-

лучения (энергия фотона $\varepsilon_A = 1,6380\text{ эВ}$; $\lambda_A = 757,0\text{ nm}$), расположенная по энергии заметно выше известного [7] положения фотона $\varepsilon_g = 1,6065\text{ эВ}$ коротковолнового края запрещенной зоны в кристалле CdTe. Уменьшение интенсивности света, возбуждающего ФЛ со стороны наружной поверхности пленки CdTe, сопровождается уменьшением интенсивности излучения в исследуемом спектральном интервале, но не приводит к заметному изменению общего вида спектра.

Однако оказалось, что при дополнительной подсветке гетероструктуры со стороны прозрачной стеклянной подложки светом ртутной лампы из спектральной области собственного поглощения CdS происходит кардинальное изменение характера спектра ФЛ (рис. 1, б). Интенсивность полосы А резко падает с одновременным ее спектральным сужением, а в длинноволновой части спектра в области энергии фотона $\varepsilon < \varepsilon_g$ возгорается дублетная полоса излучения в области 775 – 790 nm. Как видно из сравнения со спектром зеркального отражения (рис. 1, в), провал в дублетной полосе излучения формируется в области длин волн, где контур коэффициента отражения демонстрирует резкую дисперсионную зависимость, характерную для оптических резонансов с возбуждением свободных экситонов.

Теоретическая модель и обсуждение результатов

При построении теоретической модели, объясняющей причины возникновения наблюдаемого «супергорячего» излучения (рис. 1, а), следует обратить внимание на то, что исследованная структура включает в себя фактически монослой близко расположенных частиц в виде микрокристаллов CdTe; при этом каждый микрокристалл обладает характерным поперечным размером порядка 1 мкм. Поэтому речь может идти о некотором размерном эффекте в излучении света каждой частицей. Однако, учитывая относительно большой средний диаметр микрокристаллов, входящих в состав структуры, возможный размерный эффект не является аналогом того, что типично для образований в виде квазиульмерных структур [5, 8, 9].

Вместе с тем хорошо известно [10], что специфические квантовые эффекты могут проявляться при определенных условиях в электрических свойствах планарных полупроводниковых систем, когда возникают поверхностные каналы при квантовании в них энергии носителей заряда. Основная причина возникновения таких каналов обусловлена существованием области пространственного заряда (ОПЗ), в пределах

которой (за счет нескомпенсированного объемного и поверхностного зарядов примесей) происходит искривление зон (проводимости и валентной), формирующих приповерхностную потенциальную яму для носителей заряда определенного знака. В этой связи представляет интерес проанализировать возможный механизм излучения света, ответственный за формирование спектра (рис. 1, а) и учитывающий особенности квантования энергии носителя в приповерхностной квантовой яме.

А. Теоретическая модель

Обратимся к упрощенной модели частицы микрокристалла, входящей в состав монослоя исследованной структуры. Будем рассматривать такую частицу как микрокристаллическую сферу радиуса R (рис. 2). Диаметр $2R$ сферы сопоставим с характерным средним линейным размером микрокристаллических частиц, образующих монослой. Поскольку речь идет о полупроводниковом материале CdTe p -типа, можно допустить, что внутри сферы существует отрицательно заряженная ОПЗ $r_0 \leq r \leq R$, плотность заряда в которой определяется средней избыточной концентрацией $N_A - N_D$ акцепторной примеси по отношению к донорной

$$\rho_q = -e(N_A - N_D), \quad (1)$$

где e – абсолютное значение заряда электрона.

На поверхности сферы $r = R$ локализованы центры захвата положительно заряженных дырок с поверхностной плотностью N_s , полный заряд которых компенсирует объемный заряд микрокристаллической сферы. Центральная сферическая область $0 \leq r < r_0$ электрически нейтральна (избыточные акцепторы в этой области находятся в электрически нейтральном состоянии).

В приближении модели барьера Шоттки с учетом сферической симметрии задачи нетрудно получить выражения для энергетических зон (зоны проводимости ε_c и валентной зоны ε_v) в виде зависимостей от радиуса r :

$$\varepsilon_c(r) = \frac{2\pi e \rho_q}{3\varepsilon_{st}} r^2 \left(1 - 3 \frac{r_0^2}{r^2} + 2 \frac{r_0^3}{r^3} \right); \quad r_0 \leq r \leq R, \quad (2)$$

где ε_{st} – статическая диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Выражение (2) подразумевает нормировку электростатического потенциала $\varphi(r) = -\varepsilon_c(r)/e$, при которой $\varepsilon_c(r) = 0$ в интервале $0 \leq r \leq r_0$. Это выражение показывает, что в пределах микро-

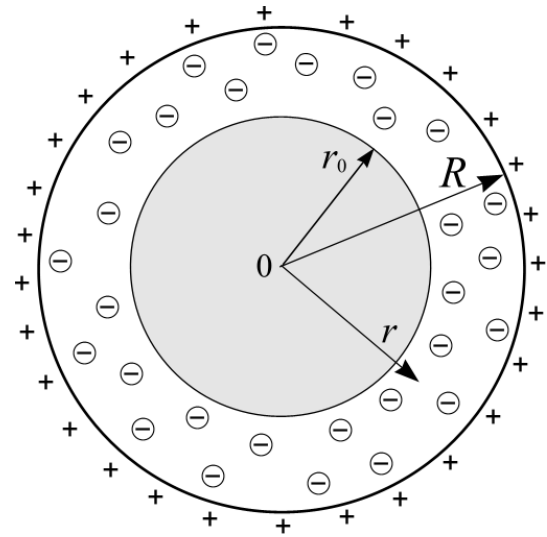


Рис. 2. Сферическая модель микрокристаллической частицы p - CdTe . Состояния на поверхности (сфера радиуса R) заняты положительно заряженными дырками. Слой заряжен отрицательно. Центральная сферическая область, электрически нейтральна

Fig. 2. Spherical model of microcrystalline particle p - CdTe . The states on the surface (a sphere of radius R) are occupied by positively charged holes. The layer is negatively charged. Central spherical area is electrically neutral

кристаллической сферы в направлении от ее центра к поверхности имеет место изгиб зон вниз по энергии, то есть создается приповерхностная потенциальная яма для электрона глубиной $|\varepsilon_c(R)|$.

Соответствующая зависимости (2) напряженность $E(r)$ встроенного электрического поля в микросфере определяется формулой:

$$E(r) = \frac{1}{e} \frac{d\varepsilon_c}{dr} = \frac{4\pi \rho_q}{3\varepsilon_{st}} r \left(1 - \frac{r_0^3}{r^3} \right), \quad (3)$$

в которой следует полагать $E(r) = 0$ при $0 \leq r < r_0$. В соответствии с отрицательным знаком ρ_q (см. уравнение (1)) вектор напряженности поля направлен к центру сферы.

Непосредственно вблизи поверхности $r = R$ на расстояниях от нее l_{QW} , сравнимых с дебройлевской длиной волны электрона, могут проявляться эффекты размерного квантования. Такого рода эффекты достаточно подробно рассматривались ранее [10] при описании явлений переноса носителей заряда вблизи плоских поверхностей полупроводников. Наиболее существенные результаты получены на основе моделирования поверхностного потенциала в форме треугольной потенциальной ямы.

При анализе экспериментальных данных можно воспользоваться основными соотношениями, следующими из известных расчетов [10, 11] для одномерной треугольной потенциальной

ямы, если $l_{QW} \ll R$. Последнее неравенство должно достаточно хорошо выполняться для нижайших энергетических состояний треугольной квантовой ямы с учетом того, что в исследованных структурах $R \approx 500$ нм.

Согласно [10] значение энергии ε_n^{QW} квантового состояния n находится с достаточно высокой точностью по формуле типа

$$\varepsilon_n^{QW} = \left[\frac{3\pi\hbar e E_s}{2\sqrt{2m_*}} \left(n + \frac{3}{4} \right) \right]^{2/3}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

где E_s – напряженность электрического поля непосредственно на поверхности; m_* – эффективная масса носителя заряда.

В рамках обсуждаемой модели $E_s = |E(R)|$ (см. зависимость (3)), если речь идет о нижайшем энергетическом состоянии ε_0^{QW} , то из формул (2) – (4) следует, что

$$|\rho_q| = \frac{1}{3\pi^2} \frac{e\varepsilon_{st}\sqrt{m_*/m_0}}{Ra_B^2(1-r_0^3/R^3)} \left(\frac{\varepsilon_0^{QW}}{G_{Ry}} \right)^{3/2}, \quad (5)$$

где m_0 – масса свободного электрона; a_B – боровский радиус атома водорода; G_{Ry} – ридберговская энергия связи электрона в атоме водорода.

Аппроксимация $\varepsilon_c(r)$ треугольной потенциальной ямой $V(r)$ подразумевает равенство в точке

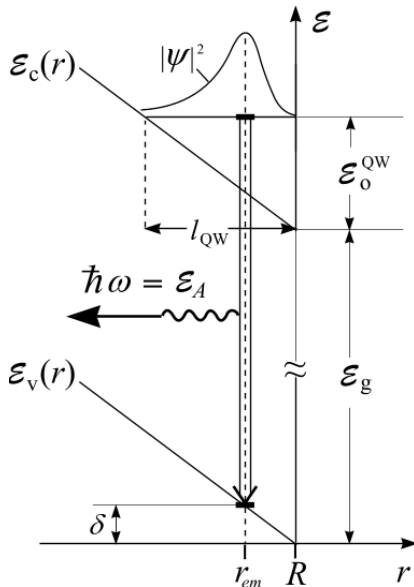


Рис. 3. Схема оптического перехода, формирующего пик излучения А с энергией излучаемого фотона ε_A

Fig. 3. Scheme of the optical transition forming the peak of radiation A with the energy of the emitted photon ε_A

$r = R$ как самих функций ε_c и V , так и их первых производных ε_c' и V' , что дает

$$V(r) = \varepsilon_c(R) + (R-r) \frac{4e^2}{9\pi a_B^2} \sqrt{\frac{m_*}{m_0}} \left(\frac{\varepsilon_0^{QW}}{G_{Ry}} \right)^{3/2}. \quad (6)$$

На рис. 3 изображена схема оптического перехода, формирующего пик излучения А (энергия фотона ε_A). Вблизи поверхности микросферы зависимость $\varepsilon_c(r)$ близка к линейной и может быть аппроксимирована треугольным потенциалом (6). Валентная зона $\varepsilon_v(r)$ повторяет зависимость $\varepsilon_c(r)$ со сдвигом вниз на энергию ширины запрещенной зоны ε_g . В соответствии с выражением (4) треугольная яма содержит нижайший энергетический уровень размерного квантования $n = 0$, смещенный вверх относительно дна ямы на энергию ε_0^{QW} . Под действием внешнего фото-возбуждения носителей и по мере их релаксации по энергии и импульсу с возбуждением колебаний решетки происходит заселение электронного состояния ε_0^{QW} . Последующий излучательный переход электрона в валентную зону осуществляется с испусканием фотона с энергией $\hbar\omega = \varepsilon_A$ (рис. 3). При этом максимум вероятности перехода приходится на ту точку в пространстве $r = r_{em}$, где модуль волновой функции $|\Psi(r)|^2$ электрона в состоянии $n = 0$ принимает максимальное значение (в случае бесконечно высокой стенки со стороны окружающей сферу среды волновая функция должна содержать узел непосредственно на поверхности $r = R$). Таким образом, максимум интенсивности люминесценции должен наблюдаться при энергии излучаемого фотона

$$\varepsilon_A = \varepsilon_g + \varepsilon_0^{QW} - \delta, \quad (7)$$

где величина смещения δ определяется положением точки r_{em} .

Таким образом, по спектральному положению наблюдаемой линии А в рамках приближения треугольной приповерхностной потенциальной ямы можно найти значения принципиальных параметров ε_0^{QW} , E_s , l_{QW} и N_s , характеризующих эту яму (см. приложение). Заметим, что при нахождении этих значений радиус электронной нейтральности r_0 ($0 \leq r_0 < R - l_{QW}$) никак не фигурировал. Однако, как видно из формул (1), (2) и (5), параметр r_0 непосредственно связан с величиной загиба зон $\varepsilon_c(R)$ и концентрацией избы-

точных акцепторов $N_A - N_D$. В частности, при $r_0 = 0$ (условие отсутствия области электро-нейтральности) имеем минимально возможную концентрацию $|N_A - N_D|_{r_0=0} = 1,6 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и максимально возможный загиб зон $|\varepsilon_c(R)|_{r_0=0} = 1,1 \text{ эВ}$.

Из рис. 1, а видно, что линия излучения А уширена и ее полуширина составляет $\varepsilon\Delta_A \approx 1,3 \text{ мэВ}$. Регистрируемая ширина линии А, скорее всего, является следствием неоднородного уширения. Действительно, при более строгом рассмотрении излучения из поверхностной области микрокристалла следует принимать во внимание, что на самом деле люминесценция формируется разными локально-планарными элементами поверхности, вообще говоря, с несколько различающимися по величине энергиями квантования ε_0^{QW} . Линейный размер такого элемента в направлении вдоль поверхности должен составлять величину порядка длины свободного пробега электрона.

Б. Спектры ФЛ микрокристаллического слоя CdTe в условиях дополнительной подсветки

Весьма интересный и важный с точки зрения возможных практических применений эффект связан с обнаруженным влиянием на спектр ФЛ структуры дополнительной подсветки со стороны прозрачной подложки (рис. 1, б). С одной стороны, в результате такой подсветки происходит практически исчезновение полосы А «горячей» люминесценции ($\varepsilon_A > \varepsilon_g$). С другой стороны, наблюдается возгорание дублетной полосы люминесценции в спектральной области $\varepsilon < \varepsilon_g$, где в достаточно совершенных объемных кристаллах CdTe регистрируется нижайшее экситонное состояние с энергией $\varepsilon_{ex} \approx 1,5955 \text{ эВ}$ [12].

То, что полоса ФЛ, появляющаяся под влиянием подсветки в спектральном интервале $\sim 775 - 790 \text{ нм}$, имеет прямое отношение к свободным экситонам, подтверждается сопоставлением спектра ФЛ (рис. 1, б) со спектром зеркального отражения света (рис. 1, в), полученным от внешней поверхности пленки CdTe. Как видно из рис. 1, б, в, провал в дублетной полосе излучения формируется в области длин волн, где контур коэффициента отражения демонстрирует резкую дисперсионную зависимость. Дублетная форма спектра ФЛ и ее расположение относительно контура отражения света говорят о том, что наблюдается люминесценция экситонных поляритонов [13, 14].

Индукцированное подсветкой возгорание поляритонной люминесценции можно объяснить следующим образом. Дело в том, что при тыловой (со стороны стеклянной подложки) подсвет-

ке слоя $n\text{-CdS}$ светом с энергией фотонов $\hbar\omega > \varepsilon_{g(\text{CdS})}$ (где $\varepsilon_{g(\text{CdS})}$ - ширина запрещенной зоны CdS) увеличивается собственная фотопроводимость этого слоя и сопротивление $n\text{-CdS}$ оказывается меньше сопротивления фотовольтаического слоя $p\text{-CdTe}$. Дополнительные фотогенерируемые электроны и дырки компенсируют, соответственно, поверхностный положительный заряд микрокристалла и отрицательный объемный заряд избыточных акцепторов. В результате загиб зон в ОПЗ уменьшается, что должно приводить к исчезновению приповерхностной потенциальной ямы, локализующей электрон, и, как следствие, к исчезновению линии А.

С другой стороны, с уменьшением загиба зон падает напряженность E внутреннего (встроенного) электрического поля, которое определяет время жизни экситона [15, 16]. В условиях дополнительного освещения встроенное электрическое поле становится настолько слабым, что экситонное состояние существует, обладая относительно большим временем жизни. В результате в области ε_{ex} формируется полоса ФЛ, связанная с излучением экситонных поляритонов.

При достаточно высоких напряженностях имеет место полная ионизация экситонного состояния: речь идет о значениях E порядка $10^4 - 10^5 \text{ В/см}$. Это как раз те поля, которые действуют на экситон в слое CdTe, когда подсветка не включена. Поэтому ФЛ в области ε_{ex} в отсутствие подсветки не наблюдается. В таком случае встроенное электрическое поле, разрушающее экситон, должно занимать достаточно большой объем, что соответствует ограничению $(r_0/R)^3 \ll 1$ для максимального значения r_0 . Последнее неравенство неплохо работает, если считать, что $(r_0/R) < 0,5$. Тогда для микрокристаллов, входящих в исследованную структуру, возможные значения концентрации избыточных акцепторов и полного загиба зон должны находиться в пределах $(1,6 \div 1,8) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $(0,64 - 1,1) \text{ эВ}$ соответственно.

В связи с обсуждением эффекта подсветки следует отметить, что реальные условия, при которых такой эффект проявляется, недостаточно точно соответствуют рассмотренной выше простейшей сферической модели микрокристалла. Сферическая модель позволяет выделить, прежде всего, принципиальную причину явления: возникновение уровней квантования энергии электронов в узком приповерхностном слое образца.

Влияние подсветки становится существенным благодаря наличию в структуре узкого слоя $n\text{-CdS}$, который в контакте с микрокристаллами $p\text{-CdTe}$ образует в среднем плоскую гетерограницу между двумя полупроводниковыми материалами.

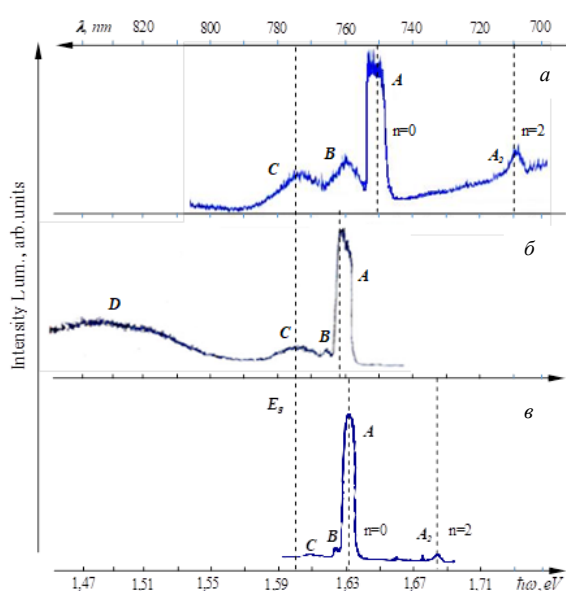


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции микрокристаллического слоя CdTe:

a – на стеклянной подложке, *б* – в гетероструктуре *p*-CdTe/*n*-CdS без подсветки, *в* – легированный CdTe:In

Fig. 4. Photoluminescence spectra of a microcrystalline CdTe layer:

a – on a glass substrate; *б* – in a *p*-CdTe/*n*-CdS heterostructure without illumination; *в* – doped CdTe:In

При этом дополнительные фотонотенители, возбуждающиеся в результате подсветки, создаются в тех областях микрокристаллических частиц CdTe, которые непосредственно соприкасаются с пленкой CdS. В таком случае должны иметься в виду, в основном, фотоиндуцированные изменения загибов зон в ОПЗ, относящихся к указанным областям частиц.

С. Спектры ФЛ микрокристаллического слоя CdTe на стеклянной подложке и в гетероструктуре *n*-CdS/*p*-CdTe при 4,2 К

На рис. 4 представлены спектры фотолюминесценции ($T = 4,2$ К) при фронтальном возбуждении микрокристаллического слоя CdTe, нанесенного на чистую стеклянную подложку (*a*), внедренного в гетероструктуру *p*-CdTe/*n*-CdS в отсутствие освещения CdS (*б*) и для легированного образца CdTe:In (*в*). В спектрах ФЛ мелкозернистых пленок CdTe излучения экситонов и ДАП отсутствуют. В спектрах хорошо видны доминирующие *A*-линии излучения, расположенные при энергиях фотонов $\epsilon_A \approx 1,65, 1,625$ и $1,632$ эВ. Различное положение максимумов линий означает, что напряженность электрического поля E_s на границе микрокристалла для рассматриваемых образцов принимает разные значения. Поэтому по формуле (4) и по формулам (13), (16), (18) Приложения можно получить различные значения ϵ_0^{QW} , l_{QW} , N_s и других параметров квантовой ямы для разных образцов (см. таблицу).

Особый интерес представляет то (рис. 4, *a*, *в*), что в чистых и легированных тонких пленках CdTe, содержащих микрокристаллы, наблюдается излучение с квантового уровня $n = 2$ (излучение из состояния $n = 1$ запрещено правилами отбора). Используя найденные выше значения ϵ_0^{QW} и формулу (4), вычисляем ϵ_2^{QW} и, следовательно, $\epsilon_A^{(2)}$. Теоретические и экспериментальные значения параметров совпадают с точностью около 5 мэВ (см. таблицу). Этот факт еще раз подтверждает, что простая модель и развитая в настоящем исследовании теория удов-

Теоретические и экспериментальные значения параметров микрокристаллов в образцах CdTe

Theoretical and experimental values of microcrystal parameters in CdTe samples

Образец	ϵ_A , эВ эксперим.	ϵ_0^{QW} , МэВ теория	l_{QW} , нм теория	E_s , кВ/см теория	N_s , см теория	$\epsilon_A^{(2)}$, эВ эксперим./ теория	ϵ_2^{QW} , МэВ теория
$T = 2,0$ К							
<i>n</i> -CdS / <i>p</i> -CdTe	1,638	44,18	9,9	44,6	$2,60 \cdot 10^{11}$	–	–
$T = 4,2$ К							
<i>n</i> -CdS / <i>p</i> -CdTe	1,625	35,06	11,1	31,5	$1,83 \cdot 10^{11}$	–	–
<i>p</i> -CdTe	1,650	70,10	8,0	89,2	$5,20 \cdot 10^{11}$	1,730/1,725	168,3
CdTe:In	1,632	44,9	9,8	45,7	$2,66 \cdot 10^{11}$	1,682/1,677	107,7

летворительно описывают основные особенности наблюдаемых спектров, демонстрирующих, в первую очередь, «сверхгорячую» фотолюминесценцию микрокристаллов.

Что касается спутников B -, C -линий, проявляющихся в длинноволновой области спектра (относительно A -линий), то можно полагать, что они связаны с вкладами $1LO$ -, $2LO$ -($\epsilon_{LO} = 21$ мэВ) и LA -фононных повторений (рис. 4, a), а также с примесями (рис. 4, b , $в$). Относительно широкая D -линия (рис. 4, $б$), скорее всего, обусловлена рекомбинационным излучением через поверхностные уровни гетероперехода.

Заключение

Эффекты размерного квантования, присущие разнообразным твердотельным структурам пониженной размерности, остаются предметом особого интереса как с научной, так и с практической точек зрения. Если речь идет о кристаллах малого размера, изготовленных из полупроводниковых материалов, то, как правило, обсуждаются явления, связанные с размерами кристаллических частиц, сопоставимыми с боровским радиусом a_{ex} экситона.

В настоящей работе представлены результаты исследований квантово-размерной рекомбинации фотоносителей в микрокристаллических частицах $CdTe$, линейный размер которых (порядка одного микрона) существенно превосходит характерное значение a_{ex} . Основной наблюдаемый эффект заключается в формировании в спектре низкотемпературной фотолюминесценции пленочной гетероструктуры $p-CdTe/n-CdS$, содержащей такие частицы, доминирующей узкой «супергорячей» полосы излучения, расположенной по частоте выше фундаментального края собственного поглощения объемного кристалла $CdTe$.

Для понимания природы наблюдаемого аномального излучения рассмотрена модель микрокристалла сферической формы, согласно которой внутри сферы существует приповерхностный слой пространственного заряда, приводящий к изгибу зон (проводимости и валентной) по мере приближения к поверхности. При этом непосредственно вблизи поверхности формируется потенциальная (треугольная по форме) квантовая яма $V(r)$ для электронов. Полоса «горячего» излучения возникает в результате оптических переходов электронов с уровней пространственного квантования энергии в яме $V(r)$ в квазинепрерывные состояния валентной зоны.

Дополнительная подсветка гетероструктуры со стороны прозрачной подложки светом из спектральной области собственного поглощения

CdS приводит к тушению аномальной коротковолновой полосы излучения и одновременному возгоранию экситон-поляритонной люминесценции $CdTe$. Такой эффект находит естественное объяснение, если принять во внимание индуцированную подсветкой генерацию дополнительных носителей заряда, которые компенсируют положительный заряд поверхности микрокристалла и отрицательный объемный заряд акцепторов. При этом сглаживается изгиб зон, исчезает приповерхностная потенциальная яма и ослабляется внутреннее электрическое поле, которое в отсутствие подсветки оказывается настолько сильным, что экситон-поляритонное состояние не регистрируется вследствие полной ионизации экситона.

Исследования спектров люминесценции пленочных гетероструктур $p-CdTe/n-CdS$ с прозрачными омическими контактами представляют интерес, прежде всего, с прикладной точки зрения с целью создания на их основе новых типов солнечных элементов [17 – 19]. Такие исследования должны включать в себя более тщательный анализ зависимостей от размера микрокристаллов, толщины слоев CdS и $CdTe$, метода легирования, температуры, а также спектрального состава и интенсивности освещения. В теоретическом плане предстоит разработать метод теоретического расчета спектра «супергорячего» излучения в условиях приповерхностной квантово-размерной рекомбинации фотоносителей с учетом механизмов слабой локализации фотоэлектронов и кулоновского взаимодействия их со свободными фотодырками валентной зоны (то есть возможности образования экситонной конденсации нового типа).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Значение r_{em} можно оценить, используя конкретный вид волновой функции $\Psi(r)$ для состояния $n = 0$. Точное решение уравнения Шредингера в случае идеальной треугольной ямы со стенками бесконечной высоты (одна вертикальная, другая – наклонная) выражается [10] через функции Эйри. Для оценки положения максимума волновой функции, описывающей состояние $n = 0$, остановимся на ее вариационной форме, полученной в одномерном случае (ось z направлена перпендикулярно плоской поверхности $z = 0$ в глубь кристалла) [11]:

$$\Psi(z) = (3b^3/2)^{1/2} z \exp[-(bz)^{3/2}/2], \quad (8)$$

где параметр

$$b = 48\pi m e^2 (N_A - N_D) z_d / \epsilon_{st} \hbar^2 \quad (9)$$

содержит толщину z_d обедненного слоя и определяется из условия минимума полной энергии. Такое представление успешно использовалось в ряде работ при анализе явлений переноса носителей заряда в приповерхностной области полупроводника [10, 11].

Нетрудно показать, что максимум функции (8) расположен в точке

$$z = z_{\max} = 2\sqrt[3]{6} / 3b. \quad (10)$$

Для используемой модели (рис. 2) в формулах (8) – (10) следует произвести очевидные замены: $z = R - r$, $z_d = R - r_0$ и $z_{\max} = R - r_{em}$. Тогда

$$R - r_{em} = a_B (\pi / 3)^{1/3} \sqrt{\frac{m_0}{m_*} \frac{G_{Ry}}{\varepsilon_0^{QW}}}. \quad (11)$$

С другой стороны, как видно из рис. 3,

$$\frac{\delta}{R - r_{em}} = \frac{\varepsilon_0^{QW}}{l_{QW}}; \quad (12)$$

$$l_{QW} = a_B \frac{9\pi}{8} \sqrt{\frac{m_0}{m_*}} \sqrt{\frac{G_{Ry}}{\varepsilon_0^{QW}}} \quad (13)$$

– классическая ширина модельного треугольного потенциала на уровне энергии ε_0^{QW} .

В результате, на основании зависимостей (11) – (13), получаем

$$\delta = \gamma \cdot \varepsilon_0^{QW}, \quad (14)$$

где коэффициент γ имеет численное значение

$$\gamma = \frac{8}{9} \left(\frac{1}{3\pi^2} \right)^{1/3} \approx 0,287. \quad (15)$$

Таким образом, используя формулы (7) и (14), находим значение энергии ε_0^{QW} нижайшего уровня квантования, выражаемое через экспериментальные данные, относящиеся к ε_A и ε_g :

$$\varepsilon_0^{QW} = \frac{\varepsilon_A - \varepsilon_g}{1 - \gamma}. \quad (16)$$

Подставляя в формулу (16) с учетом (15) приведенные выше (см. также рис. 3) экспериментальные значения ε_A и ε_g , получаем, что в исследованной структуре $\varepsilon_0^{QW} = 44,18$ мэВ,

$\delta = 12,68$ мэВ. Напряженность электрического поля на поверхности определяется выражением

$$E_s = |E(R)| = \frac{e}{a_B^2} \frac{4}{9\pi} \sqrt{\frac{m_*}{m_0}} \left(\frac{\varepsilon_0^{QW}}{G_{Ry}} \right)^{3/2}, \quad (17)$$

следующим из зависимостей (3) и (4). Полагая $m_*/m_0 = 0,11$ [16], получаем $E_s = 44,6$ кВ/см. Для ширины квантовой ямы имеем (формула (13)) $l_{QW} = 9,9$ нм, при этом $l_{QW}/R \approx 0,02 \ll 1$, что соответствует исходным допущениям для используемой в оценках модели. Кроме этого, в рамках используемой сферической модели можно получить выражение

$$N_s = \frac{\varepsilon_{st} \sqrt{m_*/m_0}}{(3\pi a_B)^2} \left(\frac{\varepsilon_0^{QW}}{G_{Ry}} \right)^{3/2} \quad (18)$$

для определения поверхностной плотности N_s зарядов на границе микрокристалла, что при $\varepsilon_{st} = 10,6$ [20] дает $N_s = 2,6 \cdot 10^{11}$ см⁻².

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akhmadaliev B.J., Mamatov O.M., Polvonov B.Z., Yuldashev N.Kh. Correlation between the low-temperature photoluminescence spectra and photovoltaic properties of thin polycrystalline CdTe films // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2016. Vol. 4. P. 391–397. <http://dx.doi.org/10.4236/jamp.2016.42046>
2. Багаев В.С., Клевков Ю.В., Колосов С.А., Кривобок В.С., Шепель А.А. Оптические и электрофизические свойства дефектов в высокочистом CdTe // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. № 1. С. 37.
3. Ушаков В.В., Клевков Ю.В. Влияние межзеренных границ раздела на свойства теллурида кадмия, полученного в неравновесных условиях // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. № 11. С. 1298.
4. Ekimov A.I., Kudryavtsev I.A., Ivanov M.G., Efros A.L. Spectra and decay kinetics of radiative recombination in CdS microcrystals // Journal of Luminescence. 1990. Vol. 46. P. 83.
5. Nozik A.J., Beard M.C., Luther J.M., Law M., Ellingson R.J., Johnson J.C. Semiconductor quantum dots and quantum dot arrays and applications of multiple exciton generation to third-generation photovoltaic solar cells // Chem. Rev. 2010. Vol. 110. P. 6873–6890. <https://doi.org/10.1021/cr900289f>
6. Fonthal G., Tirado-Mejia L., Marin-Hurta J.I. Temperature dependence of the band gap energy

- of crystalline CdTe // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2000. Vol. 61. P. 579–583. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3697\(99\)00254-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3697(99)00254-1)
7. Ekimov A.I., Onishchenko A.A. Quantum size effect in three-dimensional microscopic semiconductor crystals // *JETP Lett.* 1981. Vol. 34. P. 363.
 8. Екимов А.И., Кудрявцев И.А., Иванов М.Г., Эфрос Ал.Л. Фотолюминесценция квазинульмерных полупроводниковых структур // *Физика твердого тела*. 1989. Т. 31. № 8. С. 192.
 9. Ando T., Fowler A., Stern F. Electronic properties of two-dimensional systems // *Reviews of Modern Physics*. 1982. Vol. 54. P. 437.
 10. Takada Y., Uemura Y. Subband Structures of N-channel inversion layers on III-V Compounds-A Possibility of the Gate Controlled Gann Effect // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1977. Vol. 43. P. 139.
 11. Horodyský P., Hlíděk P. Phys. Free-exciton absorption in bulk CdTe: temperature dependence // *Status Solidi B*. 2006. Vol. 243. P. 494–501. <https://doi.org/10.1002/pssb.200541402>
 12. Абдукадыров А.Г., Сажин М.И., Селькин А.В., Юлдашев Н.Х. Поляритонная люминесценция смешанных мод в кристаллах с пространственной дисперсией // *ЖЭТФ*. 1990. Т. 97. № 2. С. 644–662.
 13. Sel'kin A.V., Yuldashev N.Kh. *Effects of spatial dispersion and exciton damping in polariton luminescence spectra*. In: *Semiconductor and Insulators: Optical and Spectroscopic Research*, Ioffe Physico-Technical Institute Research Studies, Nova Science Publishers, Inc., 1992. P. 55–84.
 14. Novikov A.B., Novikov B.V., Yuferev R.B., Roppischer H., Stein N., Sel'kin A.V. Anomalous Stark effect on excitonic states in a preionization electric field // *JETP Lett.* 1996. Vol. 64. P. 42.
 15. Романовский С.О., Селькин А.В., Стамов И.Г., Феоктистов Н.А. Экситоны в кристаллах ZnP_2 в электрическом поле барьера Шоттки // *Физика твердого тела*. 1998. Т. 40. № 5. С. 884.
 16. Rubio-Ponce A., Olguín D., Hernández-Calderón I. Calculation of the effective masses of II-VI semiconductor compounds // *Superficies y Vacío*. 2003. Vol. 16. P. 26–28.
 17. Amit H. Munshi, Jason M. Kephart, Ali Abbas, Tushar M. Shimpi, Kurt L. Barth, John M. Walls, Walajabad S. Sampath. Polycrystalline CdTe photovoltaics with efficiency over 18 % through improved absorber passivation and current collection. // *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 176. P. 9–18.
 18. Halina Opyrchal, Dongguo Chen, Zimeng Cheng and Ken Chin. PL Study on the Ect of Cu on the front side luminescence of CdTe/CdS solar cells. // *Coatings* 2019. Vol. 9. No. 43. P. 1–9.
 19. Tuteja M. Low temperature photo luminescence studies on sputter deposited cadmium sulphide/cadmium telluride heterojunctions and solar sells. In: Thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign. 2014. P. 24.
 20. Capper P., Garland J. Mercury cadmium telluride: growth, properties and applications. John Wiley & Sons, Ltd, 2011. P. 556.

REFERENCES

1. Akhmadaliev B.J., Mamatov O.M., Polvonov B.Z., Yuldashev N.Kh. Correlation between the Low-Temperature photoluminescence spectra and photovoltaic properties of thin polycrystalline CdTe Films. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. 2016, vol. 4, pp. 391–397. <http://dx.doi.org/10.4236/jamp.2016.42046>
2. Bagaev V.S., Klevkov Yu.V., Kolosov S.A., Krivobok V.S., Shepel' A.A. Optical and electrophysical properties of defects in high-purity CdTe. *Fizika tverdogo tela*. 2010, vol. 52, no. 1, pp. 37. (In Russ.).
3. Ushakov V.V., Klevkov Yu.V. Effect of intergranular interfaces on properties of cadmium telluride obtained under non-equilibrium conditions. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2003, vol. 37, no. 11, pp. 1298. (In Russ.).
4. Ekimov A.I., Kudryavtsev I.A., Ivanov M.G., Efros Al.L. Spectra and decay kinetics of radiative recombination in CdS microcrystals. *Journal of Luminescence*. 1990, vol. 46, pp. 83.
5. Nozik A.J., Beard M.C., Luther J.M., Law M., Ellingson R.J., Johnson J.C. Semiconductor quantum dots and quantum dot arrays and applications of multiple exciton generation to third-generation photovoltaic solar cells. *Chem. Rev.* 2010, vol. 110, pp. 6873–6890. <https://doi.org/10.1021/cr900289f>
6. Fonthal G., Tirado-Mejia L., Marin-Hurta J.I. Temperature dependence of the band gap energy of crystalline CdTe. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2000, vol. 61, pp. 579–583. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3697\(99\)00254-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3697(99)00254-1)
7. Ekimov A.I., Onishchenko A.A. Quantum Size Effect in Three-Dimensional Microscopic Semiconductor Crystals. *JETP Lett.* 1981, vol. 34, p. 363.
8. Ekimov A.I., Kudryavtsev I.A., Ivanov M.G., Efros Al.L. Photoluminescence of quasinulmer semiconductor structures. *Fizika tverdogo tela*. 1989, vol. 31, no.8, p. 192. (In Russ.).
9. Ando T., Fowler A., Stern F. Electronic properties of two-dimensional systems. *Reviews of Modern Physics*. 1982, vol. 54, p. 437.
10. Takada Y., Uemura Y. Subband Structures of N-Channel Inversion Layers on III-V Compounds-A Possibility of the Gate Controlled Gann Effect. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1977, vol. 43, pp. 139.

11. Horodyský P., Hlíděk P. Phys. Free-exciton absorption in bulk CdTe: temperature dependence. *Status Solidi B*. 2006, vol. 243, pp. 494–501. <https://doi.org/10.1002/pssb.200541402>
12. Abdukadyrov A.G., Sazhin M.I., Sel'kin A.V., Yuldashev N.Kh. Polaritonic luminescence of mixed modes in crystals with spatial dispersion. *ZhETF*. 1990, vol 97, no. 2, pp.644–662. (In Russ.).
13. Sel'kin A.V., Yuldashev N.Kh. Effects of Spatial Dispersion and Exciton Damping in Polariton Luminescence Spectra. In: *Semiconductor and Insulators: Optical and Spectroscopic Research, Ioffe Physico-Technical Institute Research Studies*, Nova Science Publishers, Inc., 1992, pp. 55–84.
14. Novikov A.B., Novikov B.V., Yuferev R.B., Roppischer H., Stein N., Sel'kin A.V. Anomalous Stark effect on excitonic states in a preionization electric field. *JETP Lett*. 1996, vol. 64, pp. 42.
15. Romanovskii S.O., Sel'kin A.V., Stamov I.G., Feoktistov N.A. Excitons in ZnP_2 crystals in the electric field of the Schottky barrier. *Fizika tverdogo tela*. 1998, vol. 40, no. 5, p. 884. (In Russ.).
16. Rubio-Ponce A., Olguín D., Hernández-Calderón I. Calculation of the effective masses of II-VI semiconductor compounds. *Superficies y Vacío*. 2003, vol. 16, pp. 26–28.
17. Amit H. Munshi, Jason M. Kephart, Ali Abbas, Tushar M. Shimpi, Kurt L. Barth, John M. Walls, Walajabad S. Sampath. Polycrystalline CdTe photovoltaics with efficiency over 18% through improved absorber passivation and current collection. // *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 176. PP. 9–18.
18. Halina Opyrchal, Dongguo Chen, Zimeng Cheng and Ken Chin. PL Study on the Effect of Cu on the Front Side Luminescence of CdTe/CdS Solar Cells. // *Coatings* 2019, vol.9, No.43, pp.1-9.
19. Tuteja M. Low temperature photo luminescence studies on sputter deposited cadmium sulphide/cadmium telluride heterojunctions and solar cells / Thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2014. P. 24.
20. Capper P., Garland J. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications: John Wiley & Sons, Ltd, 2011, 556 p.

Сведения об авторах

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

E-mail: uzferfizika@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0226-3528

Олмосбек Махамматович Маматов, PhD ф.-м.н., старший преподаватель кафедры электроники и приборостроения, Ферганский политехнический институт

E-mail: olmosbek_.85@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6441-3443

Александр Викторович Селькин, д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

E-mail: alexander.selkin@mail.ioffe.ru

ORCID: 0000-0003-1662-1154

Information about authors

Nosirjon Kh. Yuldashev, Dr.Sci.(Phys.-Math.), Professor, Department of Physics, Ferghana Polytechnic Institute

E-mail: uzferfizika@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0226-3528

Olmosbek M. Mamatov, PhD (Phys. and Mathematics), Senior Lecturer, Department of Electronics and Instrument Engineering, Fergana Polytechnic Institute

E-mail: olmosbek_.85@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6441-3443

Alexander V. Selkin, Dr.Sci.(Phys.-Math.), Professor, Leading Researcher, The Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences

E-mail: alexander.selkin@mail.ioffe.ru

ORCID: 0000-0003-1662-1154

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 05.06.2023

После доработки 06.06.2023

Принята к публикации 12.06.2023

Received 05.06.2023

Revised 06.06.2023

Accepted 12.06.2023

Оригинальная статья

УДК 621.791.92:621.727:620.178

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-30-38

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ
СТАЛИ ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТПУСКА**

© 2023 г. В. В. Почетуха, Л. П. Башенко, А. Н. Гостевская,
Е. А. Будовских, В. Е. Громов, А. С. Чапайкин

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

Аннотация. Методами световой и сканирующей электронной микроскопии на поперечных шлифах проведены металлографические исследования структуры многослойных покрытий быстрорежущей стали Р19Ю, сформированных в среде азота при многослойной плазменной наплавке порошковой проволокой. Покрытия имеют разориентированную дендритную структуру с характерным размером осей первого порядка 100 мкм, которая мало изменяется с глубиной. При больших увеличениях детально выявляется карбидная сетка эвтектических карбидов типа Me_6C по границам зерен твердого раствора с размерами ячеек в пределах 5 – 100 мкм. Сетка окаймлена светлым слоем однородного металла, по-видимому, представляющим собой низколегированный феррит. Мелкие ячейки с характерными размерами 5 – 10 мкм имеют однородную ферритную структуру, а в более крупных формируется внутренняя темная область, имеющая аустенитно-мартенситную структуру с включениями мелкоигльчатого мартенсита. В более крупных ячейках формируется внутренняя темная область, имеющая аустенитно-мартенситную структуру с включениями равноосных изолированных карбидов. Поскольку наплавку проводили в среде азота, следует предполагать также образование в ней карбидов, содержащих азот, или карбонитридов. В таких условиях кристаллизации образуются также комплексные карбиды типа $Fe_3(W-Mo-N-V)_3C$. Возможно также образование нитридов Fe_4N . Характерный размер мартенситных игл в ней составляет 1 – 3 мкм. После четырехкратного высокотемпературного отпуска при 560 °С в результате распада остаточного аустенита, образования мартенсита отпущенного и выделения дисперсных карбидов общая микротвердость возрастает от 472 до 528 HV и ее распределение становится более однородным. При этом наблюдается рост мартенситных игл в пределах от 2 до 6 мкм.

Ключевые слова: быстрорежущая сталь, плазменная наплавка, легирование, азот, отпуск, микроструктура, карбидная фаза, эвтектика, аустенитно-мартенситная смесь

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186/>

Для цитирования: Почетуха В.В., Башенко Л.П., Гостевская А.Н., Будовских Е.А., Громов В.Е., Чапайкин А.С. Структура и свойства плазменных покрытий из быстрорежущей стали после высокотемпературного отпуска // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 30 – 38. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-30-38](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-30-38)

Original article

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF PLASMA COATINGS FROM HIGH-SPEED
STEEL AFTER HIGH-TEMPERATURE TEMPERING**

© 2023 V. V. Pochetukha, L. P. Bashchenko, A. N. Gostevskaya,
E. A. Budovskikh, V. E. Gromov, A. S. Chapaikin

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

Abstract. In this article, metallographic studies of the structure of multilayer coatings of high-speed steel R19Yu, formed in a nitrogen atmosphere during a multilayer plasma transfer arc with flux-cored wire, were carried out using the methods of light and scanning electron microscopy on transverse sections. The coatings have a disoriented dendritic structure with a characteristic dimension of the first-order axes of 100 μm , which changes little with depth. A carbide network of eutectic carbides of the Me_6C type is revealed in detail at high magnifications along the boundaries of solid solution grains with cell sizes in the range of 5–100 μm . The grid is bordered by a light layer of a homogeneous metal, apparently representing a low-alloyed ferrite. Small cells with characteristic dimensions of 5–10 μm have a homogeneous ferrite structure, while larger cells form an inner dark region that has an austenitic-martensitic structure with inclusions of finely acicular martensite. In larger cells, an inner dark region forms, which has an austenitic-martensitic structure with inclusions of equiaxed isolated carbides. Since the surfacing was carried out in a nitrogen atmosphere, the formation of nitrogen-containing carbides or carbonitrides in it should also be assumed. Under such crystallization conditions, complex carbides of the $\text{Fe}_3(\text{W-Mo-N-V})_3\text{C}$ type are also formed. The formation of nitrides Fe_4N is also possible. The characteristic size of martensitic needles in it is 1–3 μm . After four high-temperature temperings at 560 $^{\circ}\text{C}$, as a result of the decay of residual austenite, the formation of tempered martensite, and the precipitation of dispersed carbides, the total microhardness increases from 472 to 528 HV and its distribution becomes more homogenous. In this case, the growth of martensitic needles is observed in the range of 2 to 6 μm .

Keywords: high speed steel, plasma transfer arc, alloying, nitrogen, tempering, microstructure, carbide phase, eutectic, austenitic-martensitic mixture

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

For citation: Pochetuha V.V., Bashchenko L.P., Gostevskaya A.N., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Chapaikin A.S. Structure and properties of plasma coatings from high-speed steel after high-temperature tempering. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 30 – 38. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-30-38](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-30-38)

Введение

В последнее десятилетие наблюдается тенденция к применению азота в качестве легирующего элемента литых сплавов и покрытий [1 – 4]. Использование азота в ряде случаев позволяет достигать повышенных эксплуатационных свойств по сравнению с безазотистыми сплавами аналогичного назначения. Оптимальное легирование азотом позволяет значительно повысить коррозионную стойкость, прочность, ударостойкость, абразивную износостойкость и другие свойства сплавов. Это оказывается возможным вследствие повышения микротвердости структурных составляющих покрытий.

Для защиты от абразивного износа тяжело нагруженных поверхностей деталей машин, используемых в металлургической и горной промышленности, широко применяются плазменная сварка и наплавка [5 – 8]. Эти процессы характеризуются высокой производительностью, возможностью легирования наплавляемого металла и использования различных наплавочных материалов, в том числе быстрорежущих теплостойких сталей высокой твердости (P18, P6M5, P2M9 и др.). В настоящее время структурно-фазовые

состояния и свойства быстрорежущих сплавов активно изучаются учеными в области физического материаловедения и специалистами практиками [9 – 18].

Новые технологии применения азота для модификации свойств литых металлических сплавов и покрытий повышают их эксплуатационные свойства [4 – 8]. В настоящей работе применен способ плазменной наплавки [19], позволяющий получать наплавленный металл в закаленном состоянии без трещин. Такой способ наиболее эффективен для наплавки на валковые стали [20 – 26] и отличается использованием вместо аргона защитно-легирующей среды азота, что позволяет осуществлять легирование наплавляемого металла азотом.

Другой особенностью способа является проведение высокотемпературного отпуска наплавленных покрытий. В результате существенно повышаются твердость и износостойкость наплавляемого покрытия. Результаты изучения особенностей структурно-фазовых превращений при отпуске наплавленных покрытий отражены, в частности, в работе [25], но в целом остаются малоизученными.

Целью настоящей работы является исследование структуры покрытий из теплостойкого металла высокой твердости P18Ю, полученных плазменной наплавкой порошковой проволокой в среде азота и последующего высокотемпературного отпуска.

Материалы и методы исследования

Плазменную наплавку проводили на обратной полярности в защитно-легирующей среде азота с нетоковедущей присадочной порошковой проволокой. При этом обеспечивались необходимые условия смачиваемости поверхности изделия наплавляемым металлом и бездефектное формирование наплавленного слоя. Наплавка на обратной полярности позволяет уменьшить разбавление наплавляемого металла основным.

В работе исследовали наплавленный быстрорежущий сплав P18Ю, дополнительно легированный алюминием и азотом. Химический состав сплава, % (по массе): С 0,87; Cr 4,41; W 17,00; Mo 0,10; V 1,50; 0,35 Ti; Al 1,15; N 0,06. Наплавку проводили на сталь 30ХГСА следующего химического состава, % (по массе): С 0,3; Cr 0,9; Mn 0,8; Si 0,9. Подробно наплавка описана в работе [25].

Наплавку покрытия осуществляли в пять слоев общей толщиной до 10 мм. Из верхних слоев наплавленного металла на станке электроискровой резки параллельно поверхности подложки вырезали образцы в виде пластинок толщиной 0,25 – 0,30 мм. Половину образцов от партии подвергали высокотемпературному отпуску, режим которого соответствовал рекомендациям для близкой по составу кованой стали P18 (температура нагрева 580 °С, время выдержки 1 ч, количество отпусков 4) [25].

Для металлографических исследований образцы разрезали на электроискровом станке в керосине на несколько частей, затем механически выравнивали на мелкой наждачной бумаге и алмазной пасте, а после этого электролитическим способом стравливали деформированный слой и выравнивали поверхность. При проведении металлографического исследования применяли световой микроскоп OLYMPUS GX-51, а также сканирующий электронный микроскоп KYKY-EM6900 с термоэмиссионным вольфрамовым катодом, оснащенный микрозондовой приставкой, при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе эмиссии 150 мкА, точка насыщения тока накала составляла 2,4 А. Рабочее расстояние между образцом и линзой составляло 15 мм.

Определение микротвердости приповерхностных слоев после наплавки и после четырехкратного высокого отпуска проводили с шагом 100 мкм по десяти отпечаткам с помощью при-

бора HVS-1000A методом Виккерса при нагрузке на индентор 10 Н.

Результаты и их обсуждение

Формирование структуры в последнем наплавленном слое происходило следующим образом. Из жидкости выделялся обедненный по углероду α -твердый раствор. Далее протекала перитектическая реакция с образованием кристаллов γ -твердого раствора. Перитектическая реакция протекала на поверхности раздела фаз, поэтому образующиеся γ -кристаллы изолировали сердцевину α -кристаллов от жидкости, более богатой углеродом. Дальнейшее протекание перитектической реакции возможно лишь при диффузии углерода и легирующих элементов из жидкости через γ -фазу. Этот процесс в реальных условиях наплавки, когда происходит ускоренное охлаждение поверхностных наплавленных слоев, практически не протекает. Соответственно, в структуре сохраняется некоторое количество α -фазы, которое зависит от скорости охлаждения поверхностного слоя.

При последующем охлаждении происходит эвтектоидный распад α -фазы с образованием α -эвтектоида, представляющего собой дисперсную смесь аустенита и карбидов типа Me_6C , а также карбидов цементитного типа.

Чем выше скорость охлаждения, тем сильнее неоднородность, обусловленная слабо развивающимся перитектическим превращением. После окончательного затвердевания в структуре имеются зерна, состоящие из трех концентрических слоев: 1 – сердцевина с двухфазной структурой α -эвтектоида; 2 – промежуточный светлый слой (при затвердевании по перитектической реакции в нем образуются γ -кристаллы, которые при быстром охлаждении превращаются в мартенсит и остаточный аустенит); 3 – наружный слой с двухфазной эвтектикой (аустенит и карбиды, а после охлаждения – мартенсит и карбиды).

На рис. 1 и 2 показана микроструктура многослойного наплавленного покрытия стали P18Ю на различной глубине. Как видно, формирующаяся структура покрытий обладает разнонаправленным дендритно-ячеистым строением по сечению.

Дисперсность структуры практически не зависит от расстояния от поверхности. Это связано с небольшой толщиной отдельных наплавляемых слоев и, соответственно, близкими скоростями охлаждения по глубине наплавленного за один проход слоя.

При значительном увеличении, позволяющем детализировать элементы структуры, также не выявлено различий между строением наплавленного слоя на различной глубине от поверхности (рис. 2).

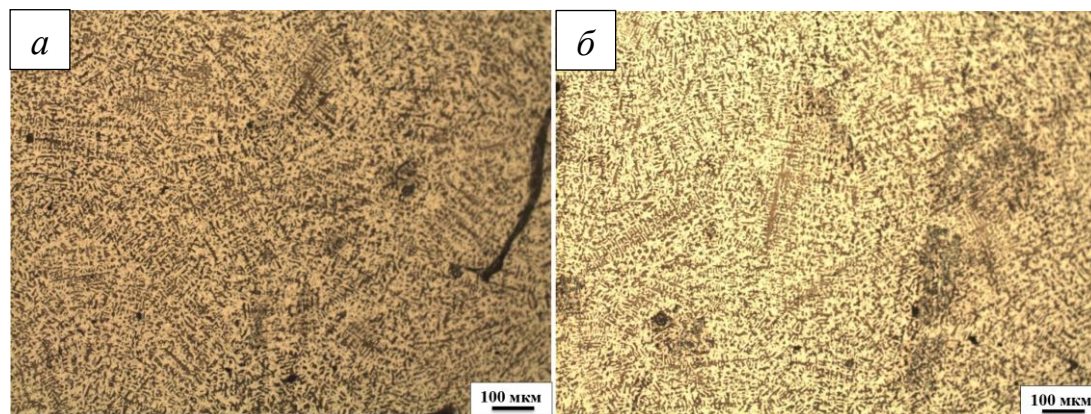


Рис. 1. Микроструктура наплавленного слоя P18Ю на расстоянии 2 мм (а) и 4 мм (б) от поверхности. Световая микроскопия
Fig. 1. Microstructure of the weld pad R18Yu at a distance of 2 mm (a) and 4 mm (b). Light microscopy

Светлая оболочка представляет собой кристаллы мартенсита и остаточного аустенита, образовавшиеся при ускоренном охлаждении из γ -фазы, участвующей в перитектической реакции. Первичные карбиды типа Me_6C скелетообразной формы располагаются внутри светлой оболочки. Присутствие таких карбидов снижает вязкость стали, поэтому их стараются разрушить тем или иным способом. Темные участки представляют собой двухфазную эвтектическую структуру, после затвердевания состоящую из карбидов, мартенсита и остаточного аустенита [27, 28].

Поскольку наплавка проводилась в среде азота, то должны образовываться карбиды, содержащие азот, или карбонитриды. Как было показано в работах [27, 28], образуются комплексные карбиды типа $Fe_3(W-Mo-N-V)_3C$. Возможно и образование нитридов Fe_4N .

Исследование структуры с помощью СЭМ также не выявило различий по глубине покрытия. Характерный вид структуры при большом увеличении показан на рис. 3.

Отличительным признаком структуры быстрорежущих сталей после наплавки является ярко выраженная карбидная неоднородность в виде

сетки эвтектических карбидов по границам зерен твердого раствора.

После отпуска (рис. 4) отчетливо видны структурные изменения в наплавленном слое. В местах нахождения мартенсита и аустенита остаточного наблюдается образование мартенсита отпущенного с повышенной травимостью и выделением дисперсных карбидов типов MeC , Me_6C .

При исследовании наплавленного покрытия по глубине в средней части образца формируется дендритно-ячеистая структура основного металла. Металлографические данные позволяют идентифицировать фазовый состав металла основы как аустенитно-мартенситную смесь. Мартенсит обладает ярко выраженным игольчатым строением.

В междендритном пространстве находится карбидная фаза: эвтектика (рис. 2) сетчатого строения на базе карбидов типов Me_6C и $Me_{23}C_6$, а также, очевидно, и вторичного карбида Me_2C . Однозначная идентификация карбидной фазы затруднена. Из литературных данных [27, 28] известно, что в литом состоянии сплавы типа 10P6M5 кристаллизуются с образованием эвтектических карбидов Me_6C , а по границам денд-

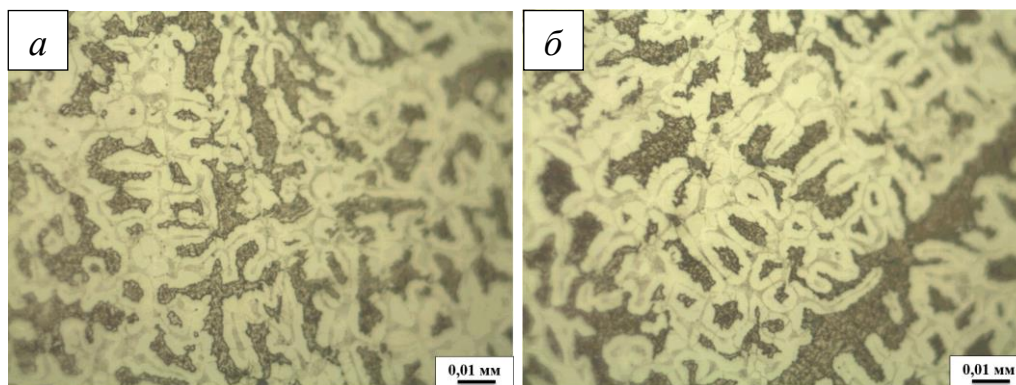


Рис. 2. Микроструктура наплавленного слоя P18Ю на расстоянии 2 мм (а) и 4 мм (б) от поверхности. Световая микроскопия
Fig. 2. Microstructure of the weld pad R18Yu at a distance of 2 mm (a) and 4 mm (b). Light microscopy

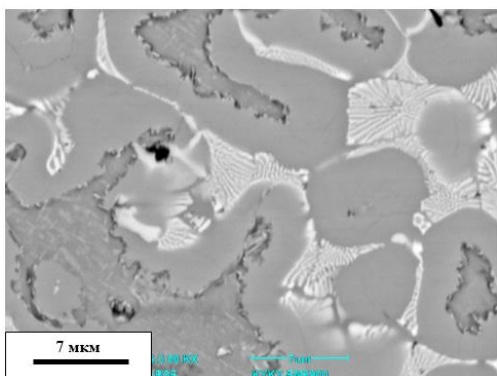


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение наплавленного слоя на расстоянии 2 мм от поверхности образца

Fig. 3. Electron microscopic images of the weld pad at a distance of 2 mm from the sample surface

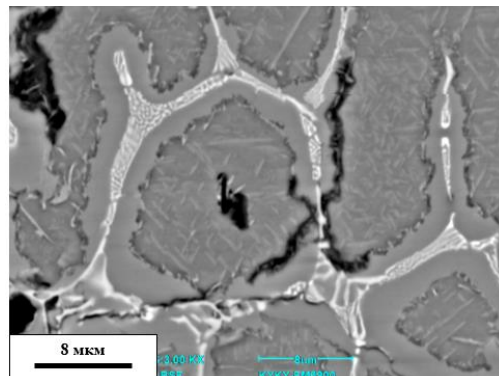


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение наплавленного слоя на расстоянии 2 мм от поверхности образца после отпуска

Fig. 4. Electron microscopic images of the weld pad at a distance of 2 mm from the sample surface after tempering

ритных кристаллов и в их объеме возможно образование округлых карбидов типа MeC на основе ванадия.

Измерения показали, что микротвердость на глубине от поверхности до 4 мм после наплавки не изменяется и составляет 472 HV_{0,1}, после отпуска также остается неизменной, но возрастает до 528 HV. При этом индивидуальные значения микротвердости после наплавки имеют большой разброс, что указывает на наличие в материале наплавки большого количества остаточного аустенита, твердость которого невелика.

После четырехкратного отпуска в результате распада остаточного аустенита, образования мартенсита отпущенного и выделения дисперсных карбидов общая микротвердость повысилась и ее распределение стало более однородным.

Выводы

Многослойные покрытия быстрорежущей стали Р19Ю, сформированные в среде азота при многослойной плазменной наплавке порошковой проволокой, имеют разориентированную дендритную структуру с характерным размером осей первого порядка 100 мкм, которая мало изменяется с глубиной. При больших увеличениях детально выявляется карбидная сетка с размерами ячеек в пределах 20 – 100 мкм, окаймленная слоем однородного металла. Внутренний объем ячеек имеет аустенитно-мартенситную структуру, характерный размер мартенситных игл которой составляет 1 – 3 мкм. После высокотемпературного отпуска при 560 °С происходит рост мартенситных игл. Их видимые размеры на шлифе изменяются в пределах от 2 до 6 мкм. При этом микротвердость покрытий возрастает от 472 до 528 HV.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладкий П.В., Переpletчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменная наплавка. Киев: Екотехнологія, 2007. 292 с.
2. Рябцев И.А., Сенченков И.К. Теория и практика наплавочных работ. Киев: Екотехнологія, 2013. 400 с.
3. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. Москва: Машиностроение, 2008. 406 с.
4. Походня И.К., Шлепаков В.Н., Максимов С.Ю., Рябцев И.А. Исследования и разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой (Обзор) // Автоматическая сварка. 2010. № 12 (692). С. 34–42.
5. Sahoo A., Tripathy S. Development in plasma arc welding process: A review // Materials. Today: Proceedings. 2021. Vol. 41. No. 2. P. 363–368. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.562>
6. Ramkumar P., Karthikeyan M.K., Gupta R.K., Anil Kumar V., Magadum Ch., Muthupandi V. Plasma arc welding of high strength 0.3 % C–CrMoV (ESR) Steel // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2017. Vol. 70. No. 5. P. 1317–1322. <https://doi.org/10.1007/s12666-016-0927-3>
7. Fatima S., Khan M., Jaffery S.H.I., Ali L., Butt S.I., Mujahid M. Optimization of process parameters for plasma arc welding of austenitic stainless steel (304 L) with low carbon steel (A-36) // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L // Journal of Materials: Design and Applications. 2016. Vol. 230. No. 2. P. 640–653. <https://doi.org/10.1177/1464420715584392>
8. Wu C.S., Wang L., Ren W.J., Zhang X.Y. Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling // Journal of Manufacturing Processes. 2014. Vol. 16. No. 1. P. 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.004>

9. Wang Yu., Mao B., Chu Sh., Chen S., Xing H., Zhao H., Wang Sh., Wang Yu., Zhang J., Sun B. Advanced manufacturing of high-speed steels: A critical review of the process design, microstructural evolution, and engineering performance // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 24. P. 8198–8240. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.269>
10. Wang H., Hong D., Hou L., Ou P., Wang Z., Shen L., Zhao H. Influence of tempering temperatures on the microstructure, secondary carbides and mechanical properties of spray-deposited AISI M3:2 high-speed steel // *Materials Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 255. Article 123554. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123554>
11. Lyu C., Zhou J., Zhang X., Yao Y., Zhang Y. Effect of heat treatment on microstructure and impact toughness of a Tungsten-Molybdenum powder metallurgical high-speed steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2021. Vol. 815. Article 141268. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141268>
12. Wang Y., Chu S., Mao B., Xing H., Zhang J., Sun B. Microstructure, residual stress, and mechanical property evolution of a spray-formed vanadium-modified high-speed steel processed by post-heat treatment // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 18. P. 1521–1533. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.053>
13. Chaus A.S., Sahul M. On origin of delta eutectoid carbide in M2 high-speed steel and its behaviour at high temperature // *Materials Letters*. 2019. Vol. 256. Article 126605. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126605>
14. Chaus A.S., Braeik M., Sahul M., Domankova M. Microstructure and properties of M2 high-speed steel cast by the gravity and vacuum investment casting // *Vacuum*. 2019. Vol. 162. P. 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.01.041>
15. Chen N., Luo R., Xiong H., Li Z. Dense M2 high speed steel containing core-shell MC carbonitrides using high-energy ball milled M2/VN composite powders // *Materials Science and Engineering: A*. 2020. Vol. 771. Article 138628. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138628>
16. Yu P., Ziqiang P., Bowen L., Wei X., Ce Zh., Xuanhui Q., Xin L. Influence of heat treatment on the microstructural evolution and mechanical properties of W6Mo5Cr4V2Co5Nb (825 K) high speed steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2020. Vol. 787. Article 139480. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139480>
17. Hu Q., Wang M., Chen Yu., Liu H., Si Z. The Effect of MC-type carbides on the microstructure and wear behavior of s390 high-speed steel produced via spark plasma sintering // *Metals*. 2022. Vol. 12. No. 12. Article 2168. <https://doi.org/10.3390/met12122168>
18. Wang J., Chen C., Zhang C. Effect of Mo and tempering treatment on the microstructural evolution and mechanical properties of M2 high-speed steel prepared by laser directed energy deposition // *Steel research international*. 2021. Vol. 92. Article 2100225. <https://doi.org/10.1002/srin.202100225>
19. Ureña A., Otero E., Utrilla M.V., Múnez C.J. Weldability of a 2205 duplex stainless steel using plasma arc welding // *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 182. No. 1-3. P. 624 – 631. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.08.030>
20. Коршунов Л.Г., Гойхенберг Ю.Н., Черненко Н.Л. Влияние кремния на структуру, трибологические и механические свойства азотсодержащих хромомарганцевых аустенитных сталей // *Физика металлов и металловедение*. 2003. Т. 96. № 5. С. 100–110.
21. Вдовин К.Н., Никитенко О.А., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А. Изучение влияния азотированного феррованадия на параметры микроструктуры литых изделий из стали Гадфильда // *Литейщик России*. 2018. № 3. С. 23–27.
22. Емелюшин А.Н., Петроченко Е. В., Нефедьев С. П. Исследование структуры и ударно-абразивной износостойкости покрытий системы Fe-C-Cr-Mn-Si, дополнительно легированных азотом // *Сварочное производство*. 2011. № 10. С. 18–22.
23. Нефедьев С.П., Емелюшин А.Н. Влияние азота на формирование структуры и свойств плазменных покрытий типа 10P6M5 // *Вестник Югорского государственного университета*. 2021. № 3(62). С. 33–45. <https://doi.org/10.17816/byusu20210333-45>
24. Емелюшин А.Н., Петроченко Е.В., Нефедьев С.П. Сравнение структуры и свойств литых и наплавленных износостойких материалов // *Литейные процессы*. 2012. № 11. С. 141–145.
25. Малущин Н.Н., Громов В.Е., Романов Д.А., Башенко Л.П., Перегудов О.А. Упрочнение теплостойких сплавов плазмой в среде азота. Новокузнецк: ООО Полиграфист, 2022. 232 с.
26. Пат. № 2699488 РФ. Способ многослойной наплавки теплостойкими сталями высокой твердости в азотсодержащей среде / Малущин Н.Н., Романов Д.А., Осетковский В.Л., Кова-

лев А.П., Будовских Е.А., Валуев Д.В.; заявл. 29.02.2019; опубл. 05.09.2019. Бюл. № 25.

27. Геллер Ю.А. *Инструментальные стали*. Москва: Металлургия. 1983. 527 с.
28. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. *Специальные стали*. Москва: МИСиС, 1999. 408 с.

REFERENCES

1. Gladkii P.V., Pereplechikov E.F., Ryabtsev I.A. *Plasma transfer arc*. Kiev: Ekotekhnologiya, 2007, 292 p. (In Russ.).
2. Ryabtsev I.A., Senchenkov I.K. *Theory and practice of surfacing works*. Kiev: Ekotekhnologiya, 2013, 400 p. (In Russ.).
3. Sosnin N.A., Ermakov S.A., Topolyanskii P.A. *Plasma technologies. Welding, coating, hardening*. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 406 p. (In Russ.).
4. Pokhodnya I.K., Shlepakov V.N., Maksimov S.Yu., Ryabtsev I.A. Research and development of the E.O. Research and development of the STC Paton in the field of electric arc welding and surfacing with powder wire (Review). *Avtomaticheskaya svarka*. 2010, no. 12 (692), pp. 34–42. (In Russ.).
5. Sahoo A., Tripathy S. Development in plasma arc welding process: A review. *Materials. Today: Proceedings*. 2021, vol. 41, no. 2, pp. 363–368. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.562>
6. Ramkumar P., Karthikeyan M.K., Gupta R.K., Anil Kumar V., Magadam Ch., Muthupandi V. Plasma arc welding of high strength 0.3 % C–CrMoV (ESR) Steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2017, vol. 70, no. 5, pp. 1317–1322. <https://doi.org/10.1007/s12666-016-0927-3>
7. Fatima S., Khan M., Jaffery S.H.I., Ali L., Butt S.I., Mujahid M. Optimization of process parameters for plasma arc welding of austenitic stainless steel (304 L) with low carbon steel (A-36) // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L. *Journal of Materials: Design and Applications*. 2016, vol. 230, no. 2, pp. 640–653. <https://doi.org/10.1177/1464420715584392>
8. Wu C.S., Wang L., Ren W.J., Zhang X.Y. Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling. *Journal of Manufacturing Processes*. 2014, vol. 16, no. 1, pp. 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.06.004>
9. Wang Yu., Mao B., Chu Sh., Chen S., Xing H., Zhao H., Wang Sh., Wang Yu., Zhang J., Sun B. Advanced manufacturing of high-speed steels: A critical review of the process design, microstructural evolution, and engineering performance. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023, vol. 24, pp. 8198–8240. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.269>
10. Wang H., Hong D., Hou L., Ou P., Wang Z., Shen L., Zhao H. Influence of tempering temperatures on the microstructure, secondary carbides and mechanical properties of spray-deposited AISI M3:2 high-speed steel. *Materials Chemistry and Physics*. 2020, vol. 255, article 123554. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123554>
11. Lyu C., Zhou J., Zhang X., Yao Y., Zhang Y. Effect of heat treatment on microstructure and impact toughness of a Tungsten-Molybdenum powder metallurgical high-speed steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2021, vol. 815, article 141268. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141268>
12. Wang Y., Chu S., Mao B., Xing H., Zhang J., Sun B. Microstructure, residual stress, and mechanical property evolution of a spray-formed vanadium-modified high-speed steel processed by post-heat treatment. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022, vol. 18, pp. 1521–1533. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.053>
13. Chaus A.S., Sahul M. On origin of delta eutectoid carbide in M2 high-speed steel and its behaviour at high temperature. *Materials Letters*. 2019, vol. 256, article 126605. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.126605>
14. Chaus A.S., Braeik M., Sahul M., Domankova M. Microstructure and properties of M2 high-speed steel cast by the gravity and vacuum investment casting. *Vacuum*. 2019, vol. 162, pp. 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.01.041>
15. Chen N., Luo R., Xiong H., Li Z. Dense M2 high speed steel containing core-shell MC carbonitrides using high-energy ball milled M2/VN composite powders. *Materials Science and Engineering: A*. 2020, vol. 771, article 138628. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138628>
16. Yu P., Ziqiang P., Bowen L., Wei X., Ce Zh., Xuanhui Q., Xin L. Influence of heat treatment on the microstructural evolution and mechanical properties of W6Mo5Cr4V2Co5Nb (825 K) high speed steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2020, vol. 787, article 139480. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139480>
17. Hu Q., Wang M., Chen Yu., Liu H., Si Z. The Effect of MC-type carbides on the microstructure and wear behavior of s390 high-speed steel produced via spark plasma sintering. *Metals*. 2022, vol. 12, no. 12, article 2168. <https://doi.org/10.3390/met12122168>

18. Wang J., Chen C., Zhang C. Effect of Mo and tempering treatment on the microstructural evolution and mechanical properties of M2 high-speed steel prepared by laser directed energy deposition. *Steel research international*. 2021, vol. 92, article 2100225. <https://doi.org/10.1002/srin.202100225>
 19. Ureña A., Otero E., Utrilla M.V., Múnez C.J. Weldability of a 2205 duplex stainless steel using plasma arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007, vol. 182, no. 1-3, pp. 624 – 631. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.08.030>
 20. Korshunov L.G., Goykhenberg Yu.N., Chernenko N.L. Effect of silicon on the structure, tribological and mechanical properties of nitrogen-containing chromium-manganese austenitic steels. *Physics of metals and metal science*. 2003, vol. 96, no. 5, pp. 100–110.
 21. Vdovin K.N., Nikitenko O.A., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. Research of the effect of nitrided ferrovanadium on the microstructure parameters of Gadfield steel cast products. *Liteishchik Rossii*. 2018, no. 3, pp. 23–27. (In Russ.).
 22. Emelyushin A.N., Petrochenko E. V., Nefed'ev S. P. Research of structure and impact-abrasive wear resistance of coatings of Fe-C-Cr-Mn-Si system, additionally doped with nitrogen. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2011, no. 10, pp. 18–22. (In Russ.).
 23. Nefed'ev S.P., Emelyushin A.N. The influence of nitrogen on the formation of the structure and properties of plasma coatings of type 10P6M5. *Bulletin of the Yugra State University*. 2021, no. 3(62), pp. 33–45. <https://doi.org/10.17816/byusu20210333-45> (In Russ.).
 24. Emelyushin A.N., Petrochenko E. V., Nefed'ev S. P. Comparison of structure and properties of cast and deposited wear-resistant materials. *Liteinye protsessy*. 2012, no. 11, pp. 141–145. (In Russ.).
 25. Malushin N.N., Gromov V.E., Romanov D.A., Bashchenko L.P., Peregudov O.A. *Strengthening heat-resistant alloys with plasma in nitrogen medium*. Novokuznetsk: OOO Poligrafist, 2022, 232 p. (In Russ.).
 26. Malushin N.N., Romanov D.A., Osetkovskii V.L., Kovalev A.P., Budovskikh E.A., Valuev D.V. Method of multilayer weld deposition with heat-resistant steels of high hardness in nitrogen-containing medium. Pat.RF2699488. *Byulleten' izobretenii*. 2019, no. 25. (In Russ.).
 27. Geller Yu.A. *Instrumental steels*. Moscow: Metallurgiya. 1983, 527 p. (In Russ.).
 28. Gol'dshtein M.I., Grachev S.V., Veksler Yu.G. *Special steels*. Moscow: MISiS. 1999, 408 p. (In Russ.).
- Сведения об авторах**
- Василий Витальевич Почету́ха**, к.т.н., старший преподаватель кафедры транспорта и логистики, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: v.pochetuha@mail.ru
ORCID 0000-0003-0492-6188
- Людмила Петровна Бащенко**, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: luda.baschenko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1878-909X
- Анастасия Николаевна Гостевская**, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: lokon1296@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7328-5444
- Евгений Александрович Будовских**, д.т.н., доцент, старший научный сотрудник, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: budovskikh@mail.ru
ORCID: 0000-0002-3795-0726
- Виктор Евгеньевич Громов**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: gromov@physics.sibsui.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343
- Александр Сергеевич Чапайкин**, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: tchapajkin.s@yandex.ru
- Information about the authors**
- 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
- Lyudmila P. Bashchenko**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University
E-mail: luda.baschenko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1878-909X
- Anastasia N. Gostevskaya**, Postgraduate student of the Department of Natural Sciences. Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: lokon1296@mail.ru
ORCID: 0000-0002-7328-5444

Evgenii A. Budovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor,
senior researcher, Siberian State Industrial University

E-mail: budovskikh@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3795-0726

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

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

Aleksandr S. Chapaikin, Postgraduate student of the
Department of Natural Sciences. Professor V.M. Finkel,
Siberian State Industrial University

E-mail: tchapajkin.s@yandex.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 25.07.2023

После доработки 25.08.2023

Принята к публикации 28.08.2023

Received 25.07.2023

Revised 25.08.2023

Accepted 28.08.2023

Оригинальная статья

УДК 681.5

DOI: 10.57070/2307-4497-2023-3(45)-39-46

УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

© 2023 г. С. Ю. Коршунов^{1, 2}, Г. В. Макаров^{1, 3}, И. Р. Загидулин^{1, 3}, М. М. Свинцов^{1, 3}

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

²ООО «РТ-Инжиниринг» (Россия, 115114, Москва, Павелецкая наб., 2)

³ООО «Научно-исследовательский центр систем управления» (Россия, 654005, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, пр. Строителей, 55А)

Аннотация. Рассмотрена проблема, возникающая в системах с множеством последовательных отдельно управляемых технологических контуров и агрегаты. Эти контуры на входе и выходе имеют технологические связи с соседними, но на уровне управления их интеграция в производство предусматривает только передачу информационных параметров оператору всего технологического комплекса. Оператор, зачастую, не успевает обработать весь поток поступающей информации и правильно принять корректирующие решения. Это приводит к проблемам взаимного влияния контуров и агрегатов друг на друга, которое снижает эффективность управления, качество готовой продукции и может приводить к внеплановым простоям и аварийным ситуациям. В качестве решения предлагается возложить некоторые функции управления производством на основную АСУ ТП, выделив специальный технологический контроллер и подсеть для управления локальными системами управления и регулирования. С помощью специальных подсистем (агентов) можно ввести корректирующие воздействия в технологические уставки и параметры каждого контура так, чтобы минимизировать отклонения заданных значений готовой продукции всего комплекса. В случае современного производства роль таких агентов играют цифровые советчики, но они выдают только возможные варианты решений и оставляют выбор за человеком (оператором). При достаточной эффективности отлаженных советчиков, построенных на базе физико-химических, балансовых, технологических, статистических, нейросетевых, экспертных (или комбинированных) натурно-математических и физико-химических моделей, предлагается их перевести из советующего в автоматический режим. В качестве примера приведена схема комплекса технических средств АСУ ТП главного корпуса обогатительной фабрики «Шахта № 12». В качестве сложности реализации такого решения отмечена закрытость локальных систем управления, особенно зарубежных, в качестве решения предложено применение методов комплексного реверс-инжиниринга.

Ключевые слова: АСУ ТП, локальные системы управления, многоагентные системы, цифровые советчики

Для цитирования: Коршунов С.Ю., Макаров Г.В., Загидулин И.Р., Свинцов М.М. Управление распределенными системами технологического комплекса // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 39 – 46. [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-39-46](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-39-46)

Original article

MANAGEMENT OF DISTRIBUTED SYSTEMS TECHNOLOGICAL COMPLEX

© 2023 S. Yu. Korshunov^{1,2}, G. V. Makarov^{1,3}, I. R. Zagidulin^{1,3}, M. M. Svintsov^{1,3}

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

²**RT-Engineering LLC** (2 Paveletskaya nab., Moscow, 115114, Russian Federation)

³**«Research and Development Center of Control Systems» LLC** (55A Stroiteley Ave., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The article deals with the problem arising in systems with a set of consecutive separately controllable technological circuits and units. These circuits at the input and output have technological links with neighboring ones, but at the control level their integration into production provides only for the transfer of information parameters to the operator of the entire technological complex. The operator often does not have time to process the entire flow of incoming information and make corrective decisions. This leads to problems of mutual influence of such circuits and units on each other, which reduces the efficiency of management, quality of finished products and can lead to unscheduled downtime and emergencies. As a solution, it is proposed to assign some production control functions to the main ACS, allocating a special process controller and subnetwork for controlling local control and regulation systems. Then, with the help of special subsystems ("agents") it is possible to introduce corrective actions into the technological setpoints and parameters of each circuit so as to minimize the deviations of the setpoints of the finished products of the whole complex. In the case of modern production, the role of such "agents" is played by digital advisors, but they provide only possible solutions and leave the choice to the human operator. For well-established advisors built on the basis of physico-chemical, balance and technological, statistical, neural network, expert or combined natural-mathematical and physico-chemical models. As an example, the scheme of the complex of technical means of ACS of the main building of the enrichment plant "Mine No. 12" is given. As a difficulty of realization of such a solution the closedness of local control systems, especially foreign ones, is noted and as a solution the application of complex reverse-engineering methods is proposed.

Keywords: ACS, local control systems, multi-agent systems, digital advisors

For citation: Korshunov S.Yu., Makarov G.V., Zagidulin I.R., Svintsov M.M. Management of distributed systems technological complex. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 39 – 46. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-39-46](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-39-46)

Введение

В настоящее время одной из особенностей создания производства является «конструирование» технологического процесса из отдельных элементов. Эти элементы производства представляют собой технологические контуры определенных процессов или механизмов, соединенные только «входами» и «выходами» [1]. Достаточно просто подать материал с указанными в паспорте свойствами на вход, чтобы получить проектные свойства продукта на выходе.

В идеальном случае эффективность такой работы достигается за счет совместной поставки технологического оборудования и системы управления, которые предлагается называть локальные системы управления (ЛСУ) [2]. Эти системы проходят множественную «обкатку» на различных объектах (ошибки устранены и подобраны оптимальные алгоритмы управления под конкретные тип и характеристики сырья). Такие элементы производства представляют собой черный ящик с полностью определенными входными/выходными зависимостями, из которых последовательно формируется требуемый технологический процесс (рис. 1, штриховыми

линиями отмечены возможные обратные связи и рециклы, обусловленные технологией).

Однако, суммарный эффект возникающих неопределенностей в действующем производстве зачастую приводит к значительному отклонению свойств готового продукта, поскольку отклонение входных/выходных параметров одного контура от нормы влечет за собой значительные отклонения в последующих по цепочке. Кроме того, когда в системе предусмотрен рецикл, эти отклонения могут критически повлиять на весь процесс [3] и привести к аварийным ситуациям, остановке или даже порче оборудования.

Частично эта проблема решается установкой и введением в локальные системы управления дополнительных средств контроля входных и выходных параметров, однако эта информация остается в локальной системе управления и не передается в смежные. Влияние возмущений редко ограничивается локальным контуром. Эти возмущения влияют на последующие технологические контуры в цепочке, суммируются с другими и приводят к сильным отклонениям от ожидаемых качества и количества продукции на выходе.

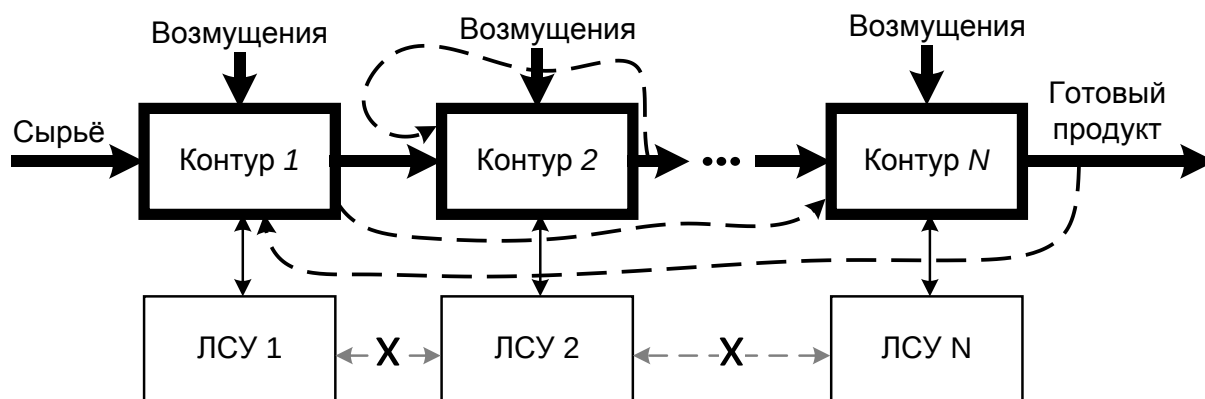


Рис. 1. Схема технологического процесса
Fig. 1. Flow chart of the technological process

Инструменты цифровизации производства

В настоящее время востребованным инструментом оптимизации процессов в рамках цифровизации производства [4, 5] и систем усовершенствованного управления [6, 7] являются цифровые советчики (производственные и учебно-производственные) [8 – 10], которые позволяют определить нужные значения технологических уставок в контурах и выводят подсказки о необходимости их изменения при значительных отклонениях от заданных. Эта информация предоставляется оператору (аппаратчику) для принятия решения (применить или не применить рекомендации).

Цифровой советчик – математическая модель, которая в оперативном режиме выдает рекомендации относительно работы оборудования, позволяет принимать решения, корректирующие технологический процесс. Также как и с математическими моделями существует множество подходов (физико-химические, балансовые и технологические, статистические, нейросетевые, экспертные и многие другие модели и закономерности), которые можно положить в основу цифрового советчика. В большинстве случаев готовые «коробочные решения» цифровых советчиков не раскрывают принципов действия. Наиболее эффективными, как показывает практика, являются комбинированные модели (натурно-математические и физико-математические) [11], совместно с имеющимися фундаментальными моделями и непрерывно поступающей информацией о протекании процессов. Другим возможным вариантом решения является встраивание подсистем оптимизации, в тех случаях, когда нет возможности нахождения хоть какого-либо решения на основе других моделей (или их комбинация). Однако, в этом случае возникает проблема разделе-

ния технологических уставок между контурами, в зависимости от целевых показателей.

Проблемой такого подхода является сложность применения на «большом» производстве – оператор может «потеряться» в таком объеме информации. Другой проблемой является взаимное влияние таких контуров, когда изменение уставок в одном из них оказывает влияние на остальные, что приводит к новым отклонениям с течением времени и превращается в бесконечный процесс изменения взаимно влияющих параметров.

Целесообразной представляется частичная интеграция функций управления производством с центральной АСУ ТП. Задачей управления является выработка регулирующих воздействий и корректировок уставок отдельных систем и агрегатов в соответствии с качественным и количественным заданием всего технологического комплекса.

Вариант многоагентной системы управления технологическими процессами

Одним из вариантов реализации является частичный перевод АСУ ТП в автоматический режим, когда модель цифрового советчика превращается в элемент системы регулирования в качестве модели объекта или прогнозирующей модели [12 – 14] и выдача оператору более укрупненных «советов» и диагностических сообщений. Такая многоагентная система [15] в общем виде представлена на рис. 2 (здесь U – входные воздействия; Y – выходы объектов и системы; W – внешние воздействия; Y^* – заданные параметры; ε – отклонения; u – регулирующие воздействия локальных систем; Z – параметры локальных систем; φ – операторы моделей объектов управления; f – локальные системы регулирования; A – «агенты» АСУ ТП).

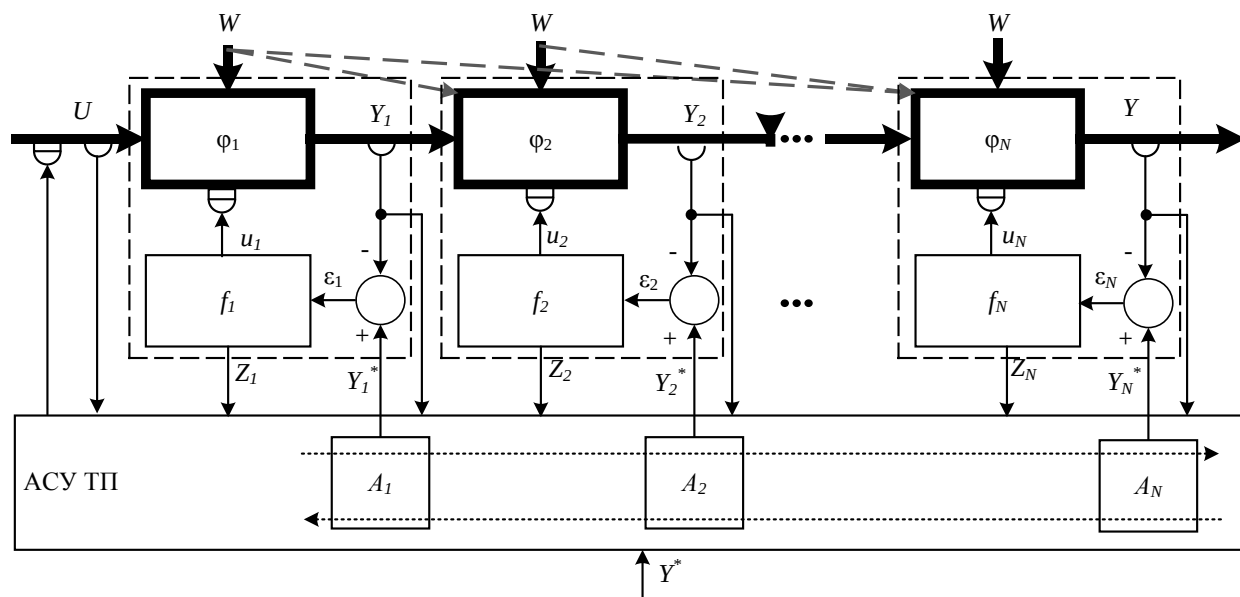


Рис. 2. Структура системы управления распределенным технологическим процессом
Fig. 2. Structure of the distributed process control system

В соответствии с теорией синтеза оптимальных систем [16] передаточная функция системы регулирования S , включающая в себя объект Φ и регулятор f , должна стремиться к единице. Наиболее рациональным вариантом является синтез «агентов» таким образом, чтобы

$$SgA \rightarrow 1 \Rightarrow A = \frac{1}{S}.$$

Построение обратной модели системы S является сложной задачей, которая не будет иметь корректных решений. В качестве вариантов можно рассматривать аппроксимацию типовыми звеньями теории автоматического регулирования (ТАР), различными нейронными сетями, экспертными системами или физическими моделями с обеспечением подобия таких систем [17].

Помимо решения задач обработки поступающей информации и корректировки параметров регулирования непосредственно в контуре ЛСУ необходимо реализовать ее интеграцию в вышестоящую АСУ ТП. В традиционном понимании под интеграцией понимают вывод диагностической информации оператору всего технологического процесса и взаимную технологическую блокировку со смежными агрегатами и системами. Это позволяет фиксировать состояние процессов в локальной системе, но не дает возможности оперативно исправить или компенсировать отклонения, возникшие на входе или выходе ее контура.

В связи с этим вышестоящая АСУ ТП должна принять на себя роль не регулирования, а управления, корректируя заданные уставки контуров

цепочки исходя из конечной цели функционирования всего комплекса. Вышестоящая АСУ ТП может содержать свои цифровые советчики для оптимизации, прогнозирования состояний процесса [18 – 20] и качественно-количественных показателей готовой продукции [21] в соответствии с кратко- и долгосрочными планами переработки (часовой, сменной, суточной, месячной и т.д.).

Технические решения

Технические решения для организации рассматриваемой структуры управления предусматривают выделение под взаимодействие с локальными системами отдельной подсети, что будет обеспечивать сокращение времени реакции на изменения за счет исключения систем АСУ ТП, которые зачастую реализуются на отдельных серверах и станциях и отдельной офисной информационной сети, что не позволяет считать их средствами реального времени. Для примера на рис. 3 представлена проектная схема комплекса технических средств главного корпуса ОФ «Шахта № 12».

Выводы

Достоинства представленной структуры заключается в сокращении времени передачи информации между ЛСУ для регулирования исполнительных механизмов и технологического управления в ответ на изменение условий технологического процесса, а также комплексное регулирование и поддержание стабильных показателей технологических процессов для обеспечения заданного объема и качества продукта.

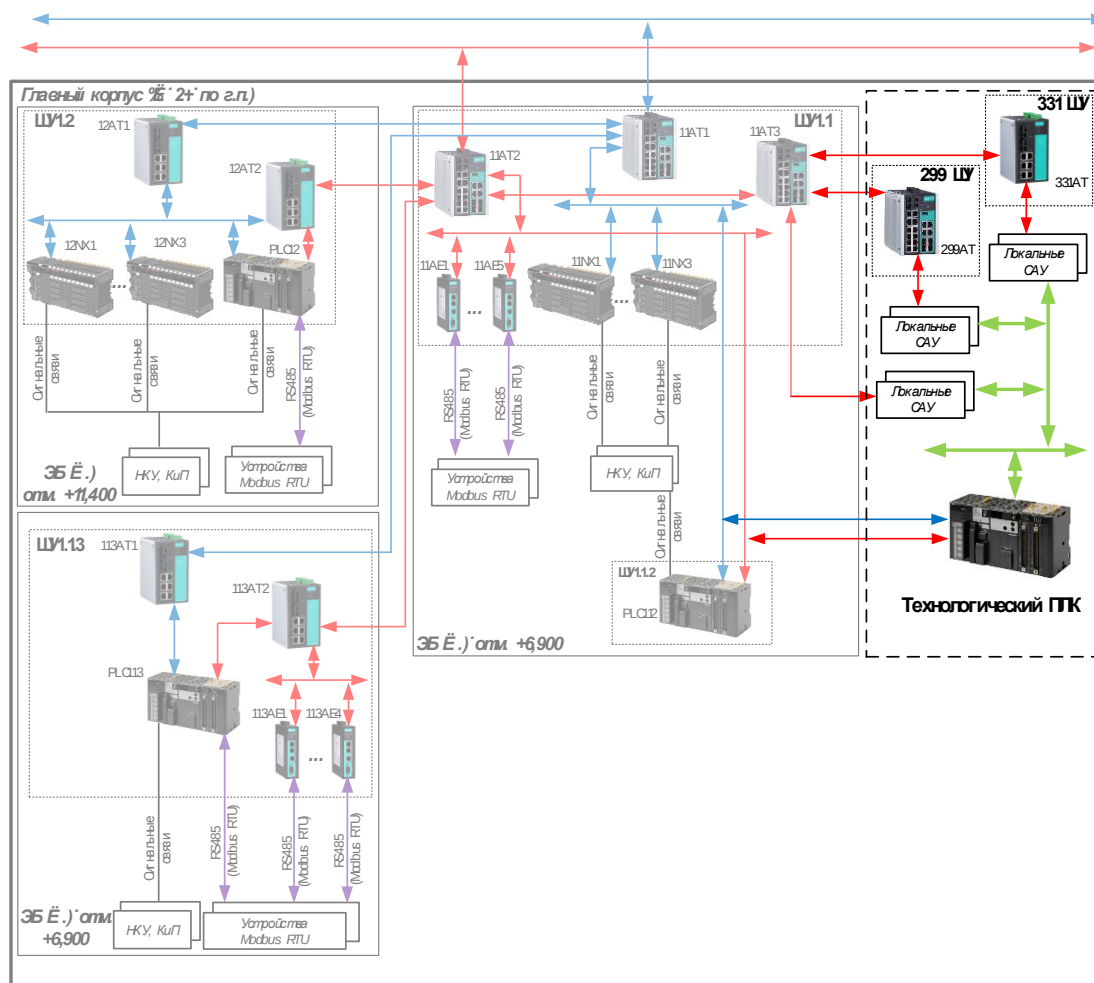


Рис. 3. Схема комплекса технических средств АСУ ТП главного корпуса ОФ «Шахта № 12»

Fig. 3. The scheme of the complex of technical means of the automated control system of the main building of the Mine no. 12

Недостатки структуры в том, что каждая ЛСУ должна иметь открытую систему управления или иметь дополнительные программные теги относящиеся к системе регулирования и влияющие на математическое обеспечение системы, а также необходимо проводить дополнительные смежные настроечные работы для увязки смежных ЛСУ между собой для оперативного реагирования на изменение технологического процесса или объема и качества входящего или заданного продукта. Большая часть локально поставляемых АСУ ТП зарубежного производства являются закрытыми, что делает актуальными задачи реверс-инжиниринга не только механических изделий, а комплексного реверс-инжиниринга систем и технологий в целом [22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Есенбаев Т.Д. Автоматизация проектирования систем локального управления в АСУ ТП АЭС. В кн.: Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Достижения вузовской науки: от теории к практике», Кумертау, 21 апреля 2022 г. Мелеуз: Государственное унитарное предприятие «Мелеузовская городская типография», 2022. С. 48–52.
2. Загидулин И.Р., Саламатин А.С., Макаров Г.В., Коршунов С.Ю. Особенности интеграции локальных систем управления в АСУТП обогатительной фабрики. В кн.: Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве). AS'2021. Труды XIII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Новокузнецк, 2-3 декабря 2021 г. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021. С. 155–159.
3. Tsiryapkina A.V., Myshlyaev L.P., Ivushkin K.A., Gracheva V.V. Control systems for objects with positive internal feedback // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. P. 943–948. <https://doi.org/10.3103/S0967091215120141>
4. Албагачиев А.Ю., Краско А.С., Радаикин Д.А. Необходимость применения автоматизированных систем в 21 веке. Предпосылки появления цифрового производства // Кузнеч-

- но-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2023. № 2. С. 62–74.
5. Ghobakhloo Morteza. Industry 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 252. P. 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
 6. Görner S., Luse A., Maheshwari N., Malladi R., Mori L., Samek R. The potential of advanced process controls in energy and materials // McKinsey & Company, 2020. URL: https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-potential-of-advanced-process-controls-in-energy-and-materials#. (Дата обращения: 28.08.2023).
 7. Helgers H., Schmidt A., Lohmann L.J., Vetter F.L., Juckers A., Jensch C., Mouellef M., Zobel-Roos S., Strube J. Towards Autonomous Operation by Advanced Process Control-Process Analytical Technology for Continuous Biologics Antibody Manufacturing // *Processes*. 2021. Vol. 9. No. 1. P. 172. <https://doi.org/10.3390/pr9010172>
 8. Клебанов Д.А., Макеев М.А. Цифровые советчики для угольной промышленности. Методология внедрения // *Уголь*. 2022. № 8 (1157). С. 112–115. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-8-112-115>
 9. Спирин Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Шнайдер Д.А., Краснобаев А.В., Гурин И.А. Цифровая трансформация пирометаллургических технологий: состояние, научные проблемы и перспективы развития // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Т. 64. № 8. С. 588–598. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>
 10. Chambers R., Beaney P. The potential of placing a digital assistant in patients' homes // *British Journal of General Practice*. 2019. Vol. 70. No. 690. P. 8–9. <https://doi.org/10.3399/bjgp20X707273>
 11. Евтушенко В.Ф., Ивушкин А.А., Венгер К.Г. О натурно-модельном подходе и теории подобия применительно к системам управления. 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 г. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. С. 21–24.
 12. Емельянов С.В., Коровин С.К., Мышляев Л.П. Теория и практика прогнозирования в системах управления. Кемерово; Москва: Издательское объединение «Российские университеты»: Кузбассвуиздат АСТШ. 2008. 487 с.
 13. Krasovskii A.A., Platonov A.S. Stability, Control and Differential Games: Proceedings of the International Conference. Lecture Notes in Control and Information Sciences – Proceedings, Yekaterinburg, 16-20 September 2019. Switzerland: Springer Nature, 2020. P. 27–37. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42831-0_3.
 14. Amrit R., Canney W., Carrette P., Linn R., Martinez A., Singh A., Skrovanek T., Valiquette J., Williamson J., Zhou J., Cott B.J. Platform for Advanced Control and Estimation (PACE): Shell's and Yokogawa's Next Generation Advanced Process Control Technology // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48. No. 8. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.148>
 15. Вяткин А.Ю., Смирнов Д.В., Кочетов И.А. Многоагентные системы как возможность реализации систем поддержки принятия решений. В кн.: *Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции*. 2015. № 1-2. С. 234–238.
 16. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. Москва: Энергия, 1973. 439 с.
 17. Мышляев Л.П., Ивушкин А.А., Евтушенко В.Ф., Бурков В.Н., Макаров Г.В., Буркова Е.В. Применение физических моделей в задачах испытания и настройки систем управления (на примере установки сжигания водоугольного топлива). В кн.: *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2015. № 2. С. 211–218.
 18. Hewing L., Wabersich K.P., Menner M., Zeilinger M.N. Learning-based model predictive control: Toward safe learning in control // *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2020. Vol. 3. P. 269–296. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-control-090419-075625>
 19. Berberich J., Köhler J., Müller M.A., Allgöwer F. Data-driven model predictive control with stability and robustness guarantees // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2020. Vol. 66. No. 4. P. 1702–1717. <https://doi.org/10.1109/TAC.2020.3000182>
 20. Kuhn M., Johnson K. Feature engineering and selection: A practical approach for predictive models. Chapman and Hall/CRC; 2019. 310 p. <http://dx.doi.org/10.1080/00031305.2020.1790217>
 21. Горайнов С., Красильников А., Райффершайд А., Кланке Ш. Предиктивный ассистент контроля качества МНЛЗ. В кн.: *Литейное производство и металлургия, 2017. Беларусь. Сборник трудов 25-й Международной научно-технической конференции*, Минск, 18-19 октября, Минск: БНТУ, 2017. С. 169–179.

22. Тагильцев-Галета К.В., Кольчурина И.Ю., Коршунов С.Ю., Макаров Г.В. Концепция системного реверс-инжиниринга в условиях комплексного замещения производственных технологий. В кн.: Современные технологии и реверс-инжиниринг. Сборник статей Всероссийских научно-практических конференций («Современные технологии: проблемы и перспективы», 17 – 20 апреля 2023 г. «Перспективные технологии реверс-инжиниринга и быстрого прототипирования», 10-12 мая 2023 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Севастопольский государственный университет, Политехнический институт, Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2023. С. 184–187.

REFERENCES

1. Esenbaev T.D. Automation of the design of local control systems in the automated control system of the NPP. In: *Collection of materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation "Achievements of university science: from theory to practice"*, Kumertau, April 21, 2022. Meleuz: State Unitary Enterprise "Meleuz city Printing House", 2022, pp. 48–52. (In Russ.).
2. Zagidulin I.R., Salamatina A.S., Makarov G.V., Korshunov S.Yu. Features of integration of local control systems in the automated control system of the processing plant. In: *Automation Systems (in Education, Science and Production): AS'2021: Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference (with international participation)*, Novokuznetsk, 02-03 December 2021. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2021, pp. 155–159. (In Russ.).
3. Tsiryapkina A.V., Myshlyaev L.P., Ivushkin K.A., Gracheva V. V. Control systems for objects with positive internal feedback. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, pp. 943–948. <https://doi.org/10.3103/S0967091215120141>
4. Albagachiev A.Yu., Krasko A.S., Radaikin D.A. The need to use automated systems in the 21st century. Prerequisites for the emergence of digital production. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2023, no. 2, pp. 62–74. (In Russ.).
5. Ghobakhloo Morteza. Industry 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability. *Journal of Cleaner Production*. 2020. vol. 252, pp. 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
6. Görner S., Luse A., Maheshwari N., Malladi R., Mori L., Samek R. The potential of advanced process controls in energy and materials. *McKinsey & Company*. 2020. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-potential-of-advanced-process-controls-in-energy-and-materials#/>. (Дата обращения: 28.08.2023).
7. Helgers H., Schmidt A, Lohmann L.J., Vetter F.L., Juckers A., Jensch C., Mouellef M., Zobel-Roos S., Strube J. Towards Autonomous Operation by Advanced Process Control-Process Analytical Technology for Continuous Biologics Antibody Manufacturing. *Processes*. 2021, vol. 9, no. 1, pp. 172. <https://doi.org/10.3390/pr9010172>
8. Klebanov D.A., Makeev M.A. Digital advisors for the coal industry. Implementation methodology. *Ugol'*. 2022, no. 8 (1157), pp. 112–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-8-112-115>
9. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shnaider D.A., Krasnobaev A.V., Gurin I.A. Digital transformation of pyrometallurgical technologies: State, scientific problems and prospects of development. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 588–598. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>
10. Chambers R., Beaney P. The potential of placing a digital assistant in patients' homes. *British Journal of General Practice*. 2019, vol. 70, no. 690, pp. 8, 9. <https://doi.org/10.3399/bjgp20X707273>
11. Evtushenko V.F., Ivushkin A.A., Venger K.G. On the full-scale model approach and the theory of similarity in relation to control systems. 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. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2019, pp. 21–24. (In Russ.).
12. Emel'yanov S.V., Korovin S.K., Myshlyaev L.P. *Theory and practice of forecasting in control systems*. Kemerovo; Moscow: Izdatel'skoe ob"edinenie «Rossiiskie universitety»: Kuzbassvuzizdat ASTSh, 2008, 487 p. (In Russ.).
13. Krasovskii A.A., Platov A.S. *Stability, Control and Differential Games: Proceedings of the International Conference. Lecture Notes in Control and Information Sciences – Proceedings*, Yekaterinburg, 16-20 September 2019. Switzerland: Springer Nature, 2020, pp. 27–37. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42831-0_3.
14. Amrit R., Canney W., Carrette P., Linn R., Martinez A., Singh A., Skrovanek T., Valiquette J., Williamson J., Zhou J., Cott B.J. Platform for Advanced Control and Estimation (PACE): Shell's and Yokogawa's Next Generation Advanced Process Control Technology. *IFAC-PapersOnLine*.

- 2015, vol. 48, no. 8, pp. 1–5.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.148>
15. Vyatkin A.Yu., Smimov D.V., Kochetov I.A. Multi-agent systems as an opportunity to implement decision support systems. In: *Electronic means and control systems. Materials of the reports of the International Scientific and Practical Conference*. 2015, no. 1-2, pp. 234–238. (In Russ.).
16. Rotach V.Ya. *Calculation of the dynamics of industrial automatic control systems*. Moscow: Energiya, 1973, 439 p. (In Russ.).
17. Myshlyaev L.P., Ivushkin A.A., Evtushenko V.F., Burkov V.N., Makarov G.V., Burkova E.V. Application of physical models in the tasks of testing and configuring control systems (for example, a coal-water fuel combustion plant). In: *Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources*. 2015, no. 2, pp. 211–218. (In Russ.).
18. Hewing L., Wabersich K.P., Menner M., Zeilinger M.N. Learning-based model predictive control: Toward safe learning in control. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*. 2020, vol. 3, pp. 269–296. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-control-090419-075625>
19. Berberich J., Köhler J., Müller M.A., Allgöwer F. Data-driven model predictive control with stability and robustness guarantees. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2020, vol. 66, no. 4, pp. 1702–1717. <https://doi.org/10.1109/TAC.2020.3000182>
20. Kuhn M., Johnson K. *Feature engineering and selection: A practical approach for predictive models*. Chapman and Hall/CRC. 2019, 310 p. <http://dx.doi.org/10.1080/00031305.2020.1790217>
21. Goryainov S., Krasil'nikov A., Raiffershaid A., Klanke Sh. Predictive assistant of quality control of the MNLZ. In: *Foundry and Metallurgy, 2017. Belarus: Proceedings of the 25th International Scientific and Technical Conference*, Minsk, October 18-19, Minsk : BNTU, 2017, pp. 169–179. (In Russ.).
22. Tagil'tsev-Galetka K.V., Kol'churina I.Yu., Korshunov S.Yu., Makarov G.V. The concept of system reverse engineering in the context of complex substitution of production technologies. In: *Modern Technologies and Reverse Engineering: Collection of articles of All-Russian scientific and practical conferences ("Modern technologies: Problems and prospects", April 17-20, 2023. "Promising technologies of reverse engineering and rapid prototyping", May 10-12, 2023) / Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Sevastopol State University, Polytechnic Institute, Sevastopol: Sevastopol State University, 2023, pp. 184–187. (In Russ.).*

Сведения об авторах

Сергей Юрьевич Коршунов, аспирант, Сибирский государственный индустриальный университет; главный специалист по АСУ ТП отдела механизации и автоматизации, ООО «РТ-ИНЖИНИРИНГ»
E-mail: s.korshunov@rt-eg.ru

Георгий Валентинович Макаров, к.т.н., доцент, Сибирский государственный индустриальный университет, главный инженер проекта, ООО «Научно-исследовательский центр систем автоматизации»
E-mail: gmakarov@nicsu.ru
ORCID: 0000-0002-9933-4769

Игорь Рамильевич Загидулин, аспирант, Сибирский государственный индустриальный университет, инженер, ООО «Научно-исследовательский центр систем автоматизации»
E-mail: ig.zagidulin2014@yandex.ru

Максим Максимович Свинцов, аспирант, Сибирский государственный индустриальный университет, инженер, ООО «Научно-исследовательский центр систем автоматизации»
E-mail: svintzovmax@yandex.ru

Information about the authors

Sergei Yu. Korshunov, postgraduate student, Siberian State Industrial University; Chief Automated Control System Specialist of the Department of Mechanization and Automation, RT-ENGINEERING LLC
E-mail: s.korshunov@rt-eg.ru

Georgii V. Makarov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian State Industrial University; Chief Project Engineer, LLC "Automation systems research center"
E-mail: gmakarov@nicsu.ru
ORCID: 0000-0002-9933-4769

Igor' R. Zagidulin, postgraduate student, Siberian State Industrial University, engineer, LLC "Automation systems research center"
E-mail: ig.zagidulin2014@yandex.ru

Maksim M. Svintsov, post-graduate student, Siberian State Industrial University, engineer, LLC "Automation systems research center"
E-mail: svintzovmax@yandex.ru

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

Поступила в редакцию 01.09.2023
После доработки 14.09.2023
Принята к публикации 15.09.2023

Received 01.09.2023
Revised 14.09.2023
Accepted 15.09.2023

Оригинальная статья

УДК 669.187

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-47-57

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ ИЗ ЭЛЕКТРОСТАЛИ

© 2023 г. Л. В. Думова, Е. В. Протопопов, А. А. Уманский

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

Аннотация. На основании комплексных исследований, проведенных с использованием методов оптической и электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, определена природа характерных металлургических дефектов железнодорожных рельсов производства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». Дефекты, являющиеся причиной отбраковки железнодорожных рельсов при ультразвуковом контроле их качества, преимущественно представляют собой расслоения со скоплениями неметаллических включений в виде оксидов кремния и алюминия, алюмосиликатов и сульфидов марганца. Расслоения локализуются в шейке рельсовых профилей, вытянуты в направлении прокатки, имеют длину до 2 мм. На основании статистических исследований, проведенных с использованием методики множественного регрессионного анализа для выборки из 200 плавок рельсовой стали марки Э76ХФ, установлено, что повышение длительности и интенсивности продувки расплава инертным газом при обработке на агрегате ковш-печь, уменьшение окисленности стали на выпуске из дуговой электропечи, снижение содержания серы, фосфора, меди и олова в готовой стали обуславливают уменьшение отбраковки рельсов по внутренним дефектам. Анализ относительной степени и механизмов влияния каждого из перечисленных параметров на вероятность образования внутренних дефектов рельсов позволил установить, что основное влияние на отбраковку рельсов по дефектам металлургического происхождения оказывают окисленность стали на выпуске из печи и параметры (длительность и интенсивность продувки инертным газом) ее продувки инертным газом в ковше. Металлографическими исследованиями проб расплава рассматриваемой рельсовой стали после внепечной обработки и проб, отобранных от непрерывнолитых заготовок, подтверждено, что снижение содержания кислорода в стали на выпуске из печи совместно с увеличением длительности и интенсивности продувки расплава инертным газом в сталеразливочном ковше значительно снижают загрязненность жидкой стали и непрерывнолитых заготовок оксидными, силикатными и сульфидными неметаллическими включениями, то есть потенциально уменьшают интенсивность образования внутренних дефектов рельсов.

Ключевые слова: рельсовая сталь, дуговая электропечь, внепечная обработка, непрерывнолитые заготовки, железнодорожные рельсы, внутренние дефекты, неметаллические включения

Для цитирования: Думова Л.В., Протопопов Е.В., Уманский А.А. Анализ процессов формирования металлургического качества железнодорожных рельсов из электростали // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 47 – 57. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-47-57](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-47-57)

Original article

ANALYSIS OF PROCESSES FORMATION OF METALLURGICAL QUALITY OF RAILWAY RAILS FROM ELECTRIC STEEL

© 2023 L. V. Dumova, E. V. Protopopov, A. A. Umanskii

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

Abstract. Based on comprehensive studies conducted using optical and electron microscopy methods, X-ray phase analysis, the nature of characteristic metallurgical defects of railway rails manufactured by JSC EVRAZ ZSMK has been determined. These defects, which are the cause of rejection of railway rails during ultrasonic quality control, are mainly stratifications with accumulations of non-metallic inclusions in the form of silicon and aluminum oxides, aluminosilicates and manganese sulfides. Such bundles are localized in the neck of the rail profiles, elongated in the direction of rolling and have a length of up to 2 mm. Based on statistical studies conducted using the multiple regression analysis technique for a sample of 200 melts of E76XF grade rail steel, it was found that an increase in the duration and intensity of purging the melt of rail steel with an inert gas during processing on the ladle furnace unit, a decrease in the oxidation of steel at the outlet of an electric arc furnace, a decrease in sulfur, phosphorus, copper and tin in the finished steel cause a reduction in the rejection of rails for internal defects. The analysis of the relative degree of influence and the mechanisms of influence of each of the listed parameters on the probability of the formation of internal defects of rails allowed us to establish that the main influence on the amount of rejection of rails for defects of metallurgical origin is the oxidation of steel at the outlet from the furnace and the parameters of its purging with inert gas in the bucket (duration and intensity of purging with inert gas). Metallographic studies of melt samples of the specified rail steel after out-of-furnace processing and samples taken from continuously cast billets of this steel confirmed that a decrease in the oxygen content in the steel at the outlet from the furnace, together with an increase in the duration and intensity of purging the melt with inert gas in the steel ladle significantly reduce the contamination of liquid steel and continuously cast billets with oxide, silicate and sulfide non-metallic inclusions, that is, potentially reduce the intensity of the formation of internal defects of the rails.

Keywords: rail steel, electric arc furnace, out-of-furnace processing, continuously cast billets, railway rails, internal defects, non-metallic inclusions

For citation: Dumova L.V., Protopopov E.V., Umanskii A.A. Analysis of metallurgical quality formation processes of railway rails made of electric steel. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 47 – 57. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-47-57](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-47-57)

Введение

Повышение эксплуатационной стойкости железнодорожных рельсов является крайне актуальной проблемой, от решения которой во многом зависит успешность функционирования отечественной экономики. Недостаточная пропускная способность железнодорожных путей является фактором, в значительной степени сдерживающим повышение товарооборота со странами Азии. Особенно негативно это сказывается на функционировании различных отраслей промышленности с учетом текущей геополитической ситуации.

Многочисленные исследования [1 – 6] показывают, что на эксплуатационную стойкость железнодорожных рельсов определяющее влияние оказывает их металлургическое качество, то есть наличие и размеры дефектов металлургического происхождения, в том числе скоплений неметаллических включений.

В настоящее время можно выделить ряд основных направлений по повышению металлургического качества рельсов за счет совершенствования технологии производства рельсовой стали. Первым из указанных направлений является совершенствование состава металлозавалки. Имеются исследования, обосновывающие продуктивность использования «чистого лома» с пониженной концентрацией примесей цветных металлов [7], эффективность применения горячебрикетированного железа взамен традицион-

ных видов металлошихты с целью снижения содержания вредных примесей (серы, фосфора, цветных металлов) в стали [8]. Ко второму направлению можно отнести совершенствование режимов обработки расплава рельсовой стали в ковше. В работах [9, 10] представлено описание новых режимов раскисления рельсовой стали при обработке на агрегате ковш-печь (АКП), обеспечивающих возможность лучшей флотации продуктов раскисления и трансформации оставшихся в металле продуктов раскисления в глобулы. Проведенные в работе [11] термодинамические расчеты раскисления рельсовой стали силикокальцием и алюмокальцием позволили разработать технологию внепечной обработки, обеспечивающую повышение чистоты расплава по неметаллическим включениям. Исследования по модифицированию рельсовой стали редкоземельными металлами в процессе внепечной обработки на АКП и вакууматоре [12] свидетельствуют о снижении загрязненности рельсовой стали оксидными включениями, повышении степени десульфурации и уменьшении концентрации кислорода в хрупкоразрушенных неметаллических включениях. Третье направление включает в себя исследования по улучшению ассимиляции неметаллических включений шлаком в промежуточном ковше МНЛЗ. Результаты работы [13] свидетельствуют о возможности значительного улучшения ассимилирующей способности шлака за счет применения шлакообразующей смеси

(ШОС) на основе пылевидных отходов из аспирационных установок производства алюминия, ферросилиция и извести. Улучшению процесса ассимиляции неметаллических включений также способствует организация направленной гидродинамики металла в промежуточном ковше МНЛЗ за счет применения струегасителей и перегородок [14, 15].

Целью настоящей работы является анализ влияния параметров выплавки рельсовой стали в дуговой электропечи и ее внепечной обработки на отбраковку рельсов по внутренним дефектам в условиях АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК). Необходимо отметить, что на сегодняшний день основная масса железнодорожных рельсов в России производится из электростали в условиях АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (примерно 80 % от общего объема производства железнодорожных рельсов). Выплавка рельсовой стали в дуговых электропечах является отличительной особенностью отечественного рельсового производства от ведущих зарубежных производителей железнодорожных рельсов (Япония, Австрия, Франция, США – в указанных странах рельсы производят из конвертерной стали) [16]. Технологическая схема производства рельсовой стали на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» включает в себя выплавку стали в дуговой электропечи, обработку на агрегате ковш-печь и камерном вакууматоре, а также разливку на МНЛЗ в заготовки сечением 300 × 365 мм. В электросталеплавильном цехе освоено производство рельсовой стали с использованием в шихте 30 – 50 % чугуна (первоначально жидкого, в настоящее время чушкового) [17 – 19]. Непрерывная разливка стали осуществляется на модернизированной МНЛЗ с применением электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторе и технологии «мягкого» обжата формируемых заготовок [20]. Производство рельсов осуществляется на новом универсальном рельсобалочном стане, запущенном в эксплуатацию в 2013 г. [21]. Сортмент рассматриваемого стана включает в себя дифференцированно термоупрочненные рельсы длиной до 100 м [22, 23]. При этом 100 % рельсов подвергаются ультразвуковому контролю качества структуры в потоке стана, отбраковка по результатам которого в настоящее время находится на уровне 2 – 3 % от общего объема производства.

Тематика настоящей работы является актуальной как для АО «ЕВРАЗ ЗСМК», так и для отечественной экономики в целом.

Методика проведения исследований

Исследования проводили в три этапа. На первом этапе исследовали природу характерных дефектов рельсов, являющихся причинами их отбраковки при ультразвуковом контроле качества. Для исследова-

ния таких дефектов использовали металлографический анализ (оптический микроскоп OLYMPUS GX-51), для определения вида неметаллических включений в областях локализации дефектов – рентгенофазовый анализ (дифрактометр Shimadzu XRD-6000). Объектами анализа выступили рельсы от 50 плавов стали марки Э76ХФ текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Указанная марка рельсовой стали является в настоящее время наиболее массовой и используется для производства рельсов общего назначения.

Второй этап включал в себя статистический анализ влияния параметров выплавки и внепечной обработки указанной рельсовой стали на отбраковку рельсов по результатам ультразвукового контроля. Для анализа выбрали следующие параметры:

- состав металлошихты (доля твердого чугуна и металлического лома различных категорий в металлозавалке);
- температура выпуска стали из печи;
- окисленность стали перед выпуском из печи;
- удельные расходы шлакообразующих материалов на выпуске стали из печи в ковш;
- длительность и интенсивность продувки аргоном и азотом при обработке на АКП;
- температура окончания обработки стали на АКП;
- удельные расходы шлакообразующих материалов при обработке на АКП;
- химический состав шлака АКП (содержание оксидов и основность);
- длительность обработки под вакуумом;
- интенсивность продувки в процессе вакуумирования;
- длительность и интенсивность очистительной продувки после снятия вакуума;
- температура окончания вакуумной обработки;
- расход шлакообразующих в процессе вакуумной обработки.

При проведении статистических исследований использовали стандартную методику множественного регрессионного анализа. Исследования проводили на выборке из 200 плавов рельсовой стали марки Э76ХФ.

На третьем этапе провели анализ загрязненности рельсовой стали после внепечной обработки непрерывнолитых заготовок неметаллическими включениями. В качестве объекта исследований использовали образцы, отобранные от 20 плавов с условно «благоприятным» (10 плавов) и «неблагоприятным» (10 плавов) сочетанием технологических параметров, оказывающих значимое влияние на образование металлургических дефектов (перечень параметров определен по результатам предыдущего этапа статистических исследований). Для отбора проб

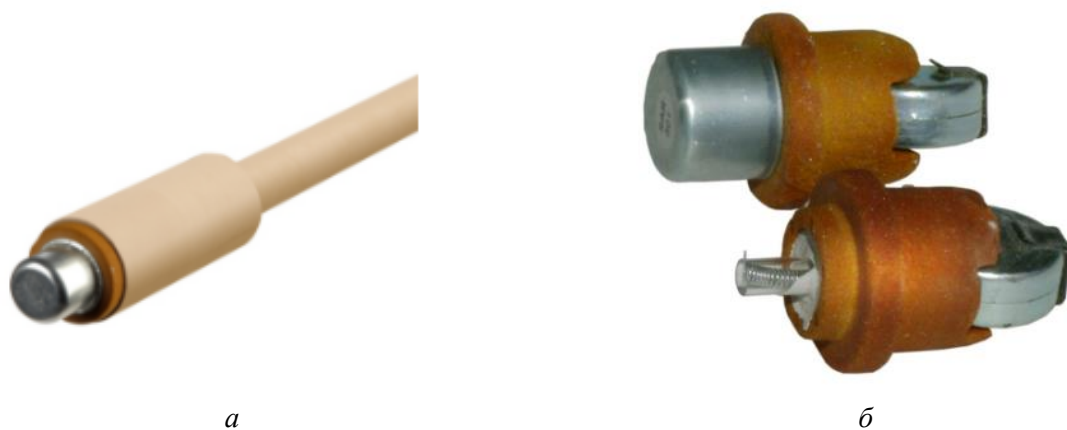


Рис. 1. Погружной пробоотборник:
 а – общий вид; б – головка пробоотборника
 Fig. 1. Submersible sampler:
 а – general view; б – sampler head

от расплава использовали одноразовые погружные пробоотборники (рис. 1), которые одеваются на манипулятор. Продолжительность погружения пробоотборника в расплав составляет 5 – 10 сек., глубина погружения находится ниже уровня шлака, но не превышает 2/3 от длины пробоотборника. В процессе погружения колпачок расплавляется и жидкая сталь по кварцевой трубке поступает в изложницу.

Анализ загрязненности неметаллическими включениями проб расплава рельсовой стали проводили с использованием стандартной методики по ГОСТ 1778 – 70, согласно которой загрязненность включениями плавки определяется по формуле:

$$I = \frac{b \sum a_i m_i}{l}, \quad (1)$$

где b – цена деления окулярной шкалы при данном увеличении, мкм; a_i – средний размер включений (в делениях окулярной шкалы); m_i – количество включений; l – длина подсчета, мкм.

Для оценки загрязненности неметаллическими включениями непрерывнолитых заготовок рельсовой стали использовали методику полуколичественного анализа, заключающуюся в сравнении неметаллических включений, выявленных в шлифах при увеличении в 100 крат, со стандартными (эталонными) пятибалльными шкалами (наименее загрязненные пробы оцениваются баллом 1, наиболее загрязненные – 5). Определение типа характерных неметаллических включений в непрерывнолитых заготовках проводили с использованием метода электронной микроскопии (растровый электронный микроскоп Philips SEM 515).

Результаты исследований и их обсуждение

Металлографическими исследованиями характерных дефектов рельсов из стали марки Э76ХФ, выявленными в ходе ультразвукового контроля и являющимися причинами отбраковки рельсов, установлено, что дефекты преимущественно (в 95 % случаев) представляют собой расслоения (внутренние трещины) со скоплениями неметаллических включений. Расслоения локализуются в шейке рельсовых профилей, вытянуты в направлении прокатки и имеют длину до 2 мм (фрагменты дефекта приведены на рис. 2).

С использованием рентгенофазового анализа установлено, что в зоне расположения расслоений имеются скопления оксидов кремния и алюминия, алюмосиликатов и сульфидов марганца (рис. 3).

На основании результатов множественного регрессионного анализа выборки плавки стали марки Э76ХФ установлено, что значимое влияние на отбраковку рельсов по внутренним дефектам оказывают окисленность стали на выпуске из ДСП; длительность и интенсивность продувки инертным газом при обработке на АКП; содержание серы, фосфора, меди и олова в готовой стали:

$$\begin{aligned} \text{Бр} = & -9,1 + 0,016[\text{O}] - 0,088\text{Д}_{\text{пр}} - \\ & - 0,122\text{И}_{\text{пр}} + 726,4[\text{S}] + 472,6[\text{P}] + \\ & + 27[\text{Cu}] + 464,3[\text{Sn}], \end{aligned} \quad (2)$$

где Бр – отбраковка, %; $[\text{O}]$ – содержание кислорода в стали на выпуске из печи в ковш, %; $\text{Д}_{\text{пр}}$ – длительность продувки инертным газом на АКП, мин.; $\text{И}_{\text{пр}}$ – интенсивность продувки инертным газом на АКП, м³/ч; $[\text{S}]$, $[\text{P}]$, $[\text{Cu}]$ и $[\text{Sn}]$ – содержание серы, фосфора, меди и олова, %.

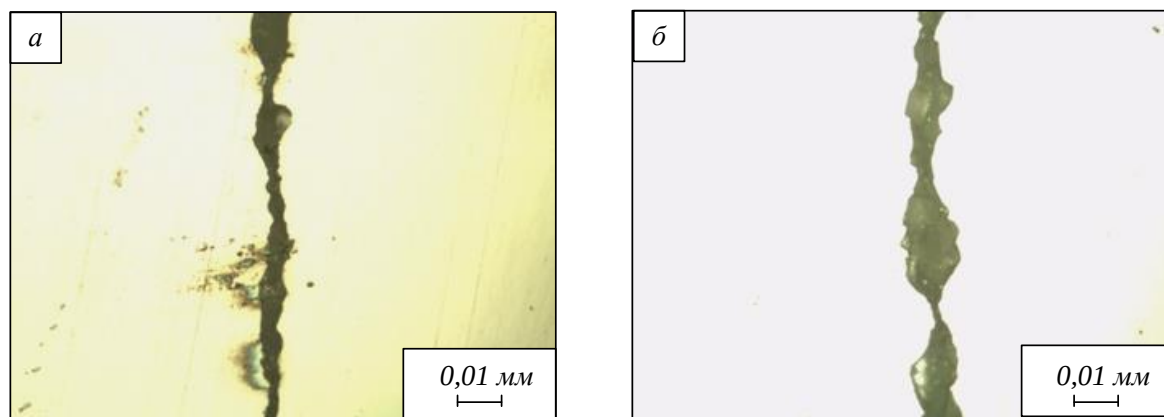


Рис. 2. Фрагменты расслоения в шейке рельса стали марки Э76ХФ:

а – начало фрагмента; б – конец фрагмента

Fig. 2. Fragments of delamination in the neck of the E76F steel rail corresponding to the end section of the defect
а – the beginning of the fragment; б – the end of the fragment

Увеличение содержания кислорода в расплаве на выпуске из печи, то есть перед его раскислением в ковше повышает загрязненность стали первичными оксидными неметаллическими включениями (SiO_2 , Al_2SiO_5 , Al_2O_3). Последние выявлены в местах нахождения внутренних дефектов рельсов (рис. 3) и являются основной причиной образования самих дефектов, поскольку являются недеформируемыми (непластичными) или хрупкоразрушенными (способными вытягиваться в строчки при деформации, однако разрушающиеся при достижении критического значения).

Увеличение продолжительности и интенсивности продувки расплава инертным газом в ковше при обработке на АКП обуславливает более полное удаление неметаллических включений из металла в шлак, что снижает вероятность формирования скоплений неметаллических включений и, соответственно уменьшает вероятность образования внутренних дефектов рельсов.

Повышение содержания серы в стали закономерно приводит к росту концентрации сульфидов в готовых рельсах. Такие включения образуются в процессе кристаллизации стали, по-

этому на их концентрацию оказывает влияние содержание серы в готовой стали. В местах локализации дефектов имеют место скопления сульфидов марганца (рис. 3), а сульфиды железа практически не обнаружены. Это обусловлено высоким содержанием марганца в рассматриваемой рельсовой стали (0,75 – 1,25 % согласно требований ГОСТ Р 51685 – 2013). Механизм влияния данных включений на образование дефектов рельсов связан с различиями коэффициентов их линейного расширения по отношению к основному металлу. В случае наличия включений MnS относительно большого размера или их скоплений между такими включениями и основным металлом после затвердевания формируются микропустоты. Заваривание указанных пустот в процессе дальнейшей горячей прокатки не происходит по причине различной пластичности включений MnS и основного металла, а также наличия вышеприведенных непластичных или хрупкоразрушенных первичных неметаллических включений в местах локализации дефекта.

Механизм отрицательного влияния повышенного содержания меди и олова на качество стального проката заключается в увеличении

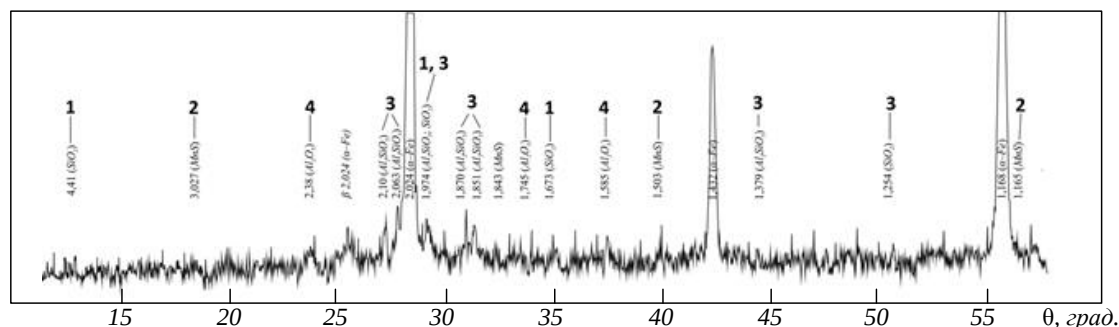


Рис. 3. Рентгенограмма области расслоения в шейке рельса стали марки Э76ХФ:

1 – SiO_2 ; 2 – MnS; 3 – Al_2SiO_5 ; 4 – Al_2O_3

Fig. 3. Radiograph of the delamination area in the neck of the E76F steel rail:

1 – SiO_2 ; 2 – MnS; 3 – Al_2SiO_5 ; 4 – Al_2O_3

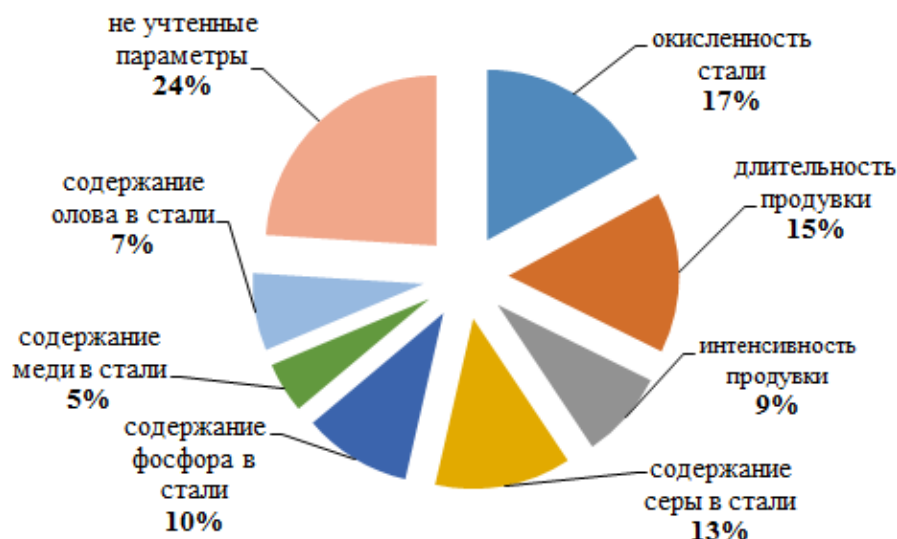


Рис. 4. Относительная степень влияния параметров производства рельсовой стали на отбраковку рельсов по внутренним дефектам

Fig. 4. The relative degree of influence of the parameters of the production of rail steel on the rejection of rails for internal defects

вероятности образования трещин за счет снижения горячей пластичности стали. Примеси цветных металлов имеют значительную склонность к ликвации, что обуславливает их выраженное отрицательное воздействие на качество стальных изделий даже при относительно низких среднеплавочных концентрациях таких элементов в расплаве [24, 25]. Влияние фосфора на вероятность образования дефектов также связано со снижением пластичности стали и обусловлено скоплениями мелких включений фосфидов по границам зерен металла.

Необходимо отметить, что исходя из природы характерных дефектов рельсов (рис. 2, 3) повышенное содержание меди, олова и фосфора в стали выступает в качестве дополнительного фактора, снижающего пластичность материала. Основное влияние на образование дефектов оказывает формирование скоплений первичных оксидных и силикатных неметаллических включений, а также включений MnS.

Проведенный анализ (рис. 4) показал, что вышеприведенные параметры производства рельсовой стали (см. уравнение (1)) в порядке убывания их относительной степени влияния на

вероятность образования внутренних дефектов рельсов распределяются следующим образом: длительность продувки инертным газом, окисленность стали на выпуске из печи, содержания серы и фосфора в стали, интенсивность продувки инертным газом, содержание олова и меди в стали. При этом 24 % относится к влиянию параметров, не учтенных при проведении анализа.

Исследованиями проб расплава рельсовой стали после внепечной обработки, проведенными с использованием оптического микроскопа OLYMPUS GX-51, определено, что при минимальных значениях продолжительности и интенсивности продувки инертным газом в ковше и максимальной окисленности стали на выпуске из печи (в рамках рассматриваемого интервала изменения указанных параметров, табл. 1) загрязненность расплава неметаллическими включениями выше в 1,28 раза по сравнению с наиболее благоприятным сочетанием данных факторов (повышенными длительностью и интенсивностью продувки и наименьшей окисленностью стали). На основании исследований проб непрерывнолитых заготовок, проведенных методом оптической микроскопии, установлено

Т а б л и ц а 1

Загрязненность неметаллическими включениями расплава рельсовой стали марки Э76ХФ после внепечной обработки
Contamination by non-metallic inclusions of the melt of E76F grade rail steel after extra-furnace treatment

Сочетание технологических параметров	Интервал изменения технологических параметров			Загрязненность расплава неметаллическими включениями (И)
	длительность продувки инертным газом в ковше, мин.	интенсивность продувки инертным газом в ковше, м ³ /ч	окисленность стали на выпуске из печи, ppm	
Благоприятное	40 – 46	23,8 – 27,4	552 – 578	18
Неблагоприятное	114 – 128	46,3 – 50,1	172 – 199	23

Загрязненность неметаллическими включениями непрерывнолитых заготовок рельсовой стали Э76ХФ
Contamination with non-metallic inclusions of continuously cast billets of rail steel E76F

Сочетание технологических параметров	Максимальный балл неметаллических включений по ГОСТ 1778 – 70				
	Силикаты недеформирующиеся	Силикаты пластичные	Оксиды точечные	Оксиды строчечные	Сульфиды
Благоприятное*	2б	2а	1а	–	1б
Неблагоприятное**	5а	3а	4а	4а	3б

Примечание. * – длительность продувки инертным газом в ковше 43 – 48 мин.; интенсивность продувки инертным газом в ковше 22,4 – 29,6 м³/ч; окисленность стали на выпуске из печи 565 – 589 ppm; ** – длительность продувки инертным газом в ковше 105 – 119 мин.; интенсивность продувки инертным газом в ковше 45,4 – 49,2 м³/ч; окисленность стали на выпуске из печи 186 – 201 ppm.

аналогичное влияние вышеприведенных факторов на загрязненность оксидными силикатными и сульфидными неметаллическими включениями. Определено, что оксидные, силикатные и сульфидные неметаллические включения в непрерывнолитых заготовках от плавок, при которых имела место высокая окисленность стали на выпуске из печи в сочетании с низкой продолжительностью и интенсивностью продувки инертным газом в ковше, имеют больший размер и концентрацию при обратном сочетании значений указанных параметров (низкая окисленность стали

при повышенной длительности и интенсивности продувки инертным газом, табл. 2).

С использованием метода электронной микроскопии установлено, что характерные неметаллические включения в непрерывнолитых заготовках рельсовой стали, концентрация которых является наибольшей в центральной зоне заготовок, представляют собой сульфиды марганца (рис. 5, а), оксиды кремния (рис. 5, б) и алюминия (рис. 5, в), а также силикаты алюминия (рис. 5, г).

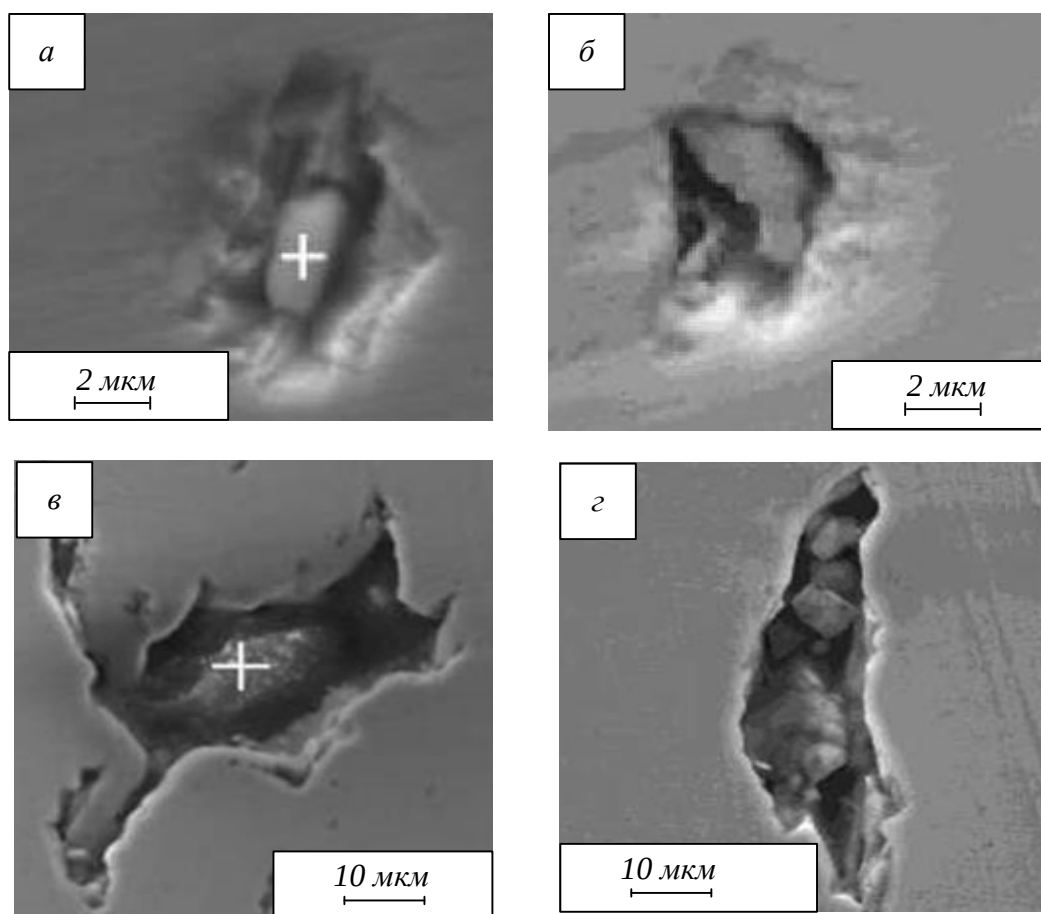


Рис. 5. Характерные неметаллические включения в непрерывнолитых заготовках рельсовой стали марки Э76ХФ
 Fig. 5. Characteristic non-metallic inclusions in continuously cast billets of E76F grade rail steel

Обобщение полученных результатов позволяет констатировать, что для условий АО «ЕВРАЗ ЗСМК» определяющее влияние на образование внутренних дефектов рельсов, являющихся причинами их отбраковки в процессе ультразвукового контроля, оказывают окисленность стали на выпуске из печи и параметры ее продувки инертным газом (длительность и интенсивность продувки) в процессе обработки на агрегате ковш-печь. Регулируя указанные параметры, возможно, значительно снизить концентрацию окисдных, силикатных и сульфидных неметаллических включений в расплаве рельсовой стали, что обусловит уменьшение интенсивности образования внутренних дефектов в непрерывнолитых заготовках и готовых рельсах.

Выводы

На основании комплексных исследований природы металлургических дефектов рельсов из электростали производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» определено, что на вероятность их образования наиболее значительное влияние оказывают окисленность рельсовой стали на выпуске из дуговой электропечи и параметры ее продувки инертным газом в процессе обработки на агрегате ковш-печь. Снижение окисленности рельсовой стали в совокупности с повышением длительности и интенсивности ее продувки инертным газом в ковше в рамках существующего интервала изменения указанных параметров приводит к значительному снижению загрязненности непрерывнолитых заготовок и рельсов окисдными, силикатными и сульфидными неметаллическими включениями и, тем самым, способствует уменьшению количества внутренних дефектов рельсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головатенко А.В., Коновалов А.Н., Полевой Е.В., Мамонтов М.М., Юнусов А.М. О влиянии условных дефектов, выявленных УЗК, на потребительские свойства рельсов // *Сталь*. 2019. № 7. С. 72–74.
2. Aglan H., Gan Y.X. Fatigue crack growth analysis of a premium rail steel // *Journal of Materials Science*. 2001. Vol. 36. No. 2. P. 389–397. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004872427903>
3. Franklin F.J., Garnham J.E., Fletcher D.I., Davis C.L., Kapoor A. Modelling rail steel microstructure and its effect on crack initiation // *Wear*. 2008. Vol. 265. No. 9-10. P. 1332–1341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.027>
4. Larijani N., Brouzoulis J., Ekh M., Schilke M. The effect of anisotropy on crack propagation in pearlitic rail steel // *Wear*. 2014. Vol. 314. No. 1-2. P. 57–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.034>
5. Cen Y., Chen L., Dong R., Zhou Q. Effect of self-tempering on fatigue crack growth of heavy rail steel // *Materials Review*. 2021. Vol. 35. No. 12. P. 12136 – 12140. <http://dx.doi.org/10.11896/j.issn.1005-023X.2017.014.023>
6. Cen Ya., Chen L., Chunjiao J., Wang H., Bao X. Fatigue crack growth behavior of eutectoid steel rail // *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*. 2022. Vol. 37. No. 3. P. 507 – 512. <http://dx.doi.org/10.1007/s11595-022-2558-3>
7. Shabanov P.A., Volkov K.V., Kuznetsov E.P., Aleksandrov I.V. Changing the Technical-Economic Indices of Rail-Steel Production by Sorting Scrap Based on its Content of Residual Elements // *Metallurgist*. 2014. Vol. 58. No. 5-6. P. 500 – 503. <http://dx.doi.org/10.1007/s11015-014-9941-z>
8. Umanskii A.A., Boikov D.V., Kuznetsov E.P., Tverskoi A.B., Zakharova T.P. Electrosmelting of rail steel from directly reduced iron // *Steel in Translation*. 2019. Vol. 49. No. 7. P. 478–480. <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091219070131>
9. Годик Л.А., Козырев Н.А., Гизатулин Р.А., Нохрина О.И., Бойков Д.В. Освоение технологии выплавки рельсовой стали низкотемпературной надежности с пониженным содержанием водорода. В кн.: Вестник Горно-Металлургической Секции Российской Академии Естественных Наук. Отделение Metallurgii: Сборник научных трудов. Вып. 27. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2011. С. 81–84.
10. Pavlov V.V., Godik L.A., Kozyrev N.A., Tokarev A.V., Timmerman N.N. Ladle treatment of low-temperature rail steel // *Steel in Translation*. 2008. Vol. 38. No. 3. P. 231–233. <http://dx.doi.org/10.3103/S096709120803011X>
11. Grigorovich K.V., Garber A.K., Kushnarev A.V., Petrenko Y.P., Kostenko I.V. Optimizing the ladle treatment of rail steel at OAO NTMK // *Steel in Translation*. 2008. Vol. 38. No. 10. P. 858–863. <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091208100161>
12. Смирнов Л.А., Ровнушкин В.А., Добужская А.Б., Юнин Г.Н., Полевой Е.В., Бойков Д.В., Спирин С.А. Влияние модифицирования РЗМ на формирование неметаллических включений в высокоуглеродистых сталях // *Сталь*. 2016. № 11. С. 21–28.
13. Dementiev V.P., Negoda A.V., Kozyrev N.A., Peretyatko V.N. Slag-forming mixture for continuous casting of rail steel // *Steel in Translation*. 2002. Vol. 32. No. 6. P. 24–26.

14. Числавлев В.В., Неунывакина Д.Т., Фейлер С.В. Оптимизация процессов рафинирования рельсовой стали в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок. В кн.: Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2015. С. 109–112.
15. Числавлев В.В., Фейлер С.В. Исследование гидродинамических процессов в промежуточном ковше методами физического моделирования. В кн.: Кузбасс: образование, наука, инновации. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2016. С. 483 – 485.
16. Golovatenko, A.V., Umansky A.A., Dorofeev V.V. Analysis of the main trends in the development of rail production in Russia and abroad // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. P. 012002. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/150/1/012002>
17. Катунин А.И., Годик Л.А., Обшаров М.В., Козырев Н.А., Тиммерман Н.Н. Применение жидкого чугуна в дуговых электропечах // Металлург. 2000. № 6. С. 32.
18. Годик Л.А., Козырев Н.А., Данилов А.П., Захарова Т.П., Тиммерман Н.Н. Использование жидкого чугуна при выплавке стали в дуговых электропечах // Электromеталлургия. 2002. № 1. С.9–14.
19. Katunin A.I., Godik L.A., Kozyrev N.A., Timmerman N.N., Sychev P.E. Smelting rail steel in arc furnaces using liquid iron // Steel in Translation. 2001. Vol. 31. No. 1. P. 19–21.
20. Волков К.В., Кузнецов Е.П., Бойков Д.В., Сапаев Н.М., Захарова Т.П. Освоение производства рельсовой стали на модернизированной МНЛЗ № 1 ЭСПЦ ОАО ЕВРАЗ ЗСМК // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 6 (1374). С. 25–30.
21. Головатенко А.В., Волков К.В., Александров И.В., Кузнецов Е.П., Дорофеев В.В., Сапелкин О.И. Ввод в эксплуатацию универсального рельсобалочного стана и освоение технологии производства рельсов на современном оборудовании в рельсобалочном цехе ОАО ЕВРАЗ ЗСМК // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 6 (1374). С. 32–38.
22. Юрьев А.Б., Юнин Г.Н., Головатенко А.В., Дорофеев В.В., Полевой Е.В. Разработка и внедрение первой в России технологии производства дифференцированно-термоупрочненных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева // Сталь. 2016. № 11. С. 33–35.
23. Полевой Е.В., Юнин Г.Н., Темлянцев М.В. Разработка и промышленное освоение технологии дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 10. С. 704–714.
24. Kuznetsov I.S., Prakhov A.E., Umanskii A.A., Rubtsov Yu.T. Influence of technological factors on the surface quality of structural-steel billet // Steel in Translation. 2008. Vol. 38. No. 4. P. 318–321. <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091208040141>
25. Жульев С.И., Гузенков С.А., Данилин В.В. Совместное влияние примесных элементов в высококачистой стали на конструкционную прочность металлоизделий // Известия вузов. Черная металлургия. 2004. № 5. С. 48–50.

REFERENCES

1. Golovatenko A.V., Konovalov A.N., Polevoi E.V., Mamontov M.M., Yunusov A.M. On the Impact of Conditional Defects Detected by UZK on the Consumer Properties of Rails. *Stal'*. 2019, no. 7, pp.72–74. (In Russ.).
2. Aglan H., Gan Y.X. Fatigue crack growth analysis of a premium rail steel. *Journal of Materials Science*. 2001, vol. 36, no. 2, pp. 389–397. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004872427903>
3. Franklin F.J., Garnham J.E., Fletcher D.I., Davis C.L., Kapoor A. Modelling rail steel microstructure and its effect on crack initiation. *Wear*. 2008, vol. 265, no. 9-10, pp. 1332–1341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.027>
4. Larijani N., Brouzoulis J., Ekh M., Schilke M. The effect of anisotropy on crack propagation in pearlitic rail steel. *Wear*. 2014, vol. 314, no. 1-2, pp. 57–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.034>
5. Cen Y., Chen L., Dong R., Zhou Q. Effect of self-tempering on fatigue crack growth of heavy rail steel. *Materials Review*. 2021, vol. 35, no. 12, pp. 12136–12140. <http://dx.doi.org/10.11896/j.issn.1005-023X.2017.014.023>
6. Cen Ya., Chen L., Chunjiao J., Wang H., Bao X. Fatigue crack growth behavior of eutectoid steel rail. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*. 2022, vol. 37, no. 3, pp. 507–512. <http://dx.doi.org/10.1007/s11595-022-2558-3>
7. Shabanov P.A., Volkov K.V., Kuznetsov E.P., Aleksandrov I.V. Changing the Technical-Economic Indices of Rail-Steel Production by Sorting Scrap Based on its Content of Residual Elements. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 5-6,

- pp. 500–503. <http://dx.doi.org/10.1007/s11015-014-9941-z>
8. Umanskii A.A., Boikov D.V., Kuznetsov E.P., Tverskoi A.B., Zakharova T.P. Electrosmelting of rail steel from directly reduced iron. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, no. 7, pp. 478–480. <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091219070131>
 9. Godik L.A., Kozyrev N.A., Gizatulin R.A., Nokhrina O.I., Boikov D.V. Mastering the technology of smelting low-temperature reliability rail steel with reduced hydrogen content. In: *Bulletin of the Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy: Collection of scientific papers. Issue 27*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2011, pp. 81–84. (In Russ.).
 10. Pavlov V.V., Godik L.A., Kozyrev N.A., Tokarev A.V., Timmerman N.N. Ladle treatment of low-temperature rail steel. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 3, pp. 231–233. <http://dx.doi.org/10.3103/S096709120803011X>
 11. Grigorovich K.V., Garber A.K., Kushnarev A.V., Petrenko Y.P., Kostenko I.V. Optimizing the ladle treatment of rail steel at OAO NTMK. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 10, pp. 858–863. <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091208100161>
 12. Smirnov L.A., Rovnushkin V.A., Dobuzhskaya A.B., Yunin G.N., Polevoi E.V., Boikov D.V., Spirin S.A. The effect of REM modification on the formation of non-metallic inclusions in high-carbon steels. *Stal'*. 2016, no. 11, pp. 21–28. (In Russ.).
 13. Dementiev V.P., Negoda A.V., Kozyrev N.A., Peretyatko V.N. Slag-forming mixture for continuous casting of rail steel. *Steel in Translation*. 2002, vol. 32, no. 6, pp. 24–26.
 14. Chislavlev V.V., Neunyvakhina D.T., Feiler S.V. Optimization of rail steel refining processes in the intermediate ladle of the continuous casting machine. In: *Science and youth: problems, search, solutions*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2015, pp. 109–112. (In Russ.).
 15. Chislavlev V.V., Feiler S.V. Study of hydrodynamic processes in the intermediate bucket using physical modeling methods. In: *Kuzbass: education, science, innovation*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2016, pp. 483–485. (In Russ.).
 16. Golovatenko, A.V., Umansky A.A., Dorofeev V.V. Analysis of the main trends in the development of rail production in Russia and abroad. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 012002. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/150/1/012002>
 17. Katunin A.I., Godik L.A., Obsharov M.V., Kozyrev N.A., Timmerman N.N. Application of liquid cast iron in arc electric furnaces. *Metallurg*. 2000, no.6, pp. 32. (In Russ.).
 18. Godik L.A., Kozyrev N.A., Danilov A.P., Zakharova T.P., Timmerman N.N. Use of molten iron in steel smelting in arc electric furnaces. *Elektrometallurgiya*. 2002, no. 1, pp. 9–14. (In Russ.).
 19. Katunin A.I., Godik L.A., Kozyrev N.A., Timmerman N.N., Sychev P.E. Smelting rail steel in arc furnaces using liquid iron. *Steel in Translation*. 2001, vol. 31, no. 1, pp. 19–21.
 20. Volkov K.V., Kuznetsov E.P., Boikov D.V., Sapaev N.M., Zakharova T.P. Mastering the production of rail steel at the upgraded MNLS No. 1 ESPC of EVRAZ ZSMK OJSC. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*. 2014, no. 6 (1374), pp. 25–30. (In Russ.).
 21. Golovatenko A.V., Volkov K.V., Aleksandrov I.V., Kuznetsov E.P., Dorofeev V.V., Sapelkin O.I. Commissioning of a universal rail mill and mastering the technology of rail production using modern equipment in the rail workshop of EVRAZ ZSMK OJSC. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*. 2014, no. 6 (1374), pp. 32–38. (In Russ.).
 22. Yur'ev A.B., Yunin G.N., Golovatenko A.V., Dorofeev V.V., Polevoi E.V. Development and implementation of the first in Russia technology for the production of differentiated-heat-reinforced rails using heat of rolling heating. *Stal'*. 2016, no. 11, pp. 33 – 35. (In Russ.).
 23. Polevoi E.V., Yunin G.N., Temlyantsev M.V. Development and industrial development of the technology of differential thermal treatment of railway rails using heat of rolling heating. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 10, pp. 704 – 714. (In Russ.).
 24. Kuznetsov I.S., Prakhov A.E., Umanskii A.A., Rubtsov Yu.T. Influence of technological factors on the surface quality of structural-steel billet. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 4, pp. 318 – 321. <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091208040141>
 25. Zhuliev S.I., Guzenkov S.A., Danilin V.V. Joint effect of impurity elements in high-purity steel on structural strength of metal products. *Izvestiya. Ferrous metallurgy* 2004, no. 5, pp. 48 – 50. (In Russ.).

Сведения об авторах

Любовь Валерьевна Думова, соискатель кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: doumova@bk.ru

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: protopopov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7554-2168

Александр Александрович Уманский, д.т.н., директор института металлургии и материаловедения, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: umanskii@bk.ru

ORCID: 0000-0003-4403-9006

Information about the authors

Lyubov' V. Dumova, candidate of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals, Siberian State Industrial University

E-mail: doumova@bk.ru

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: protopopov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-7554-2168

Aleksandr A. Umanskii, Dr. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Metallurgy and Materials Science, Siberian State Industrial University

E-mail: umanskii@bk.ru

ORCID: 0000-0003-4403-9006

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.08.2023

После доработки 24.08.2023

Принята к публикации 25.08.2023

Received 10.08.2023

Revised 24.08.2023

Accepted 25.08.2023

Original article

УДК 539.27:669.14.018.294.2

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-58-71

STRENGTHENING MECHANISMS OF RAIL STEEL UNDER COMPRESSION

© 2023 Yu. F. Ivanov¹, M. A. Porfir'ev², V. E. Gromov², N. A. Popova³, Yu. S. Serenkov²,
A. N. Siddiquee⁴, V. V. Shlyarov²

¹**Institute of High Current Electronics SB RAS** (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

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

³**Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering** (Solyanaya Square 2, Tomsk 634003, Russian Federation)

⁴**Jamia Millia Islamia** (Jamia Nagar, New Delhi-110025, India)

Abstract. Strain hardening of steels is an effective approach to changing the structural-phase state and properties. Understanding the mechanisms of formation of structural-phase states and properties of pearlitic steel during plastic deformation is crucial for controlling the process of de-formation behavior. The importance of knowledge in this area is due to serious problems in the field of physical materials science, as well as the practical consequences of the use of pearlitic steel, which is widely used in the railway industry. Currently, there is great interest in understanding the general relationships characterizing strain hardening. This interest is associated with the possibility of developing a complex theory of this phenomenon and studying the dislocation mechanisms that determine the observed stress-strain curves $\sigma(\epsilon)$. It is noteworthy that advances have been made in the field of strength physics, in particular in understanding the dislocation structure of bainitic and martensitic steels. These advances have contributed to expanding our understanding of strain hardening phenomena. Present work the evolution of structural-phase states and dislocation substructure of rail steel under uniaxial compression to the degree of 50 % was studied by transmission electron microscopy. The obtained data formed the basis for a quantitative analysis of the mechanisms of rail steel strengthening at degrees of deformation by compression 15, 30, 50 %. Contributions to the strengthening caused by the friction of matrix lattice, dislocation substructure, presence of carbide particles, internal stress fields, solid solution and substructural strengthening, pearlite component of the steel structure are estimated. Using the adaptivity principle, which assumes the independent action of each of the strengthening mechanisms, the dependence of rail steel strength on the degree of plastic deformation by compression is estimated. A comparative analysis of the stress-strain curves $\sigma(\epsilon)$ obtained experimentally and calculated theoretically is performed.

Keywords: stress-strain curve; rail steel; structure; dislocation substructure; strengthening mechanisms; additive yield strength; electron microscopy

For citation: Ivanov Yu.F., Porfir'ev M.A., Gromov V.E., Popova N.A., Serenkov Yu.S., Siddiquee A.N., Shlyarov V.V. Strengthening mechanisms of rail steel under compression. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 58 – 71. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-58-71](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-58-71)

Оригинальная статья

МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ПРИ СЖАТИИ

© 2023 г. Ю. Ф. Иванов¹, М. А. Порфирьев², В. Е. Громов², Н. А. Попова³,
Ю. С. Серенков², А. Н. Сиддики⁴, В. В. Шляров²

¹Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)²Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)³Томский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, 634003, Томск, пл. Соляная, 2)⁴Джамиа Миллия Исламия (Джамиа Нагар, Нью-Дели-110025, Индия)

Аннотация. Деформационное упрочнение сталей – эффективный подход к изменению структурно-фазового состояния и свойств. Понимание механизмов образования структурно-фазовых состояний и свойств перлитной стали при пластической деформации имеет решающее значение для управления процессом деформационного поведения. Важность знаний в этой области обусловлена серьезными проблемами в области физического материаловедения, а также практическими последствиями применения перлитной стали, широко используемой в железнодорожной отрасли. В настоящее время существует большой интерес к пониманию общих зависимостей, характеризующих деформационное упрочнение. Этот интерес связан с возможностью разработки комплексной теории этого явления и исследования дислокационных механизмов, обуславливающих наблюдаемые кривые напряжение – деформация. Примечательно, что были достигнуты успехи в области физики прочности, в частности, в понимании дислокационной структуры бейнитных и мартенситных сталей. Эти достижения способствовали расширению понимания явлений деформационного упрочнения. В настоящей работе методом просвечивающей электронной микроскопии изучена эволюция структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры рельсовой стали при одноосном сжатии до степени 50 %. Полученные данные легли в основу количественного анализа механизмов упрочнения рельсовой стали при степенях деформации сжатием 15, 30 и 50 %. Проведена оценка вклада в упрочнение, обусловленного трением решетки матрицы, дислокационной субструктурой, наличием карбидных частиц, полями внутренних напряжений, твердорастворным и субструктурным упрочнением, перлитной составляющей структуры стали. С использованием принципа адаптивности, предполагающего независимое действие каждого из механизмов упрочнения, оценена зависимость прочности рельсовой стали от степени пластической деформации сжатием. Проведен сравнительный анализ кривых напряжение – деформация $\sigma(\epsilon)$, полученных экспериментально и рассчитанных теоретически.

Ключевые слова: кривая напряжение – деформация, рельсовая сталь, состав, дислокационная субструктура, механизмы упрочнения, аддитивный предел текучести, электронная микроскопия

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Порфирьев М.А., Громов В.Е., Попова Н.А., Серенков Ю.С., Сиддики А.Н., Шляров В.В. Механизмы упрочнения рельсовой стали при сжатии // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 58 – 71. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-58-71](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-58-71)

Introduction

Deformation strengthening of steels is one of the ways to change the structural-phase state and properties characterizing the fracture resistance [1 – 7]. Knowledge of the formation patterns of structural-phase states and properties of pearlite steel during plastic deformation is necessary to control the process of deformation behaviour. The importance of information in this field is determined by the depth of fundamental problems in physical materials science, on the one hand, and the practical significance of the problem, on the other hand, since the rails are made of pearlitic steel [8 – 19].

At present, the general dependencies that characterise strain hardening attract the most interest as they can be applied for constructing a theory of this phenomenon, on the one hand, and studying dislocation mechanisms explaining the observed type of

curves $\sigma(\epsilon)$, on the other. Certain success in development of ideas about dislocation structures of bainitic and martensitic steels has been achieved in strength physics [20]. However, we should note that dislocation steel structure and its evolution during deformation are insufficiently studied. This is especially true of the quantitative parameters of dislocation ensemble. Little attention is paid to fragmentation processes. Internal stress fields were examined mainly by the X-ray diffraction method, local stress fields are understudied [21, 22].

The transmission diffraction electron microscopy method, due to its high resolution, makes it possible to conduct in-depth analysis of defects in steels and therefore is the most effective means of detailed investigation of dislocation substructure [23, 24]. Development

Table 1

Chemical composition of the rail steel
Химический состав рельсовой стали

Element	C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni	Cu	Ti	Mo	V	Al
Quantity, % (wt.)	0.73	0.75	0.58	0.42	0.012	0.007	0.07	0.13	0.003	0.006	0.04	0.003

of new special types of rails (for high-speed movement, low-temperature reliability, resistance to contact fatigue and wear, etc.) should be based on knowledge of the mechanisms of structural and phase changes and fine substructure under deformation. The mechanisms of rails strengthening at different volumes of the passed tonnage were evaluated in [25 – 28], and the evolution of lamellar pearlite of rail steel under compression deformation was analysed in [29, 30].

The purpose of this work is a comparative analysis of experimental stress-strain curves $\sigma(\varepsilon)$ and the mechanisms of rail steel strengthening, obtained on the basis of a quantitative assessment, under compression deformation.

Research methods and principles

Differentially heat-strengthened rails of DT350 category manufactured by Evraz ZSMK JSC, produced from evacuated electric steel E76KhF in accordance with the technical requirements TU 0921-276-01124333-2021, were studied. The chemical composition of the rail steel is shown in Table 1. Five rectangular samples with a size of 5×5×10 mm were cut from the rail head and subjected to deformation. Uniaxial compression deformation was carried out at a room temperature on Instron 3369 (Great Britain) testing machine at a loading speed of 1.2 mm/min.

The steel structure was studied using transmission electron diffraction microscopy (JEOL JEM 2100F, Japan). The objects of research for transmission electron microscopy (foils ranging in thickness from 150 to 200 nm) were made by electrolytic thinning of plates cut by methods of electric spark erosion of metal from the central part of the sample in the direction perpendicular to the compression axis. The structural and phase state of steel subjected to deformation by 15, 30 and 50 % was analysed.

The images of the material fine structure obtained during its examination in the electron microscope were necessary to identify the morphological components of the structure and their volume fractions, determine the size, distribution density and volume fraction of cementite particles, as well as their localization, and define the parameters of the material fine structure in each morphological component (scalar ρ and excess $\rho_{\pm}$ dislocation density, amplitudes of curvature-torsion of the crystal lattice χ and internal stresses).

The volume fractions of morphological components were determined by the planimetric method measuring the total cross-sectional area of the given structural component on a certain area of the foil [31]:

$$\delta = \frac{1}{S_t} \sum_{i=1}^n S_{ni}, \quad (1)$$

where S_t – total area of the image; $\sum_{i=1}^n S_{ni}$ – total surface area, occupied by the corresponding morphological component of the structure. The volume fractions were defined by the continuous sections of the sample with an area of $\sim 100 \mu\text{m}^2$ at a magnification in the microscope column of ~ 10000 times.

The sizes of cementite particles and the distances between them were determined in each morphological component by micrographs using direct measurement [32]. In pearlite of lamellar morphology (not destroyed pearlite), only the transverse size of cementite particles was measured, in a ferrite-carbide mixture (destroyed pearlite) and fragmented perlite – the longitudinal and transverse dimensions, in steel deformed to $\varepsilon = 50\%$ – only diameter:

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N N_i R_i; \quad \bar{L} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N N_i L_i, \quad (2)$$

where N_i – number of particles in a given size class; R_i and L_i – average transverse and longitudinal particle sizes, in this class; n – number of classes; N – total number of measurements.

The number of measurements ranged from 40 to 50.

The average distance between cementite particles was determined by the secant method using microphotographs [32].

The volume fraction of particles of carbide phases in the body of structural components was determined by the formula [33]:

$$\delta = V_p / tr^2, \quad (3)$$

where V_p – average particle volume; t – foil thickness; r – distance between particles.

The scalar density of dislocations in each morphological component of the steel structure was determined by the methods [23]. Its values were calculated using the formula:

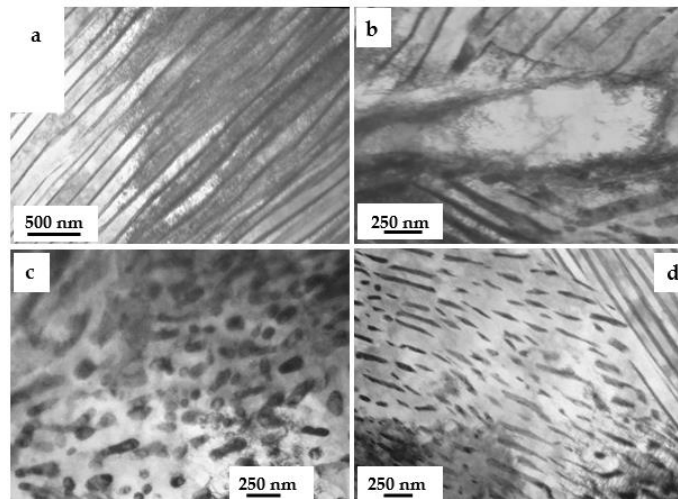


Fig. 1. TEM images of the rail structure before deformation
Рис. 1. Изображения рельсовой конструкции до деформации

$$\langle \rho \rangle = \frac{M}{t} \left(\frac{n_1}{l_1} + \frac{n_2}{l_2} \right), \quad (4)$$

where n_1 and n_2 – number of intersections of horizontal and vertical lines with length l_1 and l_2 by dislocations; M – magnification of the micrograph; t – foil thickness (200 nm).

The average scalar dislocation density was determined taking into account the volume fraction of each type of morphological components of the steel structure according to the formula:

$$\langle \rho \rangle = \sum_{i=1}^Z P_{vi} \rho_i, \quad (5)$$

where P_{vi} – volume fraction of the material occupied by the i -th type of morphological component of the steel structure; Z – its volume fraction; ρ_i – scalar density of dislocations in this morphological component.

The excess dislocation density was calculated by the disorientation gradient:

$$\rho_{\pm} = \frac{1}{b} \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} \quad (6)$$

where b – Burgers vector; $\chi = \partial \varphi / \partial \lambda$ – amplitude of the curvature-torsion of the crystal lattice; $\partial \varphi$ – inclination angle of the foil in the microscope column; $\partial \lambda$ – displacement of the extinction contour.

Results and Discussion

Transmission electron microscopy of thin foils established that the steel structure is represented by pearlite grains of plate morphology (Fig. 1, a), grains of structurally free ferrite (ferrite grains that do not contain carbide particles in the bulk phases) (Fig. 1, b) and ferrite grains, in the volume of which

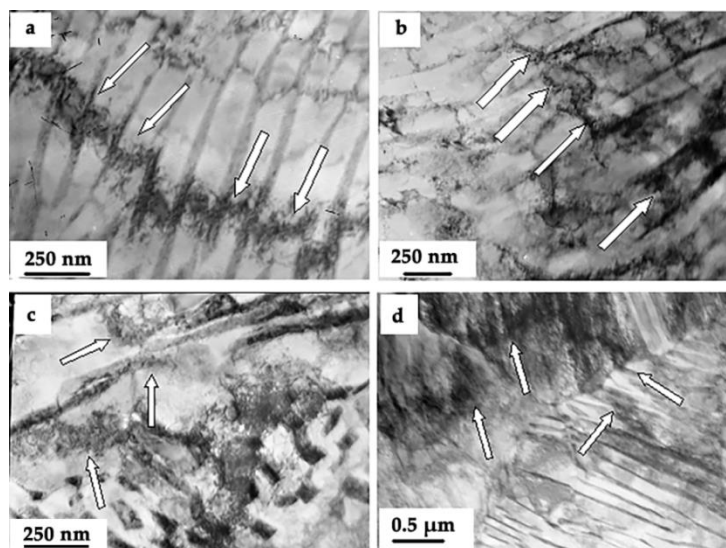
cementite particles are observed mainly in the form of short plates (Fig. 1, d), and globular particles (Fig. 1, c). As a rule, the volumes of steel with globular particles and particles in the form of short plates are observed separately, which made it possible to estimate their relative content in the material being equal to 1:10.

It can be noted that the relative volume fraction of grains of structurally free ferrite is small and varies from 0.01 to 0.05 of the steel structure. The relative volume fraction of grains of the ferrite-carbide mixture is significantly weightier, the value of which varies in the range from 0.17 to 0.27 of the steel structure. Dislocation substructure is observed in the grain volume mainly in the form of chaotically distributed dislocations.

Plastic deformation of steel is accompanied by fragmentation of the ferritic component of steel, which becomes stronger as the degree of deformation increases. At $\varepsilon = 50\%$, the fragmented structure of steel occupies 0.4 of the volume of the examined foil. As the degree of deformation rises, the average sizes of ferrite plate fragments decrease from 240 nm ($\varepsilon = 15\%$) to 200 nm ($\varepsilon = 50\%$).

Analysis of the steel structure by transmission electron microscopy of thin foils demonstrated the presence of bend extinction contours in the electron microscopic images of pearlite grains a typical image of which is shown in Fig. 2.

The presence of bend extinction contours indicates curvature-torsion of the crystal lattice of the analysed foil region. The performed studies show that the sources of curvature-torsion of the crystal lattice (stress concentrators) are mainly the interfaces between ferrite and cementite plates. In most of the observed cases, the contours are located perpendicular to the interface (Fig. 2, a). The source of the curvature-torsion of the crystal lattice of the material can also be the ends of the cementite plates (Fig. 2, b, c), as well as the interfaces of pearlite grains (Fig. 2, d).

Fig. 2. Electron microscopic image of bend extinction contours (indicated by arrows) ($\epsilon = 30\%$)Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение контуров экстинкции изгиба (обозначено стрелками) ($\epsilon = 30\%$)

Dissolution and cutting of cementite plates are observed simultaneously with the fragmentation of ferrite plates. Carbon atoms, transferred from the cementite crystal lattice to dislocations, are carried into the interplate space and form nanoscale (15 – 20 nm) cementite particles.

In the research literature, two mechanisms of destruction of cementite plates during the deformation

of steel with a pearlite structure are mainly discussed. The first of them consists in cutting the plates by moving dislocations and carrying carbon atoms into ferrite in the field of dislocation stresses (Fig. 3, a). The estimates show, that in this case, the maximum effect of cementite decomposition cannot exceed tenths of a percent of the available amount of cementite.

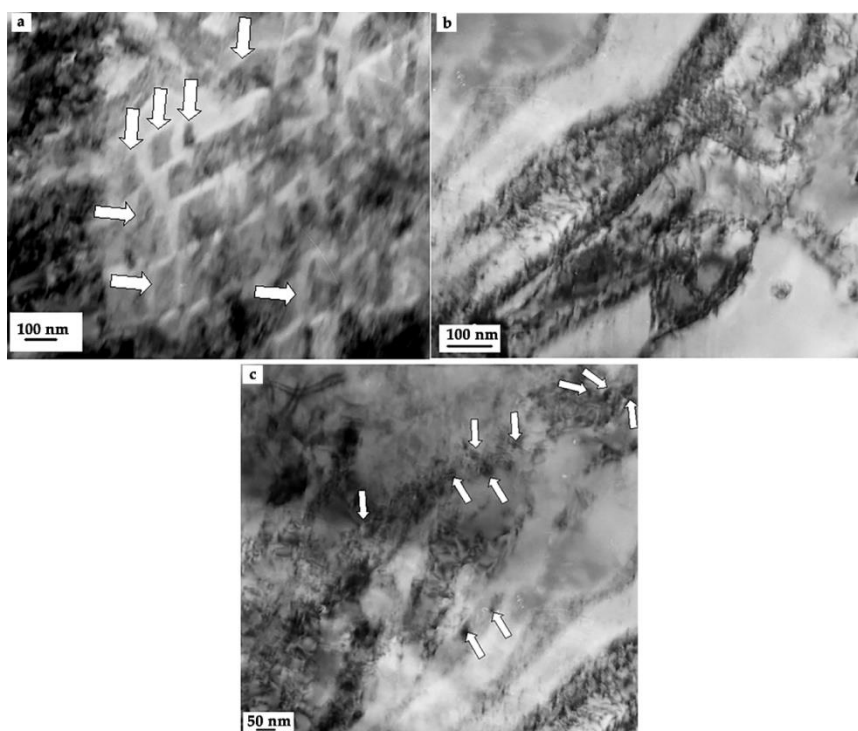
Fig. 3. TEM image of the structure of a pearlite colony at the stage of cutting cementite plates (indicated by arrows) by gliding dislocations ($\epsilon = 15\%$) (a); at the stage of dissolution ($\epsilon = 30\%$) (b); at the stage of the formation of nanosized cementite particles (indicated by arrows) ($\epsilon = 50\%$) (c)

Рис. 3. ПЭМ-изображение структуры колонии перлита на стадии разрезания пластин цементита (обозначено стрелками) скользящими дислокациями ($\epsilon = 15\%$) (a); на стадии растворения ($\epsilon = 30\%$) (b); на стадии формирования наноразмерные частиц цементита (обозначены стрелками) ($\epsilon = 50\%$) (c)

The second mechanism consists in the pulling of carbon atoms from the lattice of the carbide phase during the plastic deformation by dislocations (Fig. 3, *b*). Because of a noticeable difference in the average binding energy of carbon atoms with dislocations (0.6 eV) and with iron atoms in the cementite lattice (0.4 eV) this process leads to the formation of Cottrell atmospheres [29]. At the next stage of cementite dissolution, the entire volume of the material previously occupied by the cementite plate is filled with nanosized particles. A typical image of the resulting structure is shown in Fig. 3, *c*.

The steel deformation is accompanied by transformation of dislocation substructure, namely, the quasi-homogeneous distribution of dislocations of the original steel is replaced by clusters of dislocations around cementite particles.

Samples of E76KhF steel could not be brought to fracture during compression test. They were flattened because the steel under study is capable of deforming quite strongly without fracturing. In [29, 30] we showed that the deformation strengthening of the examined steel during plastic deformation by uniaxial compression has a multi-stage character.

The revealed transformations of the steel structure will significantly affect the strength and plastic characteristics of the metal, determining the service life of the product. Evaluation of strengthening mechanisms allows the patterns connecting the parameters of the structure and the strength properties of the material to be identified and the physical nature of the evolution process of properties to be revealed. The evaluation of the hardening mechanisms was carried out using the widely tested expressions given below.

The main contributions to the deformation resistance are [33, 34]: $\sigma_0 = 35$ MPa – the friction stress of dislocations in the crystal lattice of α -iron; σ_{ss} – strengthening of a ferrite-based solid solution by atoms of alloying elements; σ_p – strengthening due to pearlite; σ_h – strengthening by dislocations “herringbone” that cut the slipping dislocations; σ_{or} – strengthening of the material by incoherent particles when bypassing them with dislocations according to Orowan mechanism; σ_i – strengthening by the internal long-range stress fields; σ_s – substructural strengthening.

The evaluation of the solid-solution strengthening of steel caused by carbon atoms and other alloying elements was performed using the empirical expression of the form [33]:

$$\sigma_{ss} = \sum_{i=1}^n C_i k_i, \quad (7)$$

where k_i – strengthening coefficient of ferrite, which is an increase in the strength of the material

at the yield point with 1 wt. % of the alloying element is dissolved in it, the value of which for various elements is determined empirically; C_i – concentration of the i -th element dissolved in ferrite, wt. %.

By the i -th element, we mean elements in quantities available at that moment in the α -solid solution.

Hardening caused by pearlite is determined by the ratio [33]:

$$\sigma_p = k_h (4.75r)^{-1/2} P_V, \quad (8)$$

where P_V – volume fraction of pearlite; r – distance between Fe_3C particles; $k_h = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ – strengthening coefficient of ferrite.

The stress required to maintain plastic deformation, i.e. the stress of the flow σ required to overcome the forces of interaction with stationary dislocations (dislocations of the “herringbone”) by moving dislocations (carriers of deformation), is related to the scalar density of dislocations by the following relation:

$$\sigma_h = m \alpha G b \sqrt{\rho}, \quad (9)$$

where m – orientation multiplier (or Schmid factor); α – dimensionless coefficient varying within 0.05 – 0.60 depending on the type of dislocation ensemble (in this work $\alpha = 0.25$, $m\alpha = 1$); G – shear modulus of the matrix material ($G = 80$ GPa); b – Burgers vector of the dislocation (0.25 nm); ρ – the average value of the scalar dislocation density.

Steel strengthening, taking into account the presence of incoherent particles of the second phase, was carried out using the ratio [34]:

$$\sigma_{or} = B \frac{mGb}{2\pi(|r-R|)} \Phi \ln \left(\left| \frac{r-R}{2b} \right| \right), \quad (10)$$

where R – average particle size; r – distance between particle centers; Φ – multiplier depending on the type of dislocation ($\Phi = 1$); B – parameter that takes into account the uneven distribution of particles in the matrix ($B = 0.85$).

Deformation is accompanied by the formation of internal stress fields in the steel. The magnitude of the plastic component of the internal stress fields can be estimated based on the ratio:

$$\sigma_{pl} = m \alpha G b \sqrt{\rho_{\pm}}. \quad (11)$$

The value of the elastic component of the internal stress fields is estimated based on the ratio:

**Quantitative parameters of steel structure in various morphological components
with different degrees of plastic deformation**
**Количественные параметры структуры стали в различных морфологических компонентах
при различной степени пластической деформации**

Structure parameters		Pearlite			Ferrite	
		Non-fractured	Fractured	Fragmented	Non-fragmented	Fragmented
$\varepsilon = 15 \%$						
Vol. fraction		70 %	24 %	3 %	1 %	2 %
Transverse size of the α -phase interlayer, nm		160	120	120		
Fragment size, nm		–	–	120×400	–	400
Fe ₃ C	size, nm	$d = 16$	12×280	12×160		
	vol. fraction	12 %	8.7 %	1.5 %		
Fraction of carbon		0.8 %	0.6 %	0.11 %		
$\rho_{\alpha} \times 10^{-10}, \text{cm}^{-2}$		1.91	2.06	2.08	2.21	~0
$\rho_{\pm} \times 10^{-10}, \text{cm}^{-2}$		1.54	1.96	2.08	2.21	
$\chi = \chi_{pl} + \chi_{el}, \text{cm}^{-1}$		385	490	$650 = 520_{pl} + 30_{el}$	$1090 = 550_{pl} + 140_{el}$	$745 = 0_{pl} + 745_{el}$
$\varepsilon = 30 \%$						
Vol. fraction		65 %	20 %	12 %	0	3 %
Transverse size of the α -phase interlayer, nm		160	120	120		
Fragment size, nm		–	–	120×200	–	200
Fe ₃ C	size, nm	$d = 18$	16×280	12×160		
	vol. fraction	12 %	4.8 %	0.92 %		
Fraction of carbon		0.8 %	0.34 %	0.07 %		
$\rho_{\alpha} \times 10^{-10}, \text{cm}^{-2}$		2.18	2.50	1.59		~0
$\rho_{\pm} \times 10^{-10}, \text{cm}^{-2}$		1.76	2.26	1.59		
$\chi = \chi_{pl} + \chi_{el}, \text{cm}^{-1}$		440	565	$435 = 395_{pl} + 40_{el}$		$745 = 0_{pl} + 745_{el}$
$\varepsilon = 50 \%$						
Vol. fraction		0	60 %	40 %	0	0
Fragment size, nm				200		
Fe ₃ C in the α -phase (inside fr.)	size, nm		$d = 12; r = 16$	$d = 16; r = 20$		
	vol. fraction		1.8 %	2.7 %		
Fraction of carbon in α -phase			0.12 %	0.19 %		
Fe ₃ C in the layers of Fe ₃ C (on border of fr.)	size, nm		$d = 14; r = 20$	$d = 16; r = 30$		
	Vol. fraction		2.7 %	1.2 %		
Fraction of carbon			0.19 %	0.09 %		
$\rho_{\alpha} \times 10^{-10}, \text{cm}^{-2}$			2.25	0		
$\rho_{\pm} \times 10^{-10}, \text{cm}^{-2}$			2.25			
$\chi = \chi_{pl} + \chi_{el}, \text{cm}^{-1}$			$575 = 560_{pl} + 15_{el}$	$55 = 0_{pl} + 55_{el}$		

Table 3

Average material parameters of the steel fine structure at different degrees of plastic deformation**Средние параметры материала тонкой структуры стали
при различных степенях пластической деформации**

Average structure parameters	$\varepsilon = 15 \%$	$\varepsilon = 30 \%$	$\varepsilon = 50 \%$
$\rho_{\alpha} \times 10^{-10}, \text{cm}^{-2}$	1.92	2.11	1.35
$\rho_{\pm} \times 10^{-10}, \text{cm}^{-2}$	1.63	1.79	1.35
$\chi = \chi_{pl} + \chi_{el}, \text{cm}^{-1}$	$425 = 410_{pl} + 15_{el}$	$470 = 445_{pl} + 25_{el}$	$365 = 335_{pl} + 30_{el}$

Table 4

Values of the contributions of various mechanisms into steel strengthening in various morphological components and in general for the material at different degrees of plastic deformation**Значения вклада различных механизмов в упрочнение стали в различных морфологических компонентах и в целом для материала при различных степенях пластической деформации**

Contributions	Pearlite			Ferrite		In the material
	Non-fractured	Fractured	Fragmented	Non-fragment	Fragmented	
$\varepsilon = 15 \%$						
Vol. fraction	70 %	24 %	3 %	1 %	2 %	100 %
σ_h , MPa	275	285	290	295	0	273
σ_{pl} , MPa	250	280	290	295	0	254
σ_{el} , MPa	0	0	40	190	1010	20
σ_s , MPa	—	—	550	—	350	25
σ_0 , MPa	35	35	35	35	35	35
σ_{ss} , MPa	80	80	260	1400	1400	130
σ_p , MPa	570	250	0			460
σ_{or} , MPa			135	0	0	5
$\varepsilon = 30 \%$						
Vol. fraction	65 %	20 %	12 %	0	3 %	100 %
σ_h , MPa	295	315	250		0	285
σ_{pl} , MPa	265	300	250		0	262
σ_{el} , MPa	0	0	55		1010	35
σ_s , MPa	—	—	835		750	125
σ_0 , MPa	35	35	35		35	35
σ_{ss} , MPa	80	315	190		1400	180
σ_p , MPa	570	250	0			420
σ_{or} , MPa			135			15
$\varepsilon = 50 \%$						
Vol. fraction	0	60 %	40 %	0	0	100 %
σ_h , MPa		300	0			180
σ_{pl} , MPa		300	0			180
σ_{el} , MPa		20	75			95
σ_s , MPa		—	750			300
σ_0 , MPa		35	35			35
σ_{ss} , MPa		315	300			310
σ_p , MPa		250	0			150
σ_{or} , MPa		1120	645			930

$$\sigma_{el} = m\alpha Gt\chi_{el}, \quad (12)$$

where t – thickness of the foil, assumed to be 200 nm; χ_{el} – elastic component of the curvature-torsion of the crystal lattice.

It was noted above that plastic deformation of steel is accompanied by intense material fragmentation. Steel strengthening during the formation of fragments (substructural strengthening) can be estimated based on the ratio [33]:

$$\sigma_s = k_s d^{-1}, \quad (13)$$

where $k_s = 150 \text{ N/m}$; d – size of the formed fragments.

The general steel strengthening in the first approximation, based on the principle of additivity, which assumes the independent action of each of the hardening mechanisms of the material, can be represented as a linear sum of the contributions of individual strengthening mechanisms [33]. However, it was proved that for dislocation mechanisms acting locally and inhomogeneously inside a single grain, such as σ_h and σ_l , and which turn out to be different in amplitude, place of action and physical meaning, summation should be performed in a quadratic approximation. Thus, the total strengthening of steel should be calculated according to the formula:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_{ss} + \sigma_p + \sigma_{or} + \sigma_s + \sqrt{(\sigma_l^2 + \sigma_h^2)}. \quad (14)$$

The results of the quantitative analysis of the steel structure obtained in this work, as well as in [29, 30], are presented in Tables 2 and 3. This made it possible to evaluate the mechanisms of steel strengthening both in each morphological component and to determine the role of each contribution to the overall steel strengthening (Table 4).

Analysing the results given in Table 4, we can note, firstly, that the strength of steel is a multifactorial value and is determined by the combined action of a number of physical mechanisms. Secondly, the strength of the metal rails depends on the degree of deformation by compression. Thirdly, the strength of the metal increases significantly at large degrees of deformation. The results of summing the contributions of the identified mechanisms to the steel strengthening, performed in the additive approximation, are presented in Fig. 4, *b*. It is clearly seen that the performed estimates are in good qualitative agreement with the behaviour of the experimental stress-strain curve (Fig. 4, *a*). The quantitative discrepancy between the corresponding experimentally obtained and estimated values of steel strength varies within 13 – 28 %. It can be assumed that one of the reasons for this discrepancy is the heterogeneity of the steel structure (the presence of grains of lamellar pearlite and grains of ferrite-carbide mixture), which, having different strengths, will make adjustments to the deformation behaviour of steel.

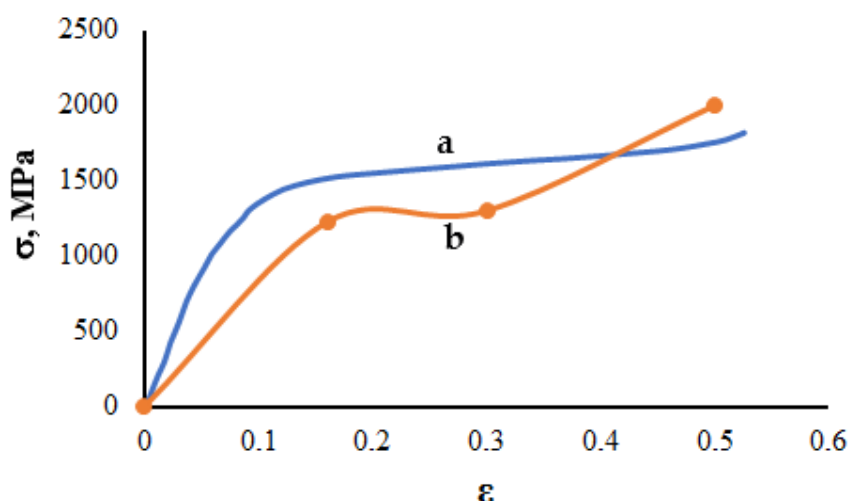


Fig. 4. Dependence $\sigma - \varepsilon$ of rail steel subjected to uniaxial compression loading:
a – experimental curve; *b* – theoretical curve

Рис. 4. Зависимость $\sigma - \varepsilon$ рельсовой стали, подвергнутой одноосному сжатию:
a – экспериментальная кривая; *b* – теоретическая кривая

Conclusions

Evaluation of strengthening mechanisms at various stages of steel deformation was carried out using the quantitative results of the study of steel structure subjected to uniaxial compression deformation. It is shown that the main strengthening factor of the examined steel at the initial stage ($\approx 15\%$) is the presence of lamellar pearlite grains. As the deformation degree rises, the role of this factor decreases due to the destruction of cementite plates. An increase in the deformation degree is accompanied by a decrease in the contribution to the steel strengthening from scalar and excessive dislocation density, which is associated with the drifting of dislocations into the boundaries of fragments. The role of contribution of the formation of a solid solution (due to the dissolution of cementite), fragmentation (due to a decrease in the size of fragments and an increase in the relative content of the fragmented structure) and incoherent particles of the carbide phase to the steel strengthening rises with the increase in the degree of steel deformation. A good qualitative agreement of the experimentally obtained and calculated values of steel strength was revealed. The revealed quantitative discrepancy between the corresponding experimentally obtained and estimated values of steel strength might be conditioned by the heterogeneity of steel structure, namely, the presence of grains of lamellar pearlite and grains of ferrite-carbide mixture, which, having different strength, will make adjustments to the deformation behaviour of the material.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батаев А.А., Батаев И.А., Никулина А.А., Попелюх А.И., Балаганский И.А., Плотнокова Н.В. Структурные преобразования углеродистых ферритно-перлитных сталей в условиях высокоскоростного нагружения // Обработка металлов. Технология. Оборудование. Инструменты. 2019. Т. 21. № 3. С. 115–128. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.3-115-128>
2. Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Klevtsova N.A., Zaripov N.G., Karavaeva M.V. Strength and fracture mechanisms of nanostructured metallic materials under single kinds of loading // Metal Science and Heat Treatment. 2018. Vol. 59. No. 9–10. P. 54–62. <https://doi.org/10.1007/s11041-018-0197-2>
3. Yang Cao, Song Ni, Xiaozhou Liao, Min Song, Yuntian Zhu Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2018. Vol. 133. P. 1–59. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.06.001>
4. Gubicza J. Lattice defects and their influence on the mechanical properties of bulk materials processed by severe plastic deformation // Materials Transactions. 2019. Vol. 60. No. 7. P. 1230–1242. <https://doi.org/10.2320/mater-trans.MF201909>
5. Mazilkin A., Straumal B., Kilmametov A., Straumal P., Baretzky B. Phase transformations induced by severe plastic deformation // Materials Transactions. 2019. Vol. 60. No. 8. P. 1489–1499. <https://doi.org/10.2320/mater-trans.MF201938>
6. Blank V.D., Popov M.Yu., Kulnitskiy B.A. The Effect of severe plastic deformations on phase transitions and structure of solids // Materials Transactions. 2019. Vol. 60. No. 8. P. 1500–1505. <https://doi.org/10.2320/mater-trans.MF201942>
7. Bubnov V.A., Korotovskikh V.K., Kostenko S.G. Effect of the degree of plastic deformation on hardness of austenitic steel // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 57. No. 11012. P. 1038–1042. <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01043-x>
8. Wang Y., Tomota Y., Harjo S., Gong W., Ohmura T. In-situ neutron diffraction during tension-compression cyclic deformation of a pearlite steel // Materials Science and Engineering: A. 2016. Vol. 676. P. 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.122>
9. Pan R., Ren R., Chen C., Zhao X. Formation of nanocrystalline structure in pearlitic steels by dry sliding wear // Materials Characterization. 2017. Vol. 132. P. 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.05.031>
10. Steenbergen M. Rolling contact fatigue: Spalling versus transverse fracture of rails // Wear. 2017. Vol. 380–381. P. 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.003>
11. Vinogradov A., Estrin Y. Analytical and numerical approaches to modelling severe plastic deformation // Progress in Materials Science. 2018. Vol. 95. P. 172–242. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.001>
12. Nikas D., Zhang X., Ahlström J. Evaluation of local strength via microstructural quantification in a pearlitic rail steel deformed by simultaneous compression and torsion // Materials Science and Engineering: A. 2018. Vol. 737. P. 341–347. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.09.067>
13. Skrypnik R., Ekh M., Nielsen J.C.O., Pålsson B.A. Prediction of plastic deformation and wear in railway crossings – Comparing the performance of two rail steel grades // Wear. 2019. Vol. 428–429. P. 302–314. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.03.019>

14. Rong K-j., Xiao Ye-l., Shen M-x., Zhao H-p., Wang W-J., Xiong G-Y. Influence of ambient humidity on the adhesion and damage behavior of wheel-rail interface under hot weather condition // *Wear*. 2021. Vol. 486-487. Article 204091. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204091>
15. Li X.C., Ding H.H., Wang W.J., Guo J., Liu Q.Y., Zhou Z.R. Investigation on the relationship between microstructure and wear characteristic of rail materials // *Tribology International*. 2021. Vol. 163. Article 107152. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107152>
16. Miranda R.S., Rezende A.B., Fonseca S.T., Sinatora A., Mei P.R. Fatigue and wear behavior of pearlitic and bainitic microstructures with the same chemical composition and hardness using twin-disc tests // *Wear*. 2022. Vol. 494-495. Article 204253. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204253>
17. Pereira H.B., Dias Alves L.H., Rezende A.B., Mei P.R., Goldenstein H. Influence of the microstructure on the rolling contact fatigue of rail steel: Spheroidized pearlite and fully pearlitic microstructure analysis // *Wear*. 2022. Vol. 498-499. Article 204299. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204299>
18. Pan R., Chen Yu., Lan H., Ren R. Investigation into the microstructure evolution and damage on rail at curved tracks // *Wear*. 2022. Vol. 504-505. Article 204420. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204420>
19. Zhang S-Yu., Spiryagin M., Lin Q., Ding H-h., Wu Q., Guo J., Liu Q-Yu., Wang W-J. Study on wear and rolling contact fatigue behaviours of defective rail under different slip ratio and contact stress conditions // *Tribology International*. 2022. Vol. 169. Article 107491. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107491>
20. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Nikitina E.N. Bainitic constructional steel. Structure and Hardening Mechanisms. Cambridge, 2017. 121 p.
21. Yildirim C., Jessop C., Ahlström J., Detlefs C., Zhang Y. 3D mapping of orientation variation and local residual stress within individual grains of pearlitic steel using synchrotron dark field X-ray microscopy // *Scripta Materialia*. 2021. Vol. 197. Article 113783. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.113783>
22. Rybin V.V. Large plastic deformations and destruction of metals. Moscow: Metallurgy, 1986. 224 p.
23. Hirsch P., Hovey A., Nicholson P., Pasley D., Whelan M. Electron microscopy of thin crystals. United Kingdom: Butterworth/Heinemann, 1968. 574 p.
24. Carter C.B., Williams D.B. Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing, 2016. 518 p.
25. Ivanov Yu.A., Gromov V.E., Yuriev A.A., Kormyshev V.E., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Deformation strengthening mechanisms of rails in extremely long-term operation // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 11. P. 710–718. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.107>
26. Yuriev A.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. Structure and properties of lengthy rails after extreme long-term operation. Millersville: PA, USA: Materials Research Forum LLC, 2021. 194 p. <https://doi.org/10.21741/9781644901472>
27. Иванов Ю.Ф., Юрьев А.А., Чэнь С., Костерев В.В., Громов В.Е. Физическая природа механизмов упрочнения при экстремально длительной эксплуатации рельсов // *Известия Алтайского государственного университета*. 2021. Т. 117. № 1. С. 33–39. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2021\)1-05](https://doi.org/10.14258/izvasu(2021)1-05)
28. Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Shliarova Yu.A., Semin A.P., Sundeev R.V. Fine structure formation in rails under ultra long-term operation // *Materials Letters*. 2022. Vol. 309. No. 4. Article 131378. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131378>
29. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Aksenova K.V., Kuznetsov R.V., Kormyshev V.E., Vashchuk E.S. Evolution of the structure of rail steel during compression // *Russian Metallurgy (Metallurgy)*. 2022. Vol. 10. P. 1192–1197. <https://doi.org/10.1134/S0036029522100354>
30. Аксенова К.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Ващук Е.С., Перегудов О.А. Эволюция структуры пластинчатого перлита рельсовой стали при деформации сжатием // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2022. Т. 65. № 9. С. 654–661. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-654-661>
31. Салтыков С.А. *Стереометрическая металлография*. Москва: Металлургия. 1970. 376 с.
32. Чернявский К.С. *Стереология в металловедении*. Москва: Металлургия. 1970, 376 с.
33. Гольдштейн М.И., Фарбер В.М. *Дисперсионное упрочнение стали* Москва: Металлургия, 1979. 208 с.
34. Yao M.J., Welsch E., Ponge D., Haghighat S.M.H., Sandlöbes S., Choi P., Herbig M., Bleskov I., Hickel T., Lipinska-Chwalek M., Shantraj P., Scheu C., Zaefferer S., Gault B., Raabe D. Strengthening and strain hardening mechanisms in a precipitation-hardened high-Mn lightweight steel // *Acta Materialia*. 2017.

Vol. 140. P. 258–273. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.08.049>

REFERENCES

1. Bataev A.A., Bataev I.A., Nikulina A.A., Popelyukh A.I., Balaganskii I.A., Plotnikova N.V. Structural transformations of carbon ferrite-pearlite steels under high-speed loading conditions. *Obrabotka metallov. Tekhnologiya. Oborudovanie. Instrumenty*. 2019, vol. 21, no. 3, pp. 115–128. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2019-21.3-115-128>
2. Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Klevtsova N.A., Zaripov N.G., Karavaeva M.V. Strength and fracture mechanisms of nanostructured metallic materials under single kinds of loading. *Metal Science and Heat Treatment*. 2018, vol. 59, no. 9-10, pp. 54–62. <https://doi.org/10.1007/s11041-018-0197-2>
3. Cao Y., Ni S., Liao X., Song M., Zhu Y. Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2018, vol. 133, pp. 1–59. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.06.001>
4. Gubicza J. Lattice defects and their influence on the mechanical properties of bulk materials processed by severe plastic deformation. *Materials Transactions*. 2019, vol. 60, no. 7, pp. 1230–1242. <https://doi.org/10.2320/mater-trans.MF201909>
5. Mazilkin A., Straumal B., Kilmametov A., Straumal P., Baretzky B. Phase transformations induced by severe plastic deformation. *Materials Transactions*. 2019, vol. 60, no. 8, pp. 1489–1499. <https://doi.org/10.2320/mater-trans.MF201938>
6. Blank V.D., Popov M.Yu., Kulnitskiy B.A. The Effect of severe plastic deformations on phase transitions and structure of solids. *Materials Transactions*. 2019, vol. 60, no. 8, pp. 1500–1505. <https://doi.org/10.2320/mater-trans.MF201942>
7. Bubnov V.A., Korotovskikh V.K., Kostenko S.G. Effect of the degree of plastic deformation on hardness of austenitic steel. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2022, vol. 57, no. 11-12, pp. 1038–1042. <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01043-x>
8. Wang Y., Tomota Y., Harjo S., Gong W., Ohmura T. In-situ neutron diffraction during tension-compression cyclic deformation of a pearlite steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, vol. 676, pp. 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.122>
9. Pan R., Ren R., Chen C., Zhao X. Formation of nanocrystalline structure in pearlitic steels by dry sliding wear. *Materials Characterization*. 2017, vol. 132, pp. 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.05.031>
10. Steenbergen M. Rolling contact fatigue: Spalling versus transverse fracture of rails. *Wear*. 2017, vol. 380-381, pp. 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.03.003>
11. Vinogradov A., Estrin Y. Analytical and numerical approaches to modelling severe plastic deformation// *Progress in Materials Science*. 2018, vol. 95, pp. 172–242. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.001>
12. Nikas D., Zhang X., Ahlström J. Evaluation of local strength via microstructural quantification in a pearlitic rail steel deformed by simultaneous compression and torsion. *Materials Science and Engineering: A*. 2018, vol. 737, pp. 341–347. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.09.067>
13. Skrypnik R., Ekh M., Nielsen J.C.O., Pålsson B.A. Prediction of plastic deformation and wear in railway crossings – Comparing the performance of two rail steel grades. *Wear*. 2019, vol. 428–429, pp. 302–314. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.03.019>
14. Rong K-j., Xiao Ye-l., Shen M-x., Zhao H-p., Wang W-J., Xiong G-Y. Influence of ambient humidity on the adhesion and damage behavior of wheel–rail interface under hot weather condition. *Wear*. 2021, vol. 486-487, article 204091. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204091>
15. Li X.C., Ding H.H., Wang W.J., Guo J., Liu Q.Y., Zhou Z.R. Investigation on the relationship between microstructure and wear characteristic of rail materials. *Tribology International*. 2021, vol. 163, article 107152. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107152>
16. Miranda R.S., Rezende A.B., Fonseca S.T., Sinatora A., Mei P.R. Fatigue and wear behavior of pearlitic and bainitic microstructures with the same chemical composition and hardness using twin-disc tests. *Wear*. 2022, vol. 494-495, article 204253. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204253>
17. Pereira H.B., Dias Alves L.H., Rezende A.B., Mei P.R., Goldenstein H. Influence of the microstructure on the rolling contact fatigue of rail steel: Spheroidized pearlite and fully pearlitic microstructure analysis. *Wear*. 2022, vol. 498-499, article 204299. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204299>
18. Pan R., Chen Yu., Lan H., Ren R. Investigation into the microstructure evolution and damage on rail at curved tracks. *Wear*. 2022, vol. 504-505, article 204420. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204420>

19. Zhang S-Yu., Spiryagin M., Lin Q., Ding H-h., Wu Q., Guo J., Liu Q-Yu., Wang W-J. Study on wear and rolling contact fatigue behaviours of defective rail under different slip ratio and contact stress conditions. *Tribology International*. 2022, vol. 169, article 107491. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107491>
20. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Nikitina E.N. *Bainitic constructional steel. Structure and Hardening Mechanisms*. Cambridge, 2017, 121 p.
21. Yildirim C., Jessop C., Ahlström J., Detlefs C., Zhang Y. 3D mapping of orientation variation and local residual stress within individual grains of pearlitic steel using synchrotron dark field X-ray microscopy. *Scripta Materialia*. 2021, vol. 197, article 113783. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.113783>
22. Rybin V.V. *Large plastic deformations and destruction of metals*. Moscow: Metallurgy, 1986, 224 p.
23. Hirsch P., Hovey A., Nicholson P., Pasley D., Whelan M. *Electron microscopy of thin crystals*. United Kingdom: Butterworth/Heinemann, 1968, 574 p.
24. Carter C.B., Williams D.B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016, 518 p.
25. Ivanov Yu.A., Gromov V.E., Yuriev A.A., Kormyshev V.E., Rubannikova Yu.A., Semin A.P. Deformation strengthening mechanisms of rails in extremely long-term operation. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021, vol. 11, pp. 710–718. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.107>
26. Yuriev A.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. *Structure and properties of lengthy rails after extreme long-term operation*. Millersville: PA, USA: Materials Research Forum LLC, 2021, 194 p. <https://doi.org/10.21741/9781644901472>
27. Ivanov Yu.F., Yuriev A.A., Chen X., Kosterev V.B., Gromov V.E. Physical nature of strengthening mechanisms during extremely long-term operation of rails. *Izvestiya of Altai State University*. 2021, vol. 117, no. 1, pp. 33–39. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2021\)1-05](https://doi.org/10.14258/izvasu(2021)1-05)
28. Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Shliarova Yu.A., Semin A.P., Sundeev R.V. Fine structure formation in rails under ultra long-term operation. *Materials Letters*. 2022, vol. 309, no.4, article 131378. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131378>
29. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Aksenova K.V., Kuznetsov R.V., Kormyshev V.E., Vashchuk E.S. Evolution of the structure of rail steel during compression. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2022, vol. 10, pp. 1192–1197. <https://doi.org/10.1134/S0036029522100354>
30. Aksenova K.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vashchuk E.S., Peregudov O.A. Evolution of the structure of lamellar pearlite of rail steel under compression deformation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 9, pp. 654–661. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-654-661>
31. Saltykov S.A. *Stereometric metallography*. Moscow: Metallurgy, 1970, 376 p.
32. Chernyavskii K.S. *Stereology in metal science*. Moscow: Metallurgy, 1977, 280 p.
33. Goldstein M.I. Farber, B.M. *Dispersion hardening of steel*. Moscow: Metallurgy, 1979, 208 p.
34. Yao M.J., Welsch E., Ponge D., Haghighat S.M.H., Sandlöbes S., Choi P., Herbig M., Bleskov I., Hickel T., Lipinska-Chwalek M., Shantraj P., Scheu C., Zaefferer S., Gault B., Raabe D. Strengthening and strain hardening mechanisms in a precipitation-hardened high-Mn lightweight steel. *Acta Materialia*. 2017, vol. 140, pp. 258–273. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.08.049>

Сведения об авторах

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

Михаил Анатольевич Порфирьев, соискатель кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: mporf372@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3602-5739

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

E-mail: gromov@physics.sibsib.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

Наталья Анатольевна Попова, к.т.н., старший научный сотрудник кафедры физики, Томский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: popova-44@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8823-4562

Юрий Сергеевич Серенков, д. культурологии, доцент, заведующий кафедрой филологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: juriyy-serenkov@rambler.ru

Аршад Нур Сиддики, д.ф.н., профессор, Джамиа Миллия Исламия

E-mail: ansiddiqui@jmi.ac.in
ORCID: 0000-0002-3573-8385

Виталий Владиславович Шляров, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: shlyarov@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8130-648X

Information about the authors

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current Electronics

E-mail: yufi55@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8022-7958

Mikhail A. Porfir'ev, Applicant of the Department of Natural Sciences named after. prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University

E-mail: mporf372@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3602-5739

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

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-5147-5343

Natal'ya A. Popova, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Chair of Physics, Tomsk State University of Architecture and Building

E-mail: popova-44@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8823-4562

Yurii S. Serenkov, Dr. Sci. (Culture Studies), Assistant Prof., Head of the Chair of Philology, Siberian State Industrial University

E-mail: juriyy-serenkov@rambler.ru

Arshad Nur Siddiquee, D.Sci. (Philosophy), Professor, Jamia Millia Islamia

E-mail: ansiddiqui@jmi.ac.in
ORCID: 0000-0002-3573-8385

Vitalii V. Shlyarov, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel, Researcher, Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

E-mail: shlyarov@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8130-648X

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 15.08.2023

После доработки 28.08.2023

Принята к публикации 31.08.2023

Received 15.08.2023

Revised 28.08.2023

Accepted 31.08.2023

Оригинальная статья

УДК 669:539.381.296

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-72-80

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В РЕЖИМЕ
ХОЛОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА**

© 2023 г. С. А. Баранникова, М. В. Надежкин, С. В. Колосов,
М. В. Перовская, П. В. Исакова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Россия, 634050, Томск, пр. Академический, 2/4)

Аннотация. Исследована стадийность и кинетика развития очагов локализованной пластической деформации в поликристаллическом медно-никелевом сплаве МНМц40-1,5 в температурном интервале 173 – 297 К. В настоящее время медно-никелевые сплавы используются в различных отраслях промышленности в силу того, что обладают высокими антикоррозионными свойствами и имеют хорошую пластичность. Ранее локализация пластического течения при примесном упрочнении материалов с применением основных положений автоволновых моделей пластичности практически не исследовалась. Известно, что локализация пластического течения нередко является причиной разрушения материалов в ходе технологических процессов, связанных с большими пластическими деформациями. Для выявления характера эволюции автоволн локализованной пластичности в образцах методом двухэкспозиционной спекл-фотографии исследовали пространственно-временные распределения локальных деформаций непосредственно в процессе растяжения через каждые 0,2 % общей деформации. Диаграммы растяжения в исследуемом температурном интервале относятся к диаграммам параболического типа. Показано, что температурные зависимости механических свойств свидетельствуют о высоком уровне прочности и пластичности отожженного сплава при сравнительно низких температурах. Данные анализа дифракции обратно рассеянных электронов показали, что после отжига в текстуре сплава отмечается более 80 % кубической составляющей. Наблюдаемые картины распределений локализованной деформации содержат важную информацию о характере пластического течения. Формы наблюдаемых при пластической деформации картин локализации однозначным образом соответствуют действующим на разных стадиях законам деформационного упрочнения. Выявлено изменение пространственного периода и скорости автоволн локализации пластической деформации при понижении температуры.

Ключевые слова: пластическая деформация, локализация, поликристаллы, медно-никелевые сплавы, деформационное упрочнение

Благодарности. Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Нанотех» ИФПМ СО РАН.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0011.

Для цитирования: Баранникова С.А., Надежкин М.В., Колосов С.В., Перовская М.В., Исакова П.В. Исследование локализации пластического течения в режиме холодной деформации медно-никелевого сплава // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 72 – 80. [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-72-80](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-72-80)

Original article

**STUDY OF LOCALIZED PLASTIC FLOW IN IN COLD DEFORMATION
MODE OF COPPER-NICKEL ALLOY**

© 2023 S. A. Barannikova, M. V. Nadezhkin, S. V. Kolosov,
M. V. Perovskaya, P. V. Iskhakova

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

Abstract. The stages and kinetics of development of sites of localized plastic deformation in the polycrystalline copper-nickel alloy Cu-40 %Ni-1.5%Mn in the temperature range 173 – 297 K have been studied. Currently, copper-nickel alloys are used in various industries due to the fact that they have high anti-corrosion properties and have good ductility. Previously, the localization of plastic flow during impurity strengthening of materials using the basic principles of autowave plasticity models was practically not studied. It is known that localization of plastic flow is often the cause of destruction of materials during technological processes associated with large plastic deformations. To identify the nature of the evolution of autowaves of localized plasticity in samples, the spatiotemporal distributions of local strains directly during the stretching process were studied using two-exposure speckle photography every 0.2 % of the total strain. Tension diagrams in the temperature range under study are parabolic type diagrams. It has been shown that the temperature dependences of the mechanical properties indicate a high level of strength and ductility of the annealed alloy at relatively low temperatures. Data from backscattered electron diffraction analysis showed that after annealing, more than 80 % of the cubic component is observed in the alloy texture. The observed patterns of localized deformation distributions contain important information about the nature of plastic flow. The shapes of the localization patterns observed during plastic deformation unambiguously correspond to the laws of work hardening operating at different stages. A change in the spatial period and speed of autowaves localizing plastic deformation with decreasing temperature was revealed.

Keywords: plastic deformation, localization, polycrystals, copper-nickel alloys, strain hardening

Acknowledgements. The investigations have been carried out using the equipment of Share Use Centre “Nanotech” of the ISPMS SB RAS.

Funding. The work was performed within the framework of the state task of the Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS, projects FWRW-2021-0011.

For citation: Barannikova S.A., Nadezhkin M.V., Kolosov S.V., Perovskaya M.V., Iskhakova P.V. Study of localized plastic flow in in cold deformation mode of copper-nickel alloy. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (45), pp. 72 – 80. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-72-80](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-72-80)

Введение

Анализ научной литературы [1 – 4], посвященной проблемам физики пластичности, показал, что создание современной теории, способной адекватно описывать большинство из разнообразных аспектов этого явления, до сих пор представляет собой сложную задачу. История исследований этого явления насчитывает уже более двухсот лет, но к настоящему времени выяснились только главные причины трудностей ее решения.

В конце 80-х годов в развитии теории пластичности начали применять синергетические принципы самоорганизации [5, 6]. Корректность взглядов на пластическое течение как на самоорганизацию структуры деформируемой среды подтверждалась тем, что:

- пластически деформируемая система является открытой в термодинамическом смысле, так как пластическая деформация осуществляется под внешним силовым воздействием;

- из-за наличия различных решеточных дефектов и создаваемых ими внутренних напряжений пластически деформируемая среда является нелинейной;

- поскольку дефекты и их ансамбли служат концентраторами упругих напряжений, то пластически деформируемая среда, содержащая распределенные по объему источники потенциальной энергии деформации, может рассматриваться как активная.

В работе [7] показано, что подобные идеи способны обеспечить возможность использовать термодинамику неравновесных систем (синергетику) применительно к проблеме пластичности. Проведенный анализ показал, что открытая нелинейная система принципиально склонна к генерации различных процессов локализации (автоволн) [8]. Действительно, как показано экспериментально [9 – 13], в пластически деформированной среде локализацию деформации удалось наблюдать на всех масштабных уровнях.

Основное представление о природе пластичности состоит в учете того обстоятельства, что явления пластического течения реализуются в деформируемой среде в первую очередь в местах локализации пластических деформаций, сопровождающих процесс пластического течения от зарождения пластичности до разрушения [14 – 18]. Наблюдаемая картина распределения локализованной деформации содержит важную информацию о характере пластического течения, занимая на шкале масштабов деформационных явлений место, промежуточное между макроскопической и микроскопической картиной деформируемого образца. Известно [17], что локализация пластического течения нередко является причиной разрушения материалов в ходе технологических процессов, связанных с большими пластическими деформациями.

Настоящая работа посвящена изучению стабильности и локализации пластического течения медно-никелевого сплава, диаграмма состояния которого характеризуется образованием ГЦК твердого раствора [19]. Ранее локализация пластического течения при примесном упрочнении материалов с применением основных положений автоволновых моделей пластичности практически не исследовалась. В исследованиях предполагается сравнить развитие автоволн локализованной пластичности в одном сплаве при разных температурах испытаний в области отрицательных температур, но с одним и тем же механизмом деформационного упрочнения.

В настоящее время медно-никелевые сплавы используются в различных отраслях промышленности в силу того, что они обладают высокими антикоррозионными свойствами и имеют хорошую пластичность [20]. В этих сплавах удается сохранить немагнитное состояние при $T = 77$ К и достичь существенного упрочнения. Из медно-никелевых сплавов изготавливают детали ответственного назначения для теплообменных аппаратов, приборов и других устройств. Именно поэтому к этим сплавам предъявляются жесткие требования как по химическому составу, так и по эксплуатационным свойствам [21 – 23].

Методы и материалы исследования

Изучались автоволновые закономерности локализации пластической деформации в сплаве системы Cu – Ni. Промышленный константан [20] (в России маркируется МНМц-40-1,5), раскисленный ферромарганцем, содержит 56,1 – 60 % Cu; 39 – 41 % Ni + Co; 1 – 2 % Mn; до 0,5 % Fe; до 0,1 % C; до 0,1 % Si; до 0,9 % примесей.

Образцы для механических испытаний в форме двусторонней лопатки с рабочей частью $50 \times 10 \times 2$ мм штамповали из прокатанных листов

и подвергали рекристаллизационному отжигу в течение 1,5 ч при $T = 950$ °С с последующим охлаждением в печи СНВЭ – 1.3.1/16 И4. Методика приготовления металлографического шлифа включала механическую шлифовку и полировку. Границы зерен выявляли травлением реактивом 50 мл HCl + 10 г FeCl₃ + 50 мл H₂O. Микроструктурный анализ образцов проводили на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50, оборудованном приставками INCAx-act Oxford Instruments для энергодисперсионного анализа и Nordlys Oxford Instruments HKL Technology для анализа дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD). При проведении EBSD-анализа шаг сканирования поверхности варьировали от 0,3 до 0,5 мкм.

Материал в рекристаллизованном состоянии представляет собой однофазный ГЦК сплав и имеет полиэдрическую зеренную структуру со средним размером зерна 115 ± 19 мкм. Результаты EBSD-анализа показали (рис. 1), что доля рекристаллизованной структуры составляет 94 – 95 %, а доля большеугловых границ 90 – 91 %.

Кубическая текстура после высокой степени холодной прокатки и рекристаллизационного отжига образуется только в тех металлах и сплавах с ГЦК решеткой, которые имеют достаточно высокие значения энергии дефекта упаковки. В работах [22, 23] рассматривается текстурообразование в сплавах Cu – 45 % Ni (ат.), Cu – 44 % Ni – 1 % Mn (по массе), близких по составу к константану US стандарта C-72150. Показано, что в процессе отжига при температурах 950 – 1200 °С в этих сплавах формируется биаксиальная кубическая текстура с объемной долей кубических зерен более 90 %. Данные EBSD-анализа показали (рис. 1), что после отжига в текстуре сплава МНМц40-1,5 отмечается более 80 % кубической составляющей, с объемной долей зерен, имеющих ориентацию {001}<100>. На изображениях обратных полюсных фигур во всех направлениях кристалла видна высокая полюсная плотность, что свидетельствует о наличии выраженной текстуры прокатки в материале. Выраженность пиков указывает на преобладание кристаллографических механизмов деформации.

Механические испытания на одноосное растяжение при комнатной температуре со скоростью $1,2 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹ плоских образцов сочетали с регистрацией и анализом картин локализованной пластичности, как и в работах [14 – 18], начиная с предела текучести периодичностью 15 с (через 0,2 % общей деформации). Методика регистрации и расшифровки спеклограмм, основанная на использовании двухэкспозиционной спекл-фотографии, позволяет восстанавливать

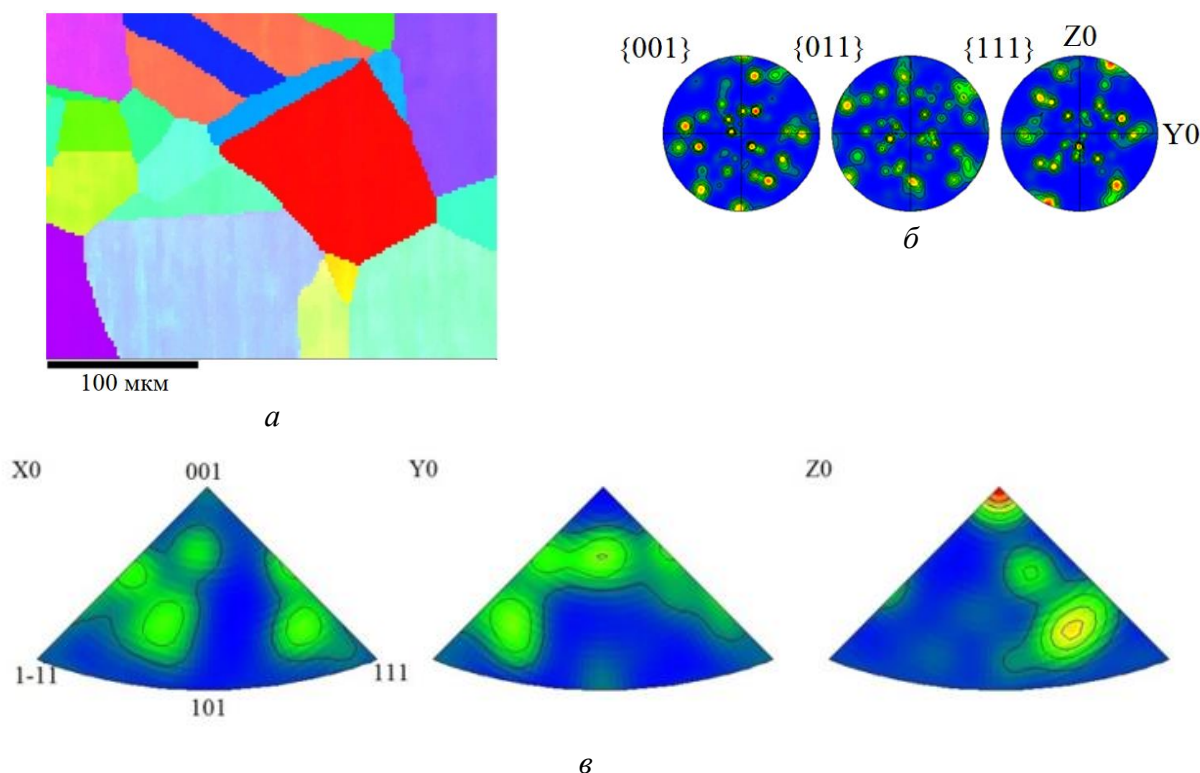


Рис. 1. Результаты EBSD-анализа сплава Cu – 40 % Ni – 1,5 % Mn после отжига (направления деформации X0, поперечного направления Y0, нормального направления Z0):

a – зеренная структура; *б* и *в* – прямые и обратные полюсные фигуры;

Fig. 1. Results of the EBSD analysis of the Cu – 40 % Ni – 1,5 % Mn alloy after annealing: grain structure (*a*), direct (*б*) and inverse (*в*) pole figures; strain direction X0, transverse direction Y0, normal direction Z0

поле векторов смещения и вычислять компоненты тензора пластической дисторсии, что существенно обогащает информацию о закономерностях пластического течения. Детали и возможности такой методики описаны в работе [17].

Основные результаты и обсуждение

Для расширения представлений о характере локализации пластического течения в ГЦК

сплавах исследовали пластическую деформацию медно-никелевого сплава в режиме холодной деформации. На рис. 2, *a* приведен пример деформационных кривых, общий вид которых характерен для твердых растворов. Диаграммы растяжения качественно подобны в исследуемом температурном интервале и относятся к диаграммам параболического типа. Однако применение логарифмического приема [24] поз-

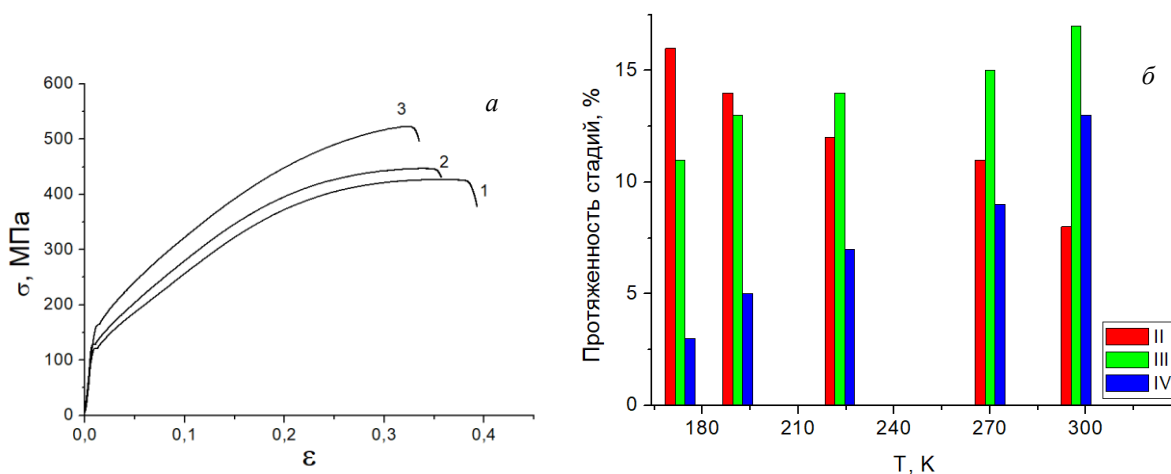


Рис. 2. Диаграммы растяжения (*a*) сплава Cu – 40 % Ni – 1,5 % Mn для $T = 297$ К (1), $T = 270$ К (2), $T = 191$ К (3) и продолжительность стадий деформационного упрочнения (*б*) для линейного упрочнения (II), параболического упрочнения (III), стадии предразрушения (IV)

Fig. 2. The tensile diagrams of the Cu – 40 % Ni – 1,5 % Mn alloy for different temperatures (*a*) ($T = 297$ К (1), $T = 270$ К (2), $T = 191$ К (3)) and the duration of the stages of strain hardening (*б*) (linear work hardening (II), parabolic work hardening (III), pre-failure stage (IV))

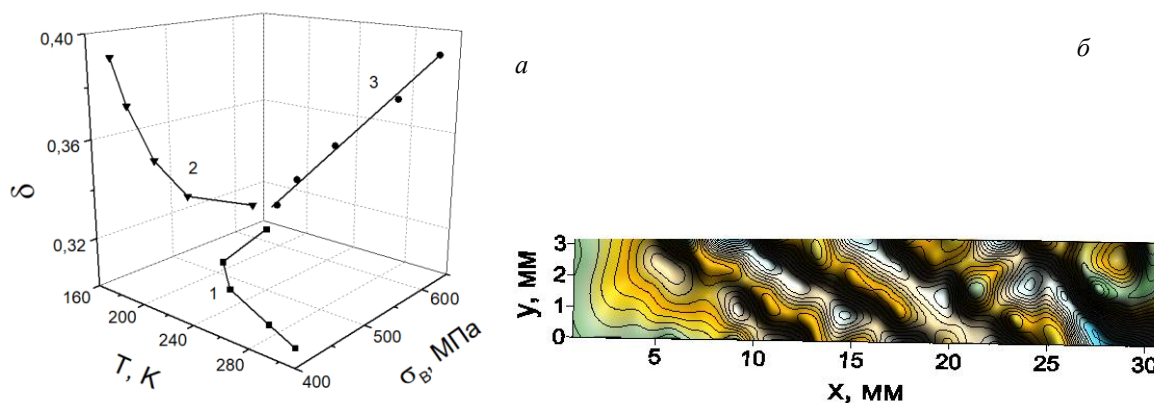


Рис. 3. Температурные зависимости предела прочности σ_B и пластичности δ (а), а также карта распределений локальных деформаций (б) в образце сплава Cu – 40 % Ni – 1,5 % Mn

Fig. 3. Temperature dependences of the ultimate strength σ_B and ductility δ (a) and map of local strain distributions (б) in the sample Cu – 40 % Ni – 1,5 % Mn

волило выявить многостадийность деформационного процесса. Так, первый участок может интерпретироваться как линейная стадия (II), где в уравнении Людвига-Холломона показатель упрочнения близок к единице. Два других участка представляют собой две различающиеся стадии параболического деформационного упрочнения (III) с показателем упрочнения, близким к 0,5, и стадии предразрушения с показателем упрочнения менее 0,5. Подобная стадийность пластической деформации связана со сменой дислокационной структуры. Исследование отожженных и деформированных образцов с помощью просвечивающей электронной микроскопии показали [19], что в сплаве Cu – Ni с началом деформации формируется ячеистая дислокационная структура, а затем с ростом деформации переходящая в разориентированную ячеистую и в разориентированную полосовую.

С понижением температуры испытаний протяженность стадии линейного деформационного упрочнения увеличивается, в то время как продолжительность стадий параболического деформационного упрочнения и предразрушения уменьшается (рис. 2, б). На рис. 3, а показано влияние температуры на предел прочности σ_B (кривая 1) и относительное удлинение до разрыва δ (кривая 3). Температурные зависимости механических свойств (рис. 3, а, кривая 2) свидетельствуют о высоком уровне прочности и пластичности отожженного сплава при сравнительно низких температурах.

Регистрация и анализ полей смещений в исследуемом сплаве показали, что зоны макролокализации отчетливо выявляются при рассмотрении распределений полутоновой картины локальных удлинений (рис. 3, б). Для исследования кинетики процесса эволюции картин макролокализации использовали зависимости координат очагов в образце X от деформации ϵ или

времени t (при активном растяжении $\epsilon \sim t$). На рис. 4 они приведены для процесса деформирования константана при $T = 191$ K. Ясно выделяются два временных интервала, когда типы картин локализации деформации резко отличаются. На участке линейного деформационного упрочнения четыре эквидистантно расположенных очага деформации движутся с практически постоянными скоростями, то есть наблюдаемая картина имеет признаки волнового процесса с длиной волны $\lambda = 6,5 \pm 0,5$ мм и скоростью распространения $V_{aw} = 4,8 \cdot 10^{-5}$ м/с. На стадии параболического деформационного упрочнения наблюдается неподвижная пространственно-периодическая структура с почти той же характерной длиной волны $7 \pm 0,5$ мм.

Смена волновой картины локализации стационарным пространственно-периодическим распределением очагов деформации происходила

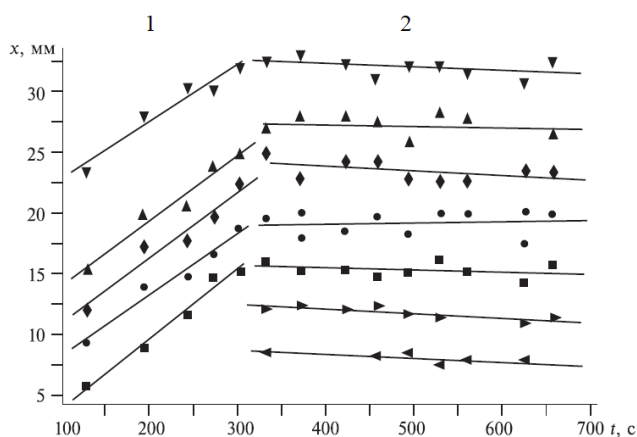


Рис. 4. Эволюция распределений очагов локальных удлинений на стадиях линейного (1) и параболического (2) деформационного упрочнения при растяжении сплава Cu – 40 % Ni – 1,5 % Mn для $T = 191$ K

Fig. 4. Evolution of distributions of local elongation sites at the stages of linear (1) and parabolic (2) strain hardening during tension of Cu – 40 % Ni – 1,5 % Mn alloy for $T = 191$ K

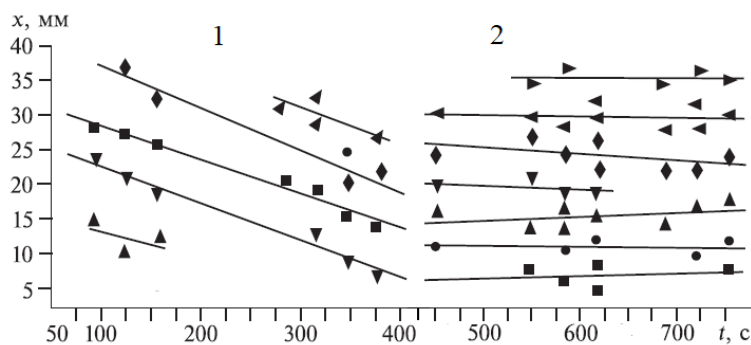


Рис. 5. Эволюция распределений очагов локальных удлинений на стадиях линейного (1) и параболического (2) упрочнения при растяжении сплава Cu – 40 % Ni – 1,5 % Mn при $T = 270$ K

Fig. 5. Evolution of distributions of local elongation sites at the stages of linear (1) and parabolic (2) strain hardening during tension of the Cu – 40 % Ni – 1,5 % Mn alloy for $T = 270$ K

при активном растяжении константана и при температуре $T = 270$ K (рис. 5). В этом случае также наблюдалось соответствие типов локализации стадиям деформационного упрочнения. На участке линейного деформационного упрочнения происходит движение эквидистантных очагов локализованной пластичности с длиной волны $\lambda = 5,5 \pm 0,5$ мм и скоростью распространения $V_{aw} = 5,9 \cdot 10^{-5}$ м/с. На стадии параболического деформационного упрочнения наблюдается стационарная система очагов деформации с длиной волны $\lambda \approx 6 \pm 0,5$ мм.

Для сравнения были проведены исследования локализации пластического течения при растяжении константана при комнатной температуре. Исследование положений очагов локализации деформирования показали, что в пределах стадии линейного упрочнения наблюдается волновой деформационный процесс с параметрами $\lambda = 4 \pm 0,5$ мм и $V_{aw} = 7,3 \cdot 10^{-5}$ м/с (рис. 6, а). Затем на стадии параболического деформационного упрочнения формируется стационарная система эквидистантных очагов деформации с пространственным периодом $\lambda \approx 4,5$ мм (рис. 6, б).

Таким образом, картины макроскопической локализации пластического течения, наблюдаемые в поликристаллах ГЦК твердых растворов на примере промышленного константана, не отличаются принципиально от картин, характерных для поликристаллов, относящихся к другим кристаллическим решеткам [17].

Данные о скоростях распространения фазовых автоволн локализованной пластичности на стадиях линейного деформационного упрочнения константана и соответствующих коэффициентов деформационного упрочнения позволили показать, что при пониженных температурах скорость распространения автоволн локализованной пластичности также обратно пропорциональна коэффициенту деформационного упрочнения [25]. Аналогичное соотношение было найдено ранее в исследованиях автоволновой пластичности материалов при 300 K [17]. Таким образом, измеренные для низких температур скорости автоволн локализованной пластичности укладываются на обобщенный график зависимости скорости от коэффициента деформационного упрочнения.

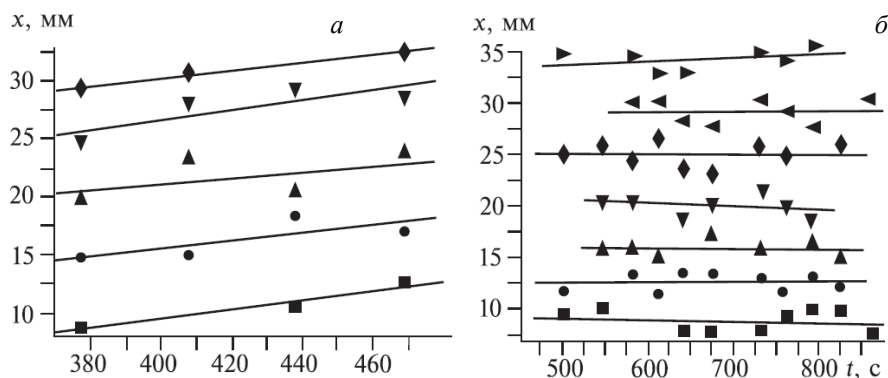


Рис. 6. Эволюция распределений очагов локальных удлинений на стадиях линейного (а) и параболического (б) упрочнения при растяжении сплава Cu – 40 % Ni – 1,5 % Mn при $T = 297$ K

Fig. 6. Evolution of distributions of local elongation sites at the stages of linear (a) and parabolic (б) strain hardening during tension of the Cu – 40 % Ni – 1,5 % Mn alloy for $T = 297$ K

Выводы

Исследование картин локализации пластической деформации при растяжении листового сплава Cu – 40 % Ni – 1,5 % Mn с использованием метода спекл-фотографии позволило установить следующее:

- макроскопическая локализация пластической деформации наблюдается в исследованном температурном интервале 173 – 297 К на протяжении всего процесса нагружения от начала пластической деформации на пределе текучести и до разрушения образца. В процессе пластического течения макролокализация может приобретать различные формы;

- формы наблюдаемых при пластической деформации картин локализации однозначным образом соответствуют действующим на разных стадиях законам деформационного упрочнения и меняются вместе со сменой последнего;

- режим холодной деформации при испытании и микромеханизм реализации пластического течения слабо влияют на характер эволюции картин локализации деформации. Понижение температуры приводит к увеличению пространственного периода распределений локальных деформаций и уменьшению скорости распространения автоволн локализованной пластичности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuhlmann-Wilsdorf D. The low energetic structures theory of solid plasticity. In: Dislocations in Solids. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2002. P. 213–338.
2. Argon A. Strengthening Mechanisms in Crystal Plasticity. Oxford: University Press, 2008. 404 p.
3. Судзуки Т., Ёсинага Х., Такеути С. Динамика дислокаций и пластичность. Москва: Мир, 1989. 294 с.
4. Hull D., Bacon D.J. Introduction in Dislocations. Oxford: Elsevier, 2011. 242 p.
5. Davydov V.A., Davydov N.V., Morozov V.G., Stolyarov M.N., Yamaguchi T. Autowaves in moving excitable media // Journal of Physics Condensed Matter. 2004. Vol. 7. No. 3(39). P. 565–578. <http://dx.doi.org/10.5488/CMP.7.3.565>
6. Othmer H.G. The dynamics of forced excitable systems. In: Nonlinear Wave Processes in Excitable Media. New York: Plenum Press, 1991. P. 213–231.
7. Asharia A., Beaudoin A., Miller R. New perspectives in plasticity theory: dislocation nucleation, waves, and partial continuity of plastic strain rate // Mathematics and Mechanics of Solids. 2008. Vol. 13. No. 2. P. 292–315. <http://dx.doi.org/10.1177/1081286507086903>
8. Krinsky V.I. Self-organization: autowaves and structures far from equilibrium. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 270 p.
9. McDonald R.J., Efstathiou C., Kurath P. The wavelike plastic deformation of single crystal copper // Journal of Engineering Materials and Technology. 2009. Vol. 131. No. 3. P. 7–13. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3120410>
10. Zbib H.M., de la Rubia T.D. A multiscale model of plasticity // International Journal of Plasticity. 2002. Vol. 18. No. 9. P. 1133–1163. [http://dx.doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00044-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00044-4)
11. Ohashi T., Kawamukai M., Zbib H. A multiscale approach for modeling scale-dependent yield stress in polycrystalline metals // International Journal of Plasticity. 2007. Vol. 23. No. 5. P. 897–914. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2006.10.002>
12. Vildeman V.E., Lomakin E.V., Tretiakova T.V. Yield delay and space-time inhomogeneity of plastic deformation of carbon steel // Mechanics of Solids. 2015. Vol. 50. No. 4. P. 412–420.
13. Kobelev N.P., Lebyodkin M.A., Lebedkina T.A. Role of self-organization of dislocations in the onset and kinetics of macroscopic plastic instability // Metallurgical and Materials Transactions A. 2017. Vol. 48. No. 3. P. 965–974. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-016-3912-x>
14. Barannikova S.A., Nadezhkin M.V. Kinetics of plastic deformation localization bands in polycrystalline nickel // Metals. 2021. Vol. 11. No. 9. Article 1440. <https://doi.org/10.3390/met11091440>
15. Zuev L.B., Barannikova S.A., Maslova O.A. The features of localized plasticity autowaves in solids // Materials Research. 2019. Vol. 22. No. 4. Article 2018-0694. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2018-0694>
16. Баранникова С.А., Косинов Д.А., Зуев Л.Б., Громов В.Е., Коновалов С.В. Влияние водорода на макролокализацию пластической деформации низкоуглеродистой стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 12. С. 891–895. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-12-891-895>
17. Зуев Л.Б. Автоволновая пластичность. Локализация и коллективные моды. Москва: Физматлит, 2018. 208 с.
18. Зуев Л.Б., Хон Ю.А. Пластическое течение как процесс формирования пространственно-временных структур. Часть I. Качественные и количественные закономерности // Физическая мезомеханика. 2021.

- T. 24. № 6. С. 5–14. <https://doi.org/10.24412/1683-805X-2021-6-5-14>
19. Shevakina Ju.F., Tsypin M.I. The Curves of plastic flow and deformation strengthening of some solid solution on the basis of copper // *Advanced Performance Materials*. 1997. Vol. 4. P. 233–237. <https://doi.org/10.1023/A:1008655832363>
 20. Смирягин Л.П., Смирягина Н.Л., Белов А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы. Москва: Металлургия, 1974. 364 с.
 21. Eder S.J., Grützmacher P.G., Ripoll M. R., Dini D., Gachot C. Effect of temperature on the deformation behavior of copper nickel alloys under sliding // *Materials*. 2021. Vol. 14 (1). P. 60. <https://doi.org/10.3390/ma14010060>
 22. Хлебникова Ю.В., Родионов Д.П., Гервасьева И.В., Суаридзе Т.Р., Казанцев В.А. Условия формирования острой кубической текстуры в тонких лентах из сплавов Cu–Ni для высокотемпературных сверхпроводников второго поколения // *Письма в журнал технической физики*. 2015. Т. 41. № 7. С. 73–80.
 23. Tian H., Suo H.L., Mishin O.V., Zhang Y.B., Juul Jensen D., Grivel J.-C. Annealing behavior of a nanostructured Cu–45 at. % Ni alloy // *Journal of Materials Science*. 2013. Vol. 48. P. 4183–4190. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7231-y>
 24. Pelleg J. *Mechanical Properties of Materials*. Dordrecht: Springer, 2013. 634 p.
 25. Зуев Л.Б., Баранникова С.А., Колосов С.В., Никонова А.М. Температурная зависимость автоволновых характеристик локализованной пластичности // *Физика твердого тела*. 2021. Т. 63. № 1. С. 48–54. <https://doi.org/10.21883/FTT.2021.01.50397.169>
 6. Othmer H.G. The dynamics of forced excitable systems. *Nonlinear Wave Processes in Excitable Media*. New York: Plenum Press, 1991, pp. 213–231.
 7. Asharia A., Beaudoin A., Miller R. New perspectives in plasticity theory: dislocation nucleation, waves, and partial continuity of plastic strain rate. *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2008, vol. 13, no. 2, pp. 292–315. <http://dx.doi.org/10.1177/1081286507086903>
 8. Krinsky V.I. *Self-Organization: Autowaves and Structures far from Equilibrium*. Berlin: Springer-Verlag, 1984, 270 p.
 9. McDonald R.J., Efstathiou C., Kurath P. The wavelike plastic deformation of single crystal copper. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2009, vol. 131, no. 3, pp. 7–13. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3120410>
 10. Zbib H.M., de la Rubia T.D. A multiscale model of plasticity. *International Journal of Plasticity*. 2002, vol. 18, no. 9, pp. 1133–1163. [http://dx.doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00044-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00044-4)
 11. Ohashi T., Kawamukai M., Zbib H. A multiscale approach for modeling scale-dependent yield stress in polycrystalline metals. *International Journal of Plasticity*. 2007, vol. 23, no. 5, pp. 897–914. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2006.10.002>
 12. Vildeman V.E., Lomakin E.V. and Tretiakova T.V. Yield delay and space-time inhomogeneity of plastic deformation of carbon steel. *Mechanics of Solids*. 2015, vol. 50, no. 4, pp. 412–420.
 13. Kobelev N.P., Lebyodkin M.A., Lebedkina T.A. Role of self-organization of dislocations in the onset and kinetics of macroscopic plastic instability. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017, vol. 48, no. 3, pp. 965–974. <http://dx.doi.org/10.1007/s11661-016-3912-x>
 14. Barannikova S.A., Nadezhkin M.V. Kinetics of plastic deformation localization bands in polycrystalline nickel. *Metals*. 2021, vol. 11, no. 9, article 1440. <https://doi.org/10.3390/met11091440>
 15. Zuev L.B., Barannikova S.A., Maslova O.A. The features of localized plasticity autowaves in solids. *Materials Research*. 2019, vol. 22, no. 4, article 2018-0694. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2018-0694>
 16. Barannikova S.A., Kosinov D.A., Zuev L.B., Gromov V.E., Konovalov S.V. Influence of hydrogen on macrolocalization of plastic deformation of low-carbon steel. *Izvestiya. Chernaya metallurgiya*. 2016, vol. 59, no. 12, pp. 891–895. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-12-891-895>
 17. Zuev L.B. *Zuev L.B. Autowave plasticity. Localization and collective mods*. Moscow: Fizmatlit, 2018, 208 p. (In Russ.).

REFERENCES

1. Kuhlmann-Wilsdorf D. The low energetic structures theory of solid plasticity. *Dislocations in Solids*. Amsterdam, Boston: Elsevier, 2002, pp. 213–338.
2. Argon A. *Strengthening Mechanisms in Crystal Plasticity*. Oxford: University Press, 2008, 404 p.
3. Suzuki T., Yoshinaga H., Takeuchi S. *Dislocation dynamics and plasticity*. Moscow: Mir, 1989, 294 p. (In Russ.).
4. Hull D., Bacon D.J. *Introduction in Dislocations*. Oxford: Elsevier, 2011, 242 p.
5. Davydov V.A., Davydov N.V., Morozov V.G., Stolyarov M.N., Yamaguchi T. Autowaves in the moving excitable media. *Journal of Physics Condensed Matter*. 2004, vol. 7, no. 3(39), pp. 565–578. <http://dx.doi.org/10.5488/CMP.7.3.565>

18. Zuev L.B., Khon Yu.A. Plastic flow as a process of formation of space-time structures. Part I. Qualitative and quantitative regularities. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2021, vol. 24, no. 6, pp. 5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1683-805X-2021-6-5-14>
19. Shevakin Ju.F., Tsylin M.I. The Curves of plastic flow and deformation strengthening of some solid solution on the basis of copper. *Advanced Performance Materials*. 1997, vol. 4, pp. 233–237. <https://doi.org/10.1023/A:1008655832363>
20. Smiryagin L.P., Smiryagina N.L., Belov A.V. *Industrial non-ferrous metals and alloys*. Moscow: Metallurgy, 1970, 364 p. (In Russ.).
21. Eder S.J., Grützmacher P.G., Ripoll M.R., Dini D., Gachot C. Effect of temperature on the deformation behavior of copper nickel alloys under sliding // *Materials*. 2021, vol. 14 (1), pp. 60. <https://doi.org/10.3390/ma14010060>
22. Khlebnikova Y.V., Rodionov D.P., Gervas'eva I.V., Suaridze T.R., Kazantsev V.A. Conditions of sharp cube texture formation in thin tapes of Cu-Ni alloys for second-generation high-temperature superconductors. *Technical Physics Letters*. 2015, vol. 41, pp. 341 – 343. <https://doi.org/10.1134/S1063785015040094>
23. Tian H., Suo H.L., Mishin O.V., Zhang Y.B., Juul Jensen D., Grivel J.-C. Annealing behavior of a nanostructured Cu–45 at. % Ni alloy. *Journal of Materials Science*. 2013, vol. 48, pp. 4183–4190. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7231-y>
24. Pelleg J. *Mechanical Properties of Materials*. Dordrecht: Springer, 2013, 634 p.
25. Zuev L.B., Barannikova S.A., Kolosov S.V. and Nikonova A.V. Temperature dependence of auto-wave characteristics of localized plasticity. *Physics of the Solid State*, 2021, vol. 63, no. 1, pp. 47–53. <https://doi.org/10.21883/FTT.2021.01.50397.169>

Сведения об авторах

Светлана Александровна Баранникова, д.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: bsa@ispms.ru
ORCID 0000-0001-5010-9969

Михаил Владимирович Надежкин, к.т.н., научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: mvn@ispms.ru
ORCID 0000-0002-4819-7653

Сергей Васильевич Колосов, к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: svk@ispms.ru
ORCID 0000-0002-5599-9152

Марина Владимировна Перовская, к.т.н., научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: mv_perovskaya@inbox.ru
ORCID 0000-0003-2780-6023

Полина Валентиновна Исхакова, младший научный сотрудник лаборатории физики прочности, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
E-mail: iskhakova.polina@gmail.com
ORCID 0000-0001-8256-283X

Information about the authors

Svetlana A. Barannikova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
E-mail: bsa@ispms.ru
ORCID 0000-0001-5010-9969

Mikhail V. Nadezhkin, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
E-mail: mvn@ispms.ru
ORCID 0000-0002-4819-7653

Sergey V. Kolosov, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
E-mail: svk@ispms.ru
ORCID 0000-0002-5599-9152

Marina V. Perovskaya, Cand. Sci. (Eng.), Researcher at the Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
Email: mv_perovskaya@inbox.ru
ORCID 0000-0003-2780-6023

Polina V. Iskhakova, Junior researcher at the Laboratory of Strength Physics, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
E-mail: iskhakova.polina@gmail.com
ORCID 0000-0001-8256-283X

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

Поступила в редакцию 04.09.2023
 После доработки 11.09.2023
 Принята к публикации 13.09.2023

Received 04.09.2023
 Revised 11.09.2023
 Accepted 13.09.2023

Оригинальная статья

УДК 669.1

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-81-86

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ
НИЗКОЛЕГИРОВАННОГО ХРОМО-КРЕМНИСТОГО ЧУГУНА В СРЕДЕ
АНОДНЫХ ГАЗОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ**

© 2023 г. Е. А. Пинаев¹, М. В. Темлянцев², А. С. Симачев²,
Е. Н. Темлянцева², О. В. Бессонова³

¹АО «РУСАЛ Красноярск» (Россия, 660111, Красноярский Край, г. Красноярск, ул. Пограничников, 40)

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

³АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская Область – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

Аннотация. Атмосфера анодных газов алюминиевых электролизеров ЭкоСодерберг содержит соединения фтора, оксиды серы и ванадия, вызывающие интенсивную газовую коррозию элементов газосборного колокола. Коррозия чугунных секций газосборного колокола приводит к сокращению срока их службы. Следовательно, появляется необходимость более частых ремонтов, что является причиной снижения сортности первичного алюминия по примесям железа. Проведено исследование коррозионной стойкости низколегированного хромо-кремнистого чугуна (3,06 % Si, 0,71 % Cr) в среде анодных газов алюминиевых электролизеров. Исследования проведены в промышленных условиях. Из экспериментального чугуна выполнены полнопрофильные секции газосборного колокола. Продолжительность эксплуатации секций составила 24,32 месяца. Потери массы вследствие коррозии составили 13,5 %, средние удельные потери массы – $0,128 \cdot 10^{-3}$ г/(см²·ч). Удельные потери массы штатно используемого высокопрочного чугуна марки ВЧ с шаровидным графитом 50 почти в 4,8 раза выше и составляют $0,614 \cdot 10^{-3}$ г/(см²·ч). Основа экспериментального низколегированного хромо-кремнистого чугуна ферритная, выделения графита имеют форму близкую к сферической, коррозионные процессы развиваются по границам зерен феррита. Твердость чугуна 140 – 149 НВ. Повышенная коррозионная стойкость чугуна основана на способности хрома и кремния формировать на поверхности металла защитные пленки, препятствующие диффузии окислительных газов. Кремний способствует повышению точки образования и стабильного существования в продуктах коррозии вюститной фазы FeO до температуры 900 °С, формирует слой Fe₂SiO₄ · SiO₂, обладающий повышенными защитными свойствами, который замедляет процессы высокотемпературной газовой коррозии. Экспериментальный состав чугуна рекомендуется к промышленному применению.

Ключевые слова: низколегированный чугун, газовая коррозия, алюминиевый электролизер

Для цитирования: Пинаев Е.А., Темлянцев М.В., Симачев А.С., Темлянцева Е.Н., Бессонова О.В. Исследование высокотемпературной газовой коррозии низколегированного хромо-кремнистого чугуна в среде анодных газов алюминиевых электролизеров // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 81 – 86. [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-81-86](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-81-86)

Original article

**RESEARCH OF HIGH TEMPERATURE GAS CORROSION OF LOW-ALLOY
CHROME-SILICON CAST IRON IN AN ENVIRONMENT OF ANODIC GASES OF
ALUMINUM ELECTROLYSERS**

E. A. Pinaev¹, M. V. Temlyantsev², A. S. Simachev², E. N. Temlyantseva², O. V. Bessonova³

¹JSC «RUSAL Krasnoyarsk» (40, str. Border guards, Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Krai, 660111, Russian Federation)

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

³EVRAZ ZSMK JSC (16, sh. Cosmic, Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass, 654043, Russian Federation)

Abstract. The atmosphere of the anode gases of the aluminum electrolyzers of EcoSoderberg contains fluorine compounds, sulfur oxides and vanadium, causing intense gas corrosion of the elements of the gas collecting bell. Corrosion of cast-iron sections of the gas collecting bell leads to a reduction in their service life, as a consequence of the need for more frequent repairs and is the reason for a decrease in the grade of primary aluminum by iron impurities. The corrosion resistance of low-alloyed chromium-siliceous cast iron (silicon content 3.06 %, chromium 0.71 %) in the anode gases of aluminum electrolyzers was studied. The research was carried out in industrial conditions. Full-profile sections of the gas collecting bell are made of experimental cast iron. The duration of operation of the sections was 24.32 months. The mass loss due to corrosion was 13.5 %, and the average specific mass loss was $0.128 \cdot 10^{-3}$, g/(cm²·h). The specific mass loss of routinely used high-strength cast iron with spherical graphite grade HF 50 is almost 4.8 times higher and amounts to $0.614 \cdot 10^{-3}$, g / (cm² · h). The basis of experimental low-alloyed chromium-silicon cast iron is ferritic, graphite secretions have a shape close to spherical, corrosion processes develop along the boundaries of ferrite grains. The hardness of cast iron is 140 – 149 HV. The increased corrosion resistance of cast iron is based on the ability of chromium and silicon to form protective films on the metal surface that prevent the diffusion of oxidizing gases. In particular, silicon contributes to an increase in the point of formation and stable existence in the corrosion products of the lustite phase of FeO up to 900 °C and forms a layer of Fe₂SiO₄ · SiO₂ with increased protective properties and slowing down the processes of high-temperature gas corrosion. The experimental composition of cast iron is recommended for industrial use.

Keywords: low-alloy cast iron, gas corrosion, aluminum electrolyzer

For citation: Pinaev E.A., Temlyantsev M.V., Simachev A.S., Temlyantseva E.N Bessonova O.V. Research of high temperature gas corrosion of low-alloy chrome-silicon cast iron in an environment of anodic gases of aluminum electrolyzers. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (45), pp. 81 – 86. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-81-86](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-81-86)

Технология производства первичного алюминия в электролизерах ЭкоСодерберг имеет ряд существенных преимуществ в части снижения вредных выбросов в атмосферу [1]. Однако, анодные газы алюминиевых электролизеров ЭкоСодерберг, содержащие соединения фтора, оксиды серы и ванадия [2], вызывают интенсивную газовую коррозию элементов газосборного колокола (ГСК) [3]. Особенно эта проблема обострилась при увеличении доли высокосернистых коксов (источников оксидов серы), применяемых в электролитическом производстве алюминия [4 – 12]. Усугубляют коррозионное воздействие высокий (до 800 °C) уровень и циклические изменения температуры анодных газов, которые приводят к изменению температуры эксплуатации чугунных элементов, в частности секций газосборного колокола (от 220 до 620 °C) [13]. Коррозия чугунных секций газосборного колокола приводит к сокращению срока их службы, как следствие к необходимости более частых ремонтов, что является причиной снижения сортности первичного алюминия по примесям железа [4 – 12]. Последнее происходит вследствие попадания

в расплав первичного алюминия продуктов коррозии чугуна, содержащих оксиды железа, осыпающихся с внутренних поверхностей секций газосборного колокола [14].

Для условий, аналогичных условиям службы секций ГСК алюминиевых электролизеров, в работе [15] рекомендуют в основном легированные чугуны, содержащие кремний, алюминий, хром. Конкретно для деталей защитного кожуха алюминиевых электролизеров предлагают использовать высокохромистый чугун марки ЧХ30.

В работах [2, 3, 16 – 19] проведены исследования процессов коррозии и коррозионной стойкости чугунов различного состава, в том числе легированных алюминием и хромом. При этом высоко- и комплекснолегированные чугуны, обладая достаточно высокой коррозионной стойкостью, повышают себестоимость чугунных секций и предъявляют высокий уровень требований к технологиям их производства, а зачастую имеют пониженные литейные свойства. При увеличении содержания алюминия более 2,5 % повышается

Химический состав исследуемого чугуна и аналогов
Chemical composition of the investigated cast iron and analogues

Марка чугуна	Содержание элемента, % (по массе)							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
ЧХ1 ГОСТ 7769 – 82	3,0 – 3,8	До 1,0	1,5 – 2,5	0,4 – 1,0	–	–	До 0,3	До 0,12
ЧХ2 ГОСТ 7769 – 82	3,0 – 3,8	До 1,0	2,0 – 3,0	1,01 – 2,0	–	–	До 0,3	До 0,12
ЧХ3 ГОСТ 7769 – 82	3,0 – 3,8	До 1,0	2,8 – 3,8	2,01 – 3,0	–	–	До 0,3	До 0,12
ЧС5 ГОСТ 7769 – 82	2,5 – 3,2	До 0,8	4,5 – 6,0	0,5 – 1,0	–	–	До 0,3	До 0,12
Экспериментальный	3,8	0,58	3,06	0,71	0,12	0,14	0,082	0,043

склонность расплава к пленкообразованию, это может приводить к снижению эксплуатационных свойств отливок [20]. Алюминиевые чугуны требуют одновременного проведения раздельной плавки алюминия и чугуна. Высокое содержание хрома, хотя и повышает коррозионную стойкость, но приводит к росту твердости и сложностям механической обработки высокохромистых чугунов. В связи с этим разработка составов и исследование коррозионной стойкости низколегированных и экономнолегированных чугунов в атмосфере анодных газов алюминиевых электролизеров ЭкоСодерберг является актуальной научно-практической задачей современного металлостроения.

Проведены исследования процессов высокотемпературной газовой коррозии в атмосфере анодных газов алюминиевых электролизеров секций ГСК, выполненных из низколегированного хромо-кремнистого чугуна. Химический состав исследуемого чугуна и аналогов представлен в таблице.

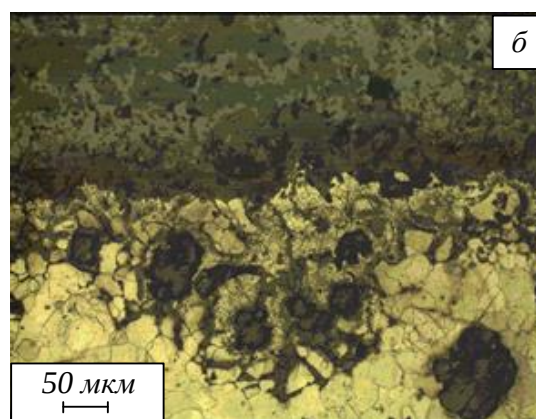
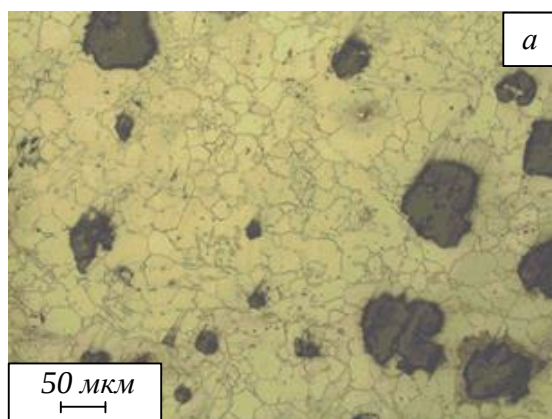
Из экспериментального чугуна получена опытная партия полнопрофильных секций ГСК. Секции смонтировали в конструкцию ГСК алюминиевого электролизера и эксплуатировали в штатном режиме. Продолжительность экспериментов составляла 24,32 мес. (742 сут.). После эксплуатации секции демонтировали, очищали на дробеструйной установке от продуктов коррозии и взвешивали. Средняя потеря массы составила 13,5 %. Визуальный осмотр показал, что коррозия по поверхности секции равномерная. После проведения взвешивания секция удовлетворяла требованиям дальнейшей эксплуатации.

Стойкость чугунов к высокотемпературной газовой коррозии определяли по удельным (U , г) потерям массы образцов с единицы поверхности ($см^2$) в единицу времени (ч). Для исследуемого низколегированного хромо-кремнистого чугуна средние удельные потери массы составили $0,128 \cdot 10^{-3}$ г/($см^2 \cdot ч$). Удельные потери массы штатно используемого высокопрочного чугуна марки ВЧ 50 с шаровидным графитом почти в 4,8 раза выше ($0,614 \cdot 10^{-3}$ г/($см^2 \cdot ч$)) [16, 17].

Для исследования микроструктуры чугуна применяли оптический металлографический микроскоп OLYMPUS GX-51. Микроструктуру выявляли травлением в 4 %-ом спиртовом растворе азотной кислоты. Твердость чугуна измеряли на твердомере ТК-2М. На рисунке представлена характерная микроструктура исследуемых чугунов после экспериментов.

Основа чугуна ферритная, выделения графита имеют форму, близкую к сферической (см. рисунок, поз. а), коррозионные процессы развиваются по границам зерен феррита (см. рисунок, поз. б). Твердость чугуна 140 – 149 НВ.

Для исследуемого низколегированного чугуна характерно повышенное содержание кремния (3,06 %) и хрома (0,71 %). Положительное влияние кремния на коррозионную стойкость в среде анодных газов отмечено в ряде работ [15, 20, 21]. Высококремнистый феррит весьма стоек к процессам окисления в высокотемпературной газовой среде. Кремний способствует повышению точки образования и стабильного существования в продуктах коррозии вюститной фазы FeO до температуры 900 °С и формирует слой $Fe_2SiO_4 \cdot SiO_2$, обладающий повышенными защитными свойствами, который замедляет процессы диффузии окислительных газов к поверхности металла. Кремний оказывает благоприятное, с точки зрения коррозионной стойкости и эксплуатационных свойств, влияние на микроструктуру чугуна. Увеличение содержания кремния приводит к ферритизации металлической основы, уменьшению размеров шаровидных включений графита [21]. При этом необходимо учитывать, что увеличение содержания кремния более 3,5 % приводит к появлению хрупкости чугуна. Окалиностойкость кремнистого чугуна (5,2 – 6,0 % Si) с шаровидным графитом превышает окалиностойкость серого чугуна низколегированного хромом, а колосники, эксплуатируемые в агломерационном производстве, выполненные из чугуна марки ЧС5Ш, имеют в два раза более высокую коррозионную стойкость, чем выполненные из чугуна ЧХ1 [21].



Микроструктура исследуемого чугуна
Microstructure of the investigated cast iron

Выводы

В результате проведенных в промышленных условиях исследований установлено, что экспериментальный низколегированный хромо-кремнистый чугун обладает высокой коррозионной стойкостью (превышающей штатно используемый высокопрочный чугун марки ВЧ 50 с шаровидным графитом почти в 4,8 раза) в атмосфере анодных газов и рекомендуется к промышленному применению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental Aspects of UC RUSAL's Aluminum Smelters Sustainable Development // TMS Light Metals. 2019. P. 553–563. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70
2. Юрьев А.Б., Темлянец М.В., Деев В.Б., Феоктистов А.В., Пинаев Е.А. Коррозия чугуновых секций газосборного колокола электролизеров ЭкоСодерберг // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 11-12. С. 883–890. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-883-890>
3. Шиманский И.А. Повышение коррозионной стойкости литых чугуновых изделий в условиях высокотемпературной газовой коррозии. Автореф. канд. дис. Красноярск. 2012. 22 с.
4. Терентьев А.А., Ножко С.И. О качестве алюминия-сырца для производства алюминиевой катанки // Системы Методы Технологии. 2018. Т. 37. № 1. С. 136–141.
5. Gomes A.S., Heilgendorff R.M. Carbon Plant Performance with Blended Coke // Light Metals. 2005. P. 659–663.
6. Edwards L.S., Neyrey K.J., Lossius L.P. A Review of Coke and Anode Desulfurization // TMS Light Metals. 2007. P. 895–900.
7. Adams A., Cahill R., Belzile Y., Cantin K., Gendron M. Minimizing Impact of Low Sulfur Coke on Anode Quality // TMS Light Metals. 2009. P. 957–962.
8. Gendron M., Whelan S., Cantin K. Coke Blending and Fines Circuit Targeting at the Alcoa Deschambault Smelter. In: Essential Readings in Light Metals. 2008. P. 861–864.
9. Vogt F., Tonti R., Edwards L.C. Global trends in anode grade coke availability & quality for Australasian aluminium industry. In: Proceedings of the 7th Australasian Smelting Technology Conference, Melbourne, Australia, November 11- 15, 2001.
10. Abbas H., Khaji K., Sulaman D. Desulphurization Control During Anode Baking, its Impact on Anode Performance and Operational Costs-Alba's Experience // TMS Light Metals. 2010. P. 1011–1014.
11. Sorlie M., Kuang Z., Thonstad J. Effect of Sulfur on Anode Reactivity and Electrolytic Consumption // TMS Light Metals. 1994. P. 659–665.
12. Grandfield J.F., Taylor J.A. The Downstream Consequences of Rising Ni and V Concentrations in Smelter Grade Metal and Potential Control Strategies // TMS Light Metals. 2009. P. 1007–1011.
13. Виноградов А.М., Пинаев А.А., Виноградов Д.А., Пузин А.В., Шадрин В.Г., Зорько Н.В., Сомов В.В. Повышение эффективности укрытия электролизеров Содерберга // Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. № 1. С. 19–30 <http://dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>
14. Sokolnikov V.A., Tyutrin A.A. Protection of cast iron sections of gas-collecting bell of soderberg electrolysis cell // Materials Science Forum. 2022. Vol. 1052. P. 238–243. <http://dx.doi.org/10.4028/p-wrd90w>

15. Шерман А.Д. Чугун. Москва: Metallurgiya, 1991. 576 с.
16. Пинаев Е.А., Темлянцев М.В., Протопопов Е.В., Большаков Д.Г., Темлянцева Е.Н., Симачев А.С. Исследование влияния алюминия на коррозионную стойкость чугунов при эксплуатации в среде анодных газов электролизеров ЭкоСодерберг // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. 2021. № 24. С. 116–121.
17. Пинаев Е.А., Темлянцев М.В., Куценко А.И., Симачев А.С., Бессонова О.В. Исследование стойкости чугунов к высокотемпературной газовой коррозии в среде анодных газов электролизеров ЭкоСодерберг // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 2 (44). С. 87–94. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-87-94](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-87-94)
18. Усольцев А.А., Козырев Н.А., Князев С.В., Куценко А.И., Михно А.Р. О возможности замены серых чугунов для изготовления литых элементов газосборного колокола электролизера // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 9. С. 1063–1070. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-9-1063-1070>
19. Пинаев Е.А., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н., Кувшинникова Н.И. Исследование химического и фазового состава продуктов коррозии чугунных секций газосборного колокола алюминиевых электролизеров ЭкоСодерберг // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2020. № 43. С. 144–151.
20. Патент SU 1425242. Чугун / Счисленок Л.Л., Шитов Е.И., Фамицкая Н.В., Иванченко Т.Ф. опубл. 23.09.1988. Бюл. № 35.
21. Курганов В.А. Жаростойкий чугун с шаровидным графитом // Литейщик России. 2011. № 10. С. 25–27.
890. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-883-890>
3. Shimanskii I.A. Improving the corrosion resistance of cast iron products in conditions of high-temperature gas corrosion. Extended abstract of candidate's thesis. Krasnoyarsk. 2012, 22 p. (In Russ.).
4. Terent'ev A.A., Nozhko S.I. About the quality of raw aluminum for the production of aluminum wire rod. *Sistemy Metody Tekhnologii*. 2018, vol. 37, no 1, pp. 136–141. (In Russ.).
5. Gomes A.S., Heilgendorff R.M. Carbon Plant Performance with Blended Coke. *TMS Light Metals*. 2005, pp. 659–663. (In Russ.).
6. Edwards L.S., Neyrey K.J., Lossius L.P. A Review of Coke and Anode Desulfurization. *TMS Light Metals*. 2007, pp. 895–900. (In Russ.).
7. Adams A., Cahill R., Belzile Y., Cantin K., Gendron M. Minimizing Impact of Low Sulfur Coke on Anode Quality. *TMS Light Metals*. 2009, pp. 957–962.
8. Gendron M., Whelan S., Cantin K. Coke Blending and Fines Circuit Targeting at the Alcoa Deschambault Smelter. In: *Essential Readings in Light Metals*. 2008, pp. 861–864.
9. Vogt F., Tonti R., Edwards L.C. Global trends in anode grade coke availability & quality for Australasian aluminium industry. In: *Proceedings of the 7th Australasian Smelting Technology Conference*, Melbourne, Australia, November 11–15, 2001.
10. Abbas H., Khaji K., Sulaman D. Desulphurization Control During Anode Baking, its Impact on Anode Performance and Operational Costs-Alba's Experience. *TMS Light Metals*. 2010, pp. 1011–1014.
11. Sorlie M., Kuang Z., Thonstad J. Effect of Sulfur on Anode Reactivity and Electrolytic Consumption. *TMS Light Metals*. 1994, pp. 659–665.
12. Grandfield J.F., Taylor J.A. The Downstream Consequences of Rising Ni and V Concentrations in Smelter Grade Metal and Potential Control Strategies. *TMS Light Metals*. 2009, pp. 1007–1011.
13. Vinogradov A.M., Pinaev A.A., Vinogradov D.A., Puzin A.V., Shadrin V.G., Zor'ko N.V., Somov V.V. Improving the efficiency of the shelter of Soderbergh electrolyzers. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2017, no. 1, pp. 19–30. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>
14. Sokolnikov V.A., Tyutrin A.A. Protection of cast iron sections of gas-collecting bell of soderberg electrolysis cell. *Materials Science Forum*. 2022, vol. 1052, pp. 238–243. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.4028/p-wrd90w>
15. Sherman A.D. Cast iron. Moscow: Metallurgiya, 1991. 576 c. (In Russ.).
16. Pinaev E.A., Temlyantsev M.V., Protopopov E.V., Bol'shakov D.G., Temlyantseva E.N., Simachev A.S.

REFERENCES

1. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental Aspects of UC RUSAL's Aluminum Smelters Sustainable Development. *TMS Light Metals*. 2019, pp. 553–563. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70
2. Yur'ev A.B., Temlyantsev M.V., Deev V.B., Feoktistov A.V., Pinaev E.A. Corrosion of cast iron sections of the gas collecting bell of the EcoSoderberg electrolyzers. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 11–12, pp. 883–

- Investigation of the influence of aluminum on the corrosion resistance of cast iron during operation in the environment of anode gases of EcoSoderberg electrolyzers. *Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Zapadno-Sibirskoe otdelenie*. 2021, no. 24, pp. 116–121. (In Russ.).
17. Pinaev E.A., Temlyantsev M.V., Kutsenko A.I., Simachev A.S., Bessonova O.V. Investigation of the resistance of cast iron to high-temperature gas corrosion in the environment of anode gases of Ecosoderberg electrolyzers. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2023, no. 2 (44), pp. 87–94. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-87-94](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-87-94)
 18. Usoltsev A.A., Kozyrev N.A., Knyazev S.V., Kutsenko A.I., Mikhno A.R. About the possibility of replacing gray cast iron for the manufacture of cast elements of the gas collecting bell of the electrolyzer. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*. 2021, vol. 77, no. 9, pp. 1063–1070. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-9-1063-1070>
 19. Pinaev E.A., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N., Kuvshinnikova N.I. Investigation of the chemical and phase composition of corrosion products of cast iron sections of the gas collecting bell of aluminum electrolyzers EcoSoderberg. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2020, no. 43, pp. 144–151. (In Russ.).
 20. Schislenok L.L., Shitov E.I., Famitskaya N.V., Ivanchenko T.F. Cast iron. Pat. SU 1425242. *Byulleten' izobretenii*. 1988, no. 35. (In Russ.).
 21. Kurganov V.A. Heat-resistant cast iron with spherical graphite. *Liteishchik Rossii*. 2011, no. 10, pp. 25–27. (In Russ.).

Сведения об авторах

Евгений Александрович Пинаев, директор по электролизному производству, АО «Русал Красноярск»
E-mail: Evgeniy.Pinaev@rusal.com

Михаил Викторович Темлянец, д.т.н., проректор по учебной работе, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0001-7985-5666

Артём Сергеевич Симачев, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: simachev_as@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9712-3757

Елена Николаевна Темлянцева, к.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедрой теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

Ольга Валерьевна Бессонова, главный специалист – металловед по электронной микроскопии и исследовательским работам, АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Information about the authors:

Evgenii A. Pinaev, Director for Electrolysis Production, JSC «Rusal Krasnoyarsk»
E-mail: Evgeniy.Pinaev@rusal.com

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Vice-Rector for Academic Affairs, Siberian State Industrial University
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0001-7985-5666

Artem S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metal Forming and Metal Science “EVRAZ ZSMK”, Siberian State Industrial University
E-mail: simachev_as@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9712-3757

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

Ol'ga V. Bessonova, Chief Specialist – Metallologist in electron microscopy and research work, JSC "EVRAZ ZSMK"

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 01.09.2023

После доработки 06.09.2023

Принята к публикации 10.09.2023

Received 01.09.2023

Revised 06.09.2023

Accepted 10.09.2023

Оригинальная статья

УДК 669.184.244.66

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-87-93

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КИСЛОРОДНЫХ СТРУЙ С РАСПЛАВОМ ПРИ ВЕРХНЕЙ ПРОДУВКЕ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ

© 2023 г. Е. В. Протопопов, А. А. Уманский, И. С. Морозов, М. К. Шакиров

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

Аннотация. С использованием математического моделирования выполнен комплексный анализ экспериментальных данных по исследованию особенностей поведения 350-т конвертерной ванны в характерные периоды верхней продувки при высокой скорости обезуглероживания расплава и на заключительном этапе операции. Разработанные и адаптированные математические модели и проведенные численные исследования позволили дополнительно описать макрофизические явления при движении газометаллической, газошлаковой и многокомпонентных фаз в рабочем пространстве конвертера. Установлено, что общая динамика и циркуляция газослакометаллической среды в целом определяется процессами в реакционной зоне и уровнем вспененного шлака. При продувке расплава через верхнюю фурму в режиме заглубленных газовых струй и различном количестве шлака в рабочем пространстве определены количественные характеристики относительных величин газосодержания в шлаке по отношению к средней плотности и концентрации газа в эмульсии. Полученные данные позволяют дополнить представления о гидродинамике металлической и шлаковой фаз в конвертере в характерные периоды плавки и использовать полученную информацию при разработке рациональных параметров дутьевого режима конвертерной операции.

Ключевые слова: конвертер, верхняя кислородная продувка, режим взаимодействия, гидрогазодинамика конвертерной ванны, математическая модель

Для цитирования: Протопопов Е.В., Уманский А.А., Морозов И.С., Шакиров М.К. Математическая модель режимов взаимодействия кислородных струй с расплавом при верхней продувке конвертерной ванны // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 87 – 93. [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-87-93](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-87-93)

Original article

MATHEMATICAL MODEL OF THE MODES OF INTERACTION OF OXYGEN JETS WITH THE MELT DURING UPPER PURGING CONVERTER BATH

© 2023 E. V. Protopopov, A. A. Umanskii, I. S. Morozov, M. K. Shakirov

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

Abstract. Using mathematical modeling, a comprehensive analysis of experimental data on the study of the behavior of a 350-ton converter bath during characteristic periods of upper purging at a high rate of decarburization of the melt and at the final stage of the operation was performed. The developed and adapted mathematical models and numerical studies made it possible to additionally describe macrophysical phenomena during the movement of gas-metallic, gas-slag and multicomponent phases in the working space of the converter. It is established that the overall dynamics and circulation of the gas-and-metal medium as a whole is determined by the processes in the reaction zone and the level of foamed slag. When the melt is purged through the upper lance in the mode of buried gas jets and a different amount of slag in the working space, quantitative characteristics of the relative values of the gas content in the slag in relation to the average density and concentration of gas in the emulsion are determined. The obtained data allow us to supplement the

understanding of the hydrodynamics of the metal and slag phases in the converter during the characteristic periods of melting and use the information obtained in the development of rational parameters of the blast mode of the converter operation.

Keywords: converter, upper oxygen purge, interaction mode, hydro-gas dynamics of the converter bath, mathematical model

For citation: Protopopov E.V., Umanskii A.A., Morozov I. S., Shakirov M.K. Mathematical model of the modes of interaction of oxygen jets with the melt during upper purging converter bath. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 87 – 93. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-87-93](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-87-93)

Введение

Происходящие в конвертерной ванне процессы связаны, прежде всего, с гидродинамическими и теплообменными явлениями в высокотемпературных средах. Эти процессы практически не поддаются непосредственному изучению или их исследование требует неоправданно высоких затрат средств и времени. Вместе с тем при использовании высокотемпературного и математического моделирования может быть получен значительный объем информации, а результаты моделирования могут послужить основой для новых технологических и конструктивных решений.

Накопленный экспериментальный материал по вопросам взаимодействия кислородных струй с расплавом [1 – 5], структуры реакционных зон и механизма рафинирования [6 – 9], поведения конвертерной ванны при продувке [10 – 14] при объединении и анализе позволяет сформировать основные положения физико-химической модели конвертерного процесса [2, 15] и на ее основе вплотную подойти к технически грамотному решению практических задач.

Реализация такого подхода при разработке параметров рационального дутьевого режима конвертерной операции может быть осуществлена при формировании основных положений разработанных математических моделей для исследования характерных периодов плавки.

Методы и принципы исследования

С учетом поставленных задач с использованием разработанной и усовершенствованной математической модели выполнены численные исследования особенностей газовыделения в 350-т конвертерной ванне при верхней продувке [16 – 18]. При постановке задачи для исследования выделены наиболее значимые периоды продувки ванны, в том числе этап активного обезуглероживания и заключительный этап операции продувки. В качестве допущений при расчетах приняты постоянные размеры образующейся реакционной зоны, масса расплава и уровень ванны в период продувки при рабочих параметрах дутья с учетом преимущественного расхода кислорода (примерно до

95 % от общего за плавку) в пределах реакционной зоны на обезуглероживание. Принято, что преимущественно реакция протекает на границе раздела струи кислорода с металлом. Задача решена в осесимметричной постановке в предположении, что граница раздела газометаллической и газошлаковой фаз фиксирована, определяется уровнем металла в конвертере и параболическим законом при описании формы реакционной зоны.

Определяющие глубину внедрения газовой струи в расплав и диаметр реакционной зоны параметры задавали исходя из эмпирических закономерностей.

Поскольку в разработанной модели исследуемые газометаллическая и газошлаковая фазы являются газожидкостными средами, последние могут быть описаны следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}_p}{\partial t} &= - \left(\vec{V}_p \vec{\nabla} \right) \vec{V}_p + v_e \Delta \vec{V}_p + \\ &+ \zeta_e \vec{\nabla} (\vec{V}_p - \vec{V}) + (1 - \alpha) \vec{g} - \vec{\nabla} \vec{p}; \\ \vec{\nabla} \vec{V}_p &= \Phi(\vec{V}_p, \alpha); \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} &= - \vec{V}(\alpha \vec{V}_p) + \Phi(\vec{V}_p, \alpha), \end{aligned} \right\}$$

в которой $\vec{V}_p$ – барицентрическая скорость среды; v_e и ζ_e – кинематическая и динамическая вязкость; α – коэффициент объемного газосодержания; $\vec{p}$ – динамическая составляющая давления, отнесенная к плотности несущей жидкой фазы (металла и шлака).

В этом случае эффективный источник газовой фазы в газожидкостной среде можно представить выражением

$$\Phi(\vec{V}_p, \alpha) = \psi - \alpha \xi_p \vec{g} (\vec{V}_p + \vec{W}_p) - \vec{\nabla}(\alpha \vec{W}_g),$$

полученным в пренебрежении динамической составляющей давления по сравнению с гидростатической, что возможно для режимов течения, реализуемых при продувке конвертерной ванны (здесь ψ и ξ – объемный источник газовой фазы и логарифмическая производная плотности этой фазы по давлению). Входящая в это выражение

диффузионная скорость ($\vec{W}_g$) газовой фазы имеет конвективную ($\vec{W}_g^c$) и турбулентную ($\vec{W}_g^t$) составляющие. Конвективная составляющая в вакуумном приближении имеет постоянное направление, определяемое ускорением свободного падения, а величина ее задана непосредственно исходя из экспериментальных данных. Турбулентная составляющая определяется через эффективный коэффициент турбулентной диффузии газовой фазы (D_g) соотношением

$$\alpha \vec{W}_g^t = -D_g \vec{\nabla}.$$

Обсуждение результатов

Расчеты проведены для условий плавки в 350-т конвертерах АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с параметрами дутьевого режима, разработанного в соответствии с ТИ 899-ККЦ-2-01-2019. Геометрические параметры конвертеров: высота рабочего пространства 9,76 м; диаметр нижней части 6,4 м; диаметр горловины 3,46 м; высота конической части горловины 2,57 м; уровень металла в конвертере 1,5 м, при рабочем положении фурмы 1,2 м от поверхности металла; расход кислорода на продувку составляет 900 – 1200 м³/мин; использование 4-х сопловой фурмы; диаметр сопла 0,054 м; угол наклона сопел составляет 15° к оси симметрии агрегата; глубина реакционной зоны 0,9 м. Граничные условия определяли в соответствии с решаемыми задачами.

Результаты расчета, полученные для двух характерных значений уровня шлака в конвертере 1,5 и 3,0 м, приведены на рис. 1 (стрелки указывают направления скоростей, кривые – линии изоконцентрации газовой фазы с коэффициентом объемного газосодержания, изменяющимся в пределах от 0,05 до 0,20).

Как показывает анализ (рис. 1), на качественном уровне фиксируется значительное влияние динамики газшлаковой фазы, которая существенно зависит от ее уровня и количества в объеме конвертера, при этом аналогичное влияние на динамику газометаллической фазы незначительно. В связи с отмеченными особенностями в дальнейшем выполнили отдельный ана-

лиз полученных результатов для условий газометаллической и газшлаковой фаз.

Расплав (рис. 1) движется в замкнутом глобальном вихре, при этом восходящие потоки фиксируются вдоль поверхности реакционной зоны и границы раздела с газшлаковой фазой, затем потоки всплывающими пузырями оттесняются к стенкам конвертера, опускаются вдоль стенок к днищу конвертера и в дальнейшем возвращаются по поверхности к реакционной зоне.

Таким образом формируются замкнутые контуры циркуляции, которые определяют общую скорость движения ванны и теплообмен. В области симметрии агрегата образуется вихрь, вращающийся в противоположном направлении. У днища конвертера, под реакционной зоной, потоки расплава, входящие в эти два вихря, сталкиваются, очевидно, перемешиваются и направляются вверх, образуя границу раздела вихрей. На участке реакционной зоны расплав имеет значительное количество газовых включений, что обусловлено совместными действиями газовой струи и всплывающих пузырей оксида углерода CO.

Общая динамика газшлаковой фазы, очевидно, будет определяться уровнем вспененного шлака. Важным фактором здесь является доказательство существования интенсивного потока газшлаковых объемов от границы реакционной зоны к поверхности шлака, обусловленного движением газа, который выделяется в реакционной зоне. Газ при движении увлекает всплы-

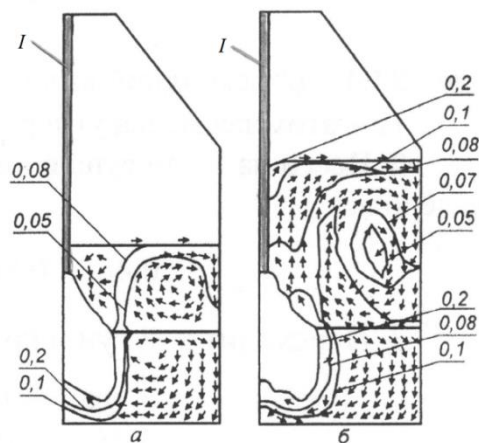


Рис. 1. Гидродинамика металлической и шлаковой фаз в рабочем пространстве конвертера при продувке через фурму (I) в режиме «заглубленных» струй при уровне шлака в конвертере 1,5 м (а) и 3,0 м (б) (стрелки – направление скоростей; кривые – линии изоконцентрации газовой фазы; цифры – коэффициенты объемного газосодержания)
Fig. 1. Hydrodynamics of metal and slag phases in the working space of the converter when blowing through the tuyere (I) in the mode of "buried" jets at the slag level in the converter of 1.5 m (a) and 3.0 m (b) (arrows – velocity direction; curves – lines of gas phase isoconcentrations; figures – coefficients of volumetric gas content)

вающий шлак, который у свободной поверхности частично освобождается от газовых включений, разделяясь на два потока. Первый, двигаясь к стенкам конвертера, а затем вдоль них вниз, образует основной интенсивный тороидальный вихрь, вращающийся в плоскости рисунка по часовой стрелке. Второй поток движется к кислородной фурме и образует в верхних горизонтах ванны области вихря, вращающегося в противоположном направлении. При этом с повышением уровня шлака центр основного вихря смещается вверх (рис. 1, б).

Распределение газовых включений также существенно зависит от уровня шлака в конвертере. При относительно небольшом количестве вспененного шлака (рис. 1, а) значительное количество газа, образующегося в объеме реакционной зоны, достигает свободной поверхности и покидает зону шлаковой фазы и лишь незначительная его доля затягивается обратно в шлак у стенок конвертера нисходящими потоками. С увеличением общего уровня вспененного шлака (рис. 1, б) количество газа, не успевающего покинуть шлак, постепенно увеличивается. Всплывающий газ вовлекается в глобальный общий вихрь, в результате чего его концентрация в центре вихря возрастает, что приводит к прорывам оболочки газошлакометаллической эмульсии и выходу газовых объемов на поверхность ванны.

Численным моделированием определены количественные характеристики относительных величин газосодержания в шлаке, то есть объемная концентрация газа рассчитана по отношению к средней плотности газошлаковой эмульсии. При этом заметное содержание газа в металле наблюдается только в области, примыкающей к реакционной зоне, где значение α превышает 0,2. В шлаке газовые объемы относительно равномерно распределены по высоте вблизи стенок конвертера, где значение α не более 0,1. В центре зоны вихря газосодержание превышает величину 0,25.

Наиболее интенсивный выход газа со свободной поверхности шлака для исследованных уровней приходится на участок, соответствующий границе реакционной зоны. При этом в случае незначительного уровня вспененного шлака такой максимум наиболее выражен. С повышением уровня шлака высота такого пика уменьшается и он «растягивается» в сечении ванны в направлении к стенкам конвертера.

Описанная модель позволила исследовать общий характер движения циркуляционных потоков и характерное распределение зоны всплывания газовых пузырей в металлической и шлаковой фазах, однако без учета возможности существования на поверхности расплава участков

интенсивного «свищевого» выхода газа на поверхность шлака с коэффициентом газосодержания, близким к единице. Такой подход связан с принципиальным допущением в модели, что значение коэффициента газосодержания незначительно.

С целью численного исследования влияния этих зон на протекание газодинамических процессов в полости конвертера разработали математическую модель, которая учитывает существование в рабочем объеме агрегата зон со значительно большим газосодержанием, расположение которых определялось с использованием ранее полученных экспериментальных данных [5, 10, 12]. Наличие таких зон способствует повышенному газосодержанию ванны на заключительном этапе продувки при незначительной скорости обезуглероживания и, соответственно, способствует повышенной окисленности металла. Такие зоны явно выделялись и не включались в расчетную область.

Задачу решали в цилиндрически симметричной постановке, что обусловлено расположением верхней фурмы по оси симметрии конвертера. Как и ранее [17], предполагали, что граница раздела газометаллической и газошлаковой зон фиксирована и определяется уровнем металла в конвертере и формой реакционной зоны.

Границы зоны со значительным газосодержанием определяли по параболическому закону $y = ax^2 + bx + c$, где коэффициенты a , b , c находили при решении соответствующих линейных алгебраических уравнений. В частности, для параболы, описывающей правую границу зоны, коэффициенты выбирались в соответствии со следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} a &= -\frac{(H_{\text{шл}} - c)}{\beta^2}; \\ b &= \frac{2(H_{\text{шл}} - c)}{\beta}; \\ c &= \frac{H_M + H_{\text{шл}} [(R_{p.3} - 1,5) / (\beta - 2)] / \beta}{[(R_{p.3} - 1,5 / \beta^2)] - 2(R_{p.3} - 1,5) / (\beta + 1)}, \end{aligned} \right\}$$

а для параболы, описывающей левую границу, выражениями:

$$\left. \begin{aligned} a &= -\lambda / (H_{\text{шл}} - H_M - \delta)^2; \\ b &= 2\lambda / (H_M + \delta) / (H_{\text{шл}} - H_M - \delta)^2; \\ c &= 5\beta - \lambda (H_M + \delta)^2 / (H_{\text{шл}} - H_M - \delta)^2; \end{aligned} \right\}$$

здесь $H_{\text{шл}}$ и $H_{\text{м}}$ – высота слоев шлака и металла; β и δ – масштабные коэффициенты по радиусу и высоте; $R_{\text{р.з}}$ – радиус реакционной зоны; λ – расстояние от оси симметрии конвертера до правой границы зоны на поверхности шлака.

В этом случае динамику газожидкостной среды можно описывать следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}_p}{\partial t} &= - \left(\vec{V}_p \vec{\nabla} \right) \vec{V}_p + v_e \vec{\Delta} \nabla + (1-\alpha) \vec{g} - \vec{\nabla} \tilde{p}; \\ \vec{\nabla} \vec{V}_p &= \Phi(\vec{V}_p, \alpha); \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{\nabla}(\alpha \vec{V}_p) &= \Phi(\vec{V}_p, \alpha); \\ \Phi(\vec{V}_p, \alpha) &= \psi - \alpha \xi \rho \vec{g} (\vec{V}_p + \vec{W}_g) - \vec{\nabla}(\alpha \vec{W}_g), \end{aligned} \right\}$$

где $\vec{\Delta}$ – оператор Лапласа; $\xi = 1/\gamma\rho$.

В прифурменной области действует источник газовой фазы $\psi = qO_2 T / (273Q)$, где qO_2 – минутный расход кислорода через фурму; Q – характерный расход газа; T – температура металла.

При выполнении моделирования численные решения выполняли методом расщепления по физическим факторам для несолоноидального движения среды в двухмерном случае в цилиндрической системе координат. Граничные условия задавали, выполняя следующие условия: для барицентрической скорости среды газ – расплав на твердых поверхностях, свободной поверхности и оси симметрии – условия свободного скольжения; для коэффициента объемного содержания на твердых поверхностях и оси симметрии – условия не протекания, а на свободной поверхности и оси симметрии – свободного протекания. В зоне с большим газосодержанием граничные условия определяются с учетом условий баланса. Таким образом, для ячейки с номером (i, n) справедливы соотношения $a_{i,n} = \alpha_{\text{общ}}/N$ и $w_{i,n} = Q/S_n$ (здесь $\alpha_{\text{общ}}$ – общее количество газа на n -м слое; N – количество ячеек, приходящихся на зону с большим газосодержанием на n -м слое; Q – характерный расход газа; S_n – площадь n -го слоя).

В численных расчетах варьировали общее количество газа на n -м слое, накапливающегося для формирования зоны с большим газосодержанием. Результаты тестовых расчетов, иллюстрирующих характер движения среды в объеме конвертера для двух различных значений $\alpha_{\text{общ}}$, представлены на рис. 2.

Расплав в конвертере (рис. 2, а) движется в едином глобальном вихре. В объеме ванны металл под действием газовых потоков в реакционной зоне формируется в вихревой поток, движущийся по часовой стрелке. В случае, показанном на рис. 2, б, в области стенок агрегата на границе раздела металлической и шлаковой фаз формируется малый нестационарный вихрь, движущийся против часовой стрелки, что, по видимому, обусловлено большими значениями скоростей около данной границы. При этом под реакционной зоной в обоих случаях наблюдается формирование дополнительного вихря, движущегося также по часовой стрелке.

Общим в рассмотренных случаях является существование интенсивного потока всплывающих газшлаковых объемов от реакционной зоны к поверхности шлака, что обусловлено движением газа при выделении из реакционной зоны и направленном в зону с большим газосодержанием. При таком движении газ захватывает и шлак, который у свободной поверхности создает дополнительный вихрь, движущийся по часовой стрелке.

Значительное газосодержание в металле наблюдается только в области, примыкающей к реакционной зоне. При подъеме к поверхности концентрация газа уменьшается, а ее относительный объем растет. В шлаке газ относительно равномерно распределяется по высоте около границы выделенной зоны с большим газосодержанием как с правой, так и с левой стороны. Насыщение газом и формирование газшлаковой среды происходит практически на всем пути движения потока к свободной поверхности, при этом

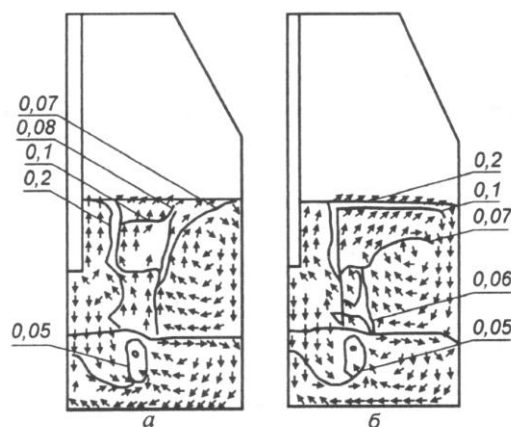


Рис. 2. Динамика металлической и шлаковой фаз для двух разных значений $\alpha_{\text{общ}}$ и изолинии концентраций газовой фазы в полости конвертера (стрелки – направление скоростей; кривые – линии изоконцентраций газовой фазы; цифры – коэффициенты объемного газосодержания)

Fig. 2. Dynamics of metal and slag phases for two different values of the total and isolines of gas phase concentrations in the cavity of the converter (arrows – direction of velocities; curves – lines of gas phase isoconcentrations; figures – coefficients of volumetric gas content)

незначительная часть газа будет втягиваться в глобальный вихрь. При увеличении значения $\alpha_{\text{общ}}$ газ интенсивнее захватывается глобальным вихрем и распределяется вдоль стенок конвертера, накапливаясь и формируя на этих участках застойные зоны. Тем не менее наибольшая концентрация газовой фазы все равно наблюдается в пределах реакционной зоны.

Выводы

Полученная численными исследованиями макрофизическая картина качественно согласуется с результатами «горячего» моделирования движения газшлакометаллической среды в рабочем пространстве конвертера. Разработанные математические модели и проведенные численные эксперименты позволили дополнить сведения о характере движения газометаллической и газшлаковой сред, механизме накопления газа в объеме 350-т конвертера и выходе продуктов реакции на поверхность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сизов А.М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. Москва: Металлургия, 1987. 256 с.
- Баптизманский В.И., Охотский В.Б. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса. Киев-Донецк: Вища школа, 1981. 183 с.
- Охотский В.Б. Строение газовых струй // Известия вузов. Черная металлургия. 1983. № 11. С. 32–35.
- Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. Москва: Металлургия, 1974. 495 с.
- Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Исследование взаимодействия кислородных струй с отходящими конвертерными газами // Известия вузов. Черная металлургия. 1996. № 10. С. 5–9.
- Охотский В.Б., Чернятевич А.Г., Просвирина К.С. О механизме процесса выгорания углерода при продувке металла кислородом. В кн.: Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. научн.-техн. сб. № 52. Киев: Техника. 1977. С. 71–72.
- Охотский В.Б., Баптизманский В.И., Просвирина К.С., Щедрин Г.А. Строение реакционной зоны при продувке металла кислородом // Известия вузов. Черная металлургия. 1973. № 8. С. 50–53.
- Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Юдин С.В. Исследование химических и температурных градиентов в конвертерной ванне с использованием высокотемпературного моделирования // Известия вузов. Черная металлургия. 1997. № 10. С. 20–24.
- Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Экспериментальное изучение параметров реакционной зоны конвертерной ванны в целях комбинированной продувки // Известия вузов. Черная металлургия. 1991. № 6. С. 17–24.
- Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я., Борисов Ю.Н., Волович М.И. О механизме образования выбросов из кислородного конвертера с верхней продувкой // Известия вузов. Черная металлургия. 1976. № 10. С. 54–59.
- Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Юдин С.В. Гидродинамические особенности поведения конвертерной ванны при различных способах продувки // Известия вузов. Черная металлургия. 1998. № 8. С. 23–29.
- Мокринский А.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Гидродинамические режимы взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной // Известия вузов. Черная металлургия. 2005. № 4. С. 11–17.
- Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В., Ганзер Л.А. О некоторых особенностях окисления примесей в конвертерной ванне при комбинированной продувке // Известия вузов. Черная металлургия. 1987. № 4. С. 25–29.
- Охотский В.Б. Взаимодействие газовой струи с жидкостью при продувке сверху // Известия вузов. Черная металлургия. 1984. № 1. С. 45–49.
- Охотский В.Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов. Москва: Металлургия, 1993. 151 с.
- Чернятевич А.Г., Сигарев Е.М., Зуев О.И. // Математичне моделювання. 2002. № 1 (8). С. 77–80.
- Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г., Селищев В.Н. // Математичне моделювання. 2001. № 1 (6). С. 93–96.
- Сигарев Е.Н., Косухина О.С., Попко О.В. // Математичне моделювання. 2003. № 1 (9). С. 50–53.

REFERENCES

- Sizov A.M. *Gas dynamics and heat exchange of gas jets in metallurgical processes*. Moscow: Metallurgiya, 1987, 256 p. (In Russ.).
- Okhotskii V.B. Structure of gas jets. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1983, no. 11, pp. 32–35. (In Russ.).
- Baptizmanskii V.I., Okhotskii V.B. *Physico-chemical bases of the oxygen converter process*. Kiev-Donetsk: Vishcha shkola, 1981, 183 p. (In Russ.).
- Yavoiskii V.I., Dorofeev G.A., Povkh I.L. *The theory of purging a steelmaking bath*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 495 p. (In Russ.).
- Protopopov E.V., Chernyevich A.G. Investigation of the interaction of oxygen jets with

- waste converter gases. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1996, no.10, pp. 5–9. (In Russ.).
6. Okhotskii V.B., Chernyatevich A.G., Prosvirin K.S. On the mechanism of the carbon burnout process when metal is purged with oxygen. In: *Metallurgy and Coke Chemistry: Rep. mezhved. sci.-tech. sat.* Kyiv: Tekhnika, 1977, no. 52, pp. 71–72. (In Russ.).
 7. Okhotskii V.B., Baptizmanskii V.I., Prosvirin K.S., Shchdrin G.A. The structure of the reaction zone during metal purging with oxygen. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1973, no. 8, pp. 50–53. (In Russ.).
 8. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. Investigation of chemical and temperature gradients in a converter bath using high-temperature modeling. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1997, no. 10, pp. 20–24. (In Russ.).
 9. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Experimental study of the parameters of the reaction zone of a converter bath for the purpose of combined purging. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1991, no. 6, pp. 17–24. (In Russ.).
 10. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya., Borisov Yu.N., Volovich M.I. On the mechanism of emission formation from an oxygen converter with an upper purge. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1976, no. 10, pp. 54–59. (In Russ.).
 11. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. Hydrodynamic features of the behavior of the converter bath with various methods of purging. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1998, no. 8, pp. 23–29. (In Russ.).
 12. Mokrinsky A.V., Protopopov E. V., Chernyatevich A.G. Hydrodynamic modes of interaction of acidic jets with a converter bath. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2005, no. 4, pp. 11 – 17. (In Russ.).
 13. Chernyatevich A.G., Protopopov E. V., Ganzer L.A. On some peculiarities of the oxidation of impurities in a converter bath during combined purging: Investigation of the interaction of acidic jets with outgoing gases. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1987, no. 4, pp. 25–29. (In Russ.).
 14. Okhotskii V.B. Interaction of a gas jet with a liquid when purging from above. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1984, no. 1, pp. 45–49. Нет названия (In Russ.).
 15. Okhotskii V.B. *Physico-chemical mechanics of steelmaking processes*. Moscow: Metallurgiya, 1993, 151 p. (In Russ.).
 16. Chernyatevich A. G., Sigarev E. M., Zuev O. I. *Matematichne modelyuvannya*. 2002, no. 1 (8), pp. 77–80. (In Russ.).
 17. Sigarev E. N., Chernyatevich A. G., Selishchev V.N. *Matematichne modelyuvannya*. 2001, no. 1 (6), pp 93–96. (In Russ.).
 18. Sigarev E. N., Kosukhina O. S., Popko O. V. *Matematichne modelyuvannya*. 2003, no. 1 (9), pp. 50–53. (In Russ.).
- Сведения об авторах**
Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7554-2168
E-mail: protopopov@sibsiu.ru
- Александр Александрович Уманский**, д.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: umanskii@bk.ru
ORCID 0000-0003-4403-9006
- Иван Сергеевич Морозов**, соискатель кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: ismorozov23@mail.ru
- Максим Кимович Шакиров**, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: sakirov.maxim@mail.ru
ORCID: 0009-0007-4938-5975
- Information about the authors**
Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7554-2168
E-mail: protopopov@sibsiu.ru
- Aleksandr A. Umanskii**, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
E-mail: umanskii@bk.ru
ORCID 0000-0003-4403-9006
- Ivan S. Morozov**, Candidates for a Degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
E-mail: ismorozov23@mail.ru
- Maksim K. Shakirov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Information Systems, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: sakirov.maxim@mail.ru
ORCID: 0009-0007-4938-5975
- Поступила в редакцию 01.09.2023
 После доработки 15.09.2023
 Принята к публикации 16.09.2023
- Received 01.09.2023
 Revised 15.09.2023
 Accepted 16.09.2023

Оригинальная статья

УДК 336.012.23

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-94-103

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМНЫХ МОДЕЛЕЙ РОССИЙСКИХ БАНКОВ

© 2023 г. Д. Ю. Бобошко, Д. М. Трейстарь

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Отмечается недостаточная изученность относительно новых в российской и мировой практике явлений цифровых экосистем и бизнес-экосистем. Представлены результаты исследования понятийного аппарата, используемого в описании формирования и функционирования банковских экосистем в РФ. Анализ базировался на данных открытой для исследователей и научных организаций платформы The Lens. Было проанализировано более 2000 источников, что стало возможным благодаря проведению кластерного анализа связей ключевых терминов («key words»). Данный вид библиометрического исследования выполнен с помощью программного инструмента VosViewer. Полученные результаты представлены в виде карты связей выбранных областей исследования (цифровые экосистемы, бизнес-экосистемы и бизнес-модели) и интерпретированы по связующим элементам. Протяженность анализируемого периода и общее количество исследуемых публикаций на платформе позволяют сделать вывод о репрезентативности полученных результатов. На основе анализа базовых определений и практики функционирования банкоцентричных экосистем в РФ было сформулировано обобщающее определение банковской экосистемы и выявлены основные ее признаки. Показана эволюция концепций бизнес-экосистем. В ходе исследования установлено, что формирование методологических основ развития экосистем в российской и зарубежной научной мысли еще находится на стадии становления. Определена сущность и ключевые признаки банкоцентричной экосистемы. Проанализированы цифровые технологии, внедряемые в настоящее время в практику функционирования банкоцентричных экосистем. Результаты исследования могут быть использованы в изучении теоретических основ экосистемного подхода к организации бизнеса и в целях формирования нормативной базы для регулирования деятельности банковских экосистем.

Ключевые слова: цифровая экосистема, цифровая платформа, банковская экосистема, бизнес-экосистема, бизнес-модель, VosViewer, кластерный анализ

Для цитирования: Бобошко Д.Ю., Трейстарь Д.М. Теоретические основы формирования экосистемных моделей российских банков // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 94 – 103. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-94-103](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-94-103)

Original article

THEORETICAL BASIS FOR THE FORMATION OF ECOSYSTEM MODELS OF RUSSIAN BANKS

© 2023 D. Yu. Boboshko, D. M. Treistar'

National University of Science and Technology "MISIS" (4 Leninskii Ave., Moscow, 119049, Russian Federation)

Abstract. The article notes the insufficient knowledge of such relatively new phenomena in Russian and world practice as digital ecosystems, business ecosystems. The results of a study of the conceptual apparatus used in describing the formation and functioning of banking ecosystems in the Russian Federation are presented. The analysis was based on data from The Lens platform, which is open to researchers and scientific organizations. More than

2,000 sources were analyzed, which became possible thanks to cluster analysis of relationships between key terms. This type of bibliometric study was carried out using the VosViewer software tool. The results obtained are presented in the form of a map of connections of the selected areas of research, which were “Digital Ecosystems”, “Business Ecosystems” and “Business Models” and interpreted according to the connecting elements. The duration of the analyzed period and the total number of publications studied on the platform allow us to conclude that the results obtained are representative. As a result of the analysis of the basic definitions and practice of functioning of bank-centric ecosystems in the Russian Federation, a promising definition of the banking ecosystem was formulated and its main features were identified. The evolution of business ecosystem concepts is shown. The study found that the formation of methodological foundations for the development of ecosystems in Russian and foreign scientific thought is still in its infancy. The essence and key features of a bank-centric ecosystem are determined. The digital technologies currently being introduced into the practice of functioning of bank-centric ecosystems are analyzed. The results of the study can be used both in studying the theoretical foundations of the ecosystem approach to business organization, and in order to form a regulatory framework for regulating the activities of banking ecosystems.

Keywords: digital ecosystem, digital platform, banking ecosystem, business ecosystem, business model, VosViewer, cluster analysis

For citation: Boboshko D.Yu., Treistar' D.M. Theoretical foundations for the formation of ecosystem models of Russian banks. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 94 – 103. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-94-103](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-94-103)

Введение

Формирование экосистем в России уже началось, однако в настоящее время сложно дать единое объективное определение термину «цифровая бизнес-экосистема», так как цифровые экосистемы остаются неизученной до конца областью, как в российской научной практике, так и в мировой. В последние годы понятие бизнес-экосистемности упоминается все чаще в научной литературе и других открытых источниках информации [1 – 4], однако этого недостаточно для того, чтобы говорить о наличии единых, объективных и устоявшихся теоретических основах для изучения данного вопроса.

Целью настоящего исследования является изучение теоретических основ формирования экосистем в банковской отрасли и выявление базовых принципов их построения и функционирования. Для достижения цели был проведен библиометрический анализ актуальных исследований на эту и смежные с ней темы, осуществлен кластерный анализ связей ключевых терминов, а также выявлены основные характеристики банкоцентричных экосистем.

Материалы и методы исследования

Ввиду того, что базы данных рецензируемой научной литературы Scopus и Web of Science (WoS) ограничили доступ к своим ресурсам в России, анализ осуществлен на базе открытой платформы для исследователей и научных организаций The Lens [5]. Эта база является наиболее полной и даже превосходит по своей ширине ведущие глобальные коммерческие базы данных. Чтобы получить наиболее объективную картину результатов библиометрического анали-

за научных сетей, при отборе массива научных работ на платформе The Lens были применены фильтры: «publication topic», «publication type», «subject» и «publication year». Запрос сформирован из четырех различных тем (в табл. 1 – «publication topic»). Используемые при отборе фильтры поисковых запросов представлены в табл. 2.

В результате анализа было выявлено 1690 научных работ, соответствующих вышеуказанным критериям поиска, из которых 1436 опубликованы после 2015 года. Статистика количества публикаций по годам в период с 2002 по 2022 представлена на рис. 1, где продемонстрирован тренд роста количества научных работ по запросу, сформированному в соответствии с фильтрами из табл. 2. Общий тренд демонстрирует рост популярности темы цифровых бизнес-экосистем на платформе The Lens, что в очередной раз подтверждает актуальность настоящего исследования. Несомненно, подобный тренд напрямую связан с развитием информационных технологий и их влиянием на экономику.

Для более объективной и детальной оценки содержательной части научных работ, ранее отобранных на платформе The Lens, был осуществлен кластерный анализ связей ключевых терминов («key words»). Он основан на библиометрическом исследовании и выполнен с помощью программного инструмента VosViewer. Кластерный анализ позволил выстроить карту актуальных областей исследования понятий «цифровые экосистемы», «бизнес-экосистемы» и «бизнес-модели», а также выявить различные смысловые и структурные связи между ними и другими областями исследований. Результаты кластерного анализа в виде карты связей и выводы по нему представлены на рис. 2.

Фильтры запросов при отборе массива данных на платформе The Lens
Table 1. Query filters when selecting a data array on The Lens platform

№	Фильтр	Выбранные значения
1	«publication topic» =	Digital ecosystems, Business ecosystems, Digital banks, Business models
2	«publication type» =	Journal article, Dissertation, Conference proceedings article, Book, Report
3	«subject» =	Business and International Management, Economics and Econometrics, Management of Technology and Innovation, Information Systems, General Business, Management and Accounting, Software, Marketing, Modelling and Simulation, Business, General Economics, Econometrics and Finance, Finance, Information Systems and Management
4	«publication year» =	2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023

Анализ выявил как явную, так и неявную кластеризацию. Обнаружены скопления различных терминологических структур, объединенных общими признаками. Кластер, описывающий объекты исследования, включает в себя инновационные экосистемы и бизнес-модели. Отдельным кластером выделились различные методы и технологии, применяемые в контексте экосистем. Обнаружены также значимые связующие элементы: «экосистема», «коммерция» и «конфиденциальность». Выявленные в ходе анализа связующие элементы позволяют оценить, как образованные кластеры связаны между собой, а

также сделать выводы о характере их взаимозависимости.

Основные результаты

Комплексный анализ полученных данных позволил сформировать наиболее объективное представление о цифровых экосистемах и их признаках. Интерпретация результатов кластерного анализа с точки зрения выявленных связующих элементов представлена в табл. 2.

Анализ научной литературы позволил углубиться в область развития экосистем и сделать вывод о том, что теоретические основы для изучения данного явления все еще активно формируются.

Интерпретация результатов кластерного анализа по связующим элементам
Table 2. Interpretation of the results of cluster analysis by connecting elements

Связующий элемент	Выявленные связи по карте	Характеристика (интерпретация)
Экосистема (Ecosystem)	Человеческие активности, коммерция, теория ценностей, интегрированное управление, цифровизация, инновационные экосистемы, бизнес-модели, искусственный интеллект	Описывает экосистему как инновационную бизнес-модель, отмечает связь экосистемы с теорией создания ценностей (для потребителя) и интегрированной системой управления. Цифровизация – двигатель.
Коммерция (Commerce)	Информационные технологии, капитальные вложения, экономические модели, экосистемы, интернет, интегрированный менеджмент	Описывает коммерцию как важную область тематических исследований. Связывает экосистемные модели с коммерческими выгодами и капитальными вложениями. Важность ИТ.
Конфиденциальность (Privacy)	Мобильные приложения, электронное здоровье, человеческие активности, монетизация данных, обмен данными, большие данные	Описывает связь экосистемы с проблемой конфиденциальности. Наблюдается связь между человеческими активностями, мобильными приложениями, обменом данными и их конфиденциальностью. Отмечается вопрос монетизации данных.

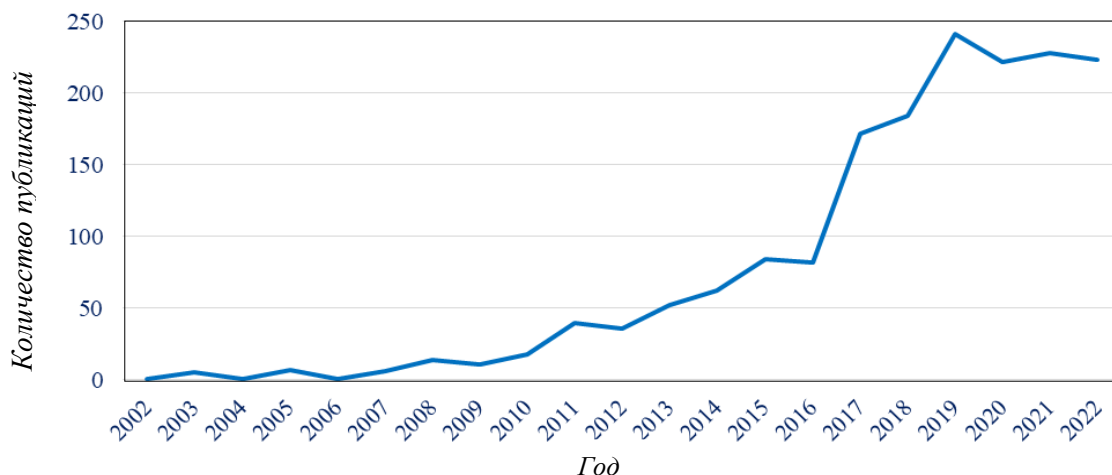


Рис. 1. Статистика научных публикаций в базе The Lens за период с 2002 по 2022 гг. [1]

Fig. 1. Statistics of scientific publications in The Lens database for the period from 2002 to 2022 [1]

руются. Стоит отметить, что в российском научном сообществе тема цифровых экосистем также является достаточно популярной: найдено 444 научных работы (по состоянию на 16.04.2023) в крупнейшей российской научной библиотеке eLIBRARY [6] по запросу «Банковские экосистемы» с применением фильтров из табл. 2. Дальнейшее исследование будет строиться на существующих представлениях о цифровых экосистемах [7 – 9], реальных практиках их внедрения в РФ [10, 11] и авторском анализе.

Впервые концепция бизнес-экосистем была разработана и представлена в 90-х годах американским предпринимателем Джеймсом Ф. Муром, позаимствовавшем термин «экосистемы» из другой науки – биологии. Им была дана следующая формулировка экосистемы: это совокупность экономических субъектов, которая служит основой для взаимодействия между различными участниками делового сообщества [12]. Было установлено, что бизнес-экосистемы позволяют вовлеченным компаниям предоставлять комплексные решения, включающие в себя «полный пакет ценностей» для клиента, которые ни одна отдельная компания не смогла бы предложить самостоятельно [12]. К элементам экосистемы предприниматель относил поставщиков, производителей, конкурентов и любых других стейкхолдеров.

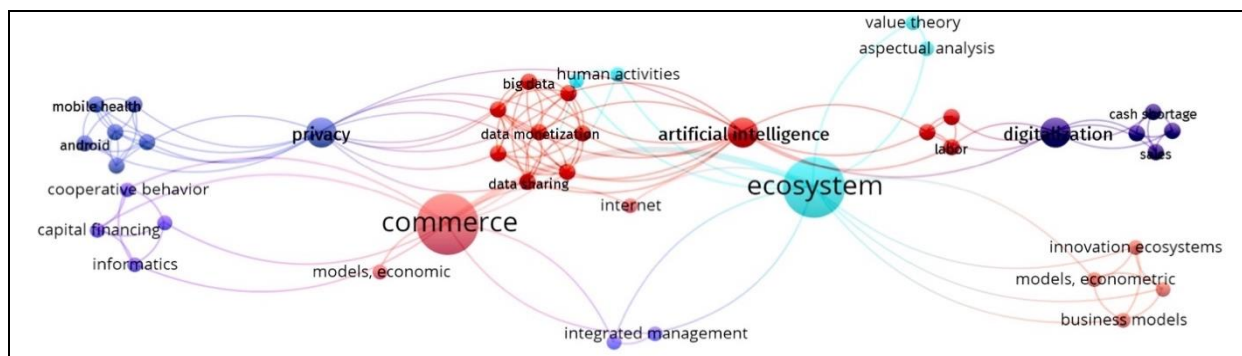
Сформулированная Д.Ф. Муром концепция была реформирована в 2000-х годах американским профессором в области стратегии и предпринимательства – Роном Аднером. В его трудах отмечалась важность клиентоцентричности [13] и смещения фокуса с производителя на потребителя. Автором работы [13] установлено, что экосистема определяется согласованной структурой многостороннего набора партнеров, которым необходимо взаимодействовать для

того, чтобы материализовать ценностное предложение для клиента. Исходя из сформулированных им принципов также следовало, что не компания определяет ценностное предложение, а сам потребитель.

В 2018 году концепция бизнес-экосистем подверглась новым корректировкам, но уже со стороны британского экономиста, специализирующегося в области цифровых экосистем, Майкла Г. Якобидеса [14]. В его работах отмечается, что возникновению экосистем на самом деле способствуют модульность и платформенность, поскольку они позволяют ряду отдельных, но взаимозависимых организаций координировать свои действия без полного иерархического устройства. Автором работы [14] были значительно смещены акценты исследования бизнес-экосистем сначала в сторону инноваций, а позже – и в сторону цифровых технологий.

В России активно изучать явление экосистем стали относительно недавно. Наиболее полное определение термина «цифровой экосистемы» в 2021 году дал главный эмиссионный и денежно-кредитный регулятор страны [15]. Банком России было установлено, что экосистема представляет собой построенную на основе данных о клиентах совокупность сервисов, позволяющих пользователям в рамках единого процесса получать широкий спектр продуктов и услуг. Сводный обзор определений бизнес- и цифровых экосистем приведен в табл. 3 [12 – 18].

Таким образом, в классическом понимании бизнес-экосистема представляет собой совокупность собственных или партнерских предложений [17], объединенных вокруг конкретной компании. Следовательно, банкцентричная экосистема характеризуется тем, что в центре такой



	Кластер	Вывод по кластеру
1	Инновационные экосистемы (innovation ecosystems), модели (models), бизнес-модели (business models)	Описывает объекты исследования
2	Большие данные (big data), регулирование конфиденциальности (privacy regulation), монетизация данных (data monetization), цифровые технологии (digital technology), СММ (social media), интернет вещей (internet of things), обмен данными (data sharing), теория структурирования (structuration theory)	Описывает различные методы и технологии
3	Продажи (sales), трудоустройство (employment), предпринимательство (entrepreneurship)	Описывает функции
4	Информационные технологии (informatics), капитальные вложения (capital financing), кооперативное поведение (cooperative behavior)	Неявный кластер

Рис. 2. Кластерный анализ отобранных статей The Lens по ключевым словам, составленный при помощи программы VosViewer
 Fig. 2. Cluster analysis of selected The Lens articles by keywords, compiled using the VosViewer program

Т а б л и ц а 3

Определения бизнес- и цифровых экосистем различных авторов
 Table 3. Definitions of business and digital ecosystems by various authors

Термин	Определение	Автор
Бизнес-экосистема	Совокупность экономических субъектов, которая служит основой для взаимодействия между различными участниками делового сообщества.	Джеймс Ф. Мур
Бизнес-экосистема	Согласованная структура многостороннего набора партнеров, которым необходимо взаимодействовать для того, чтобы материализовать ценностное предложение для клиента.	Рон Аднер
Бизнес-экосистема	Совокупность взаимодействующих организаций, созданных по модульному принципу, которых объединяет невозможность перераспределения коллективных инвестиций в другие места. В основе экосистем – инновации и цифровые технологии.	Майкл Дж. Якобидес
Цифровая экосистема	Комплексный проект, объединяющий большое число участников, информационных сервисов и бизнес-процессов, основанный на принципах взаимовыгодности отношений («win-win»).	ВШЭ
Цифровая экосистема	Цифровое пространство, в котором бесшовно функционирует множество сервисов одной компании или нескольких участников-партнеров.	ЕСМ-Journal
Цифровая экосистема	Построенная на основе данных о клиентах совокупность сервисов, позволяющих пользователям в рамках единого процесса получать широкий спектр продуктов и услуг.	Банк России
Цифровая экосистема	Клиентоцентричная модель, объединяющая две и более группы продуктов, услуг, информации (собственного производства и/или других игроков) для удовлетворения конечных потребностей клиентов (безопасность, жилье, развлечения и т.д.).	Минэкономразвития

Технологии, внедряемые в деятельность российских банков
 Table 4. Technologies implemented in the activities of Russian banks

Технология	Описание	Элементы	Роль технологии для РБЭ	Примеры использования
1	2	3	4	5
Технология распределенного реестра (Distributed Ledger Technology, DLT)	Инновационный подход к хранению и передаче данных, который использует распределенную базу данных, называемую реестром, и применяет криптографические методы для обеспечения безопасности и целостности информации.	• распределенный реестр; • база данных; • криптография; • алгоритмы консенсуса; • хэширование; • смарт-контракты.	• обеспечение безопасности; • хранение информации; • устранение посредников; • обеспечение прозрачности транзакций; • децентрализация данных.	• распределенный реестр может быть использован для хранения данных и управления учетными записями клиентов; • создание прозрачных систем аудита и управления рисками в банковской деятельности.
Большие данные (Big Data)	Подход и инфраструктура для сбора, обработки и анализа огромных объемов данных, которые не могут быть эффективно обработаны с использованием традиционных методов и инструментов.	• масштабируемое хранение данных; • языки программирования; • обработка данных; • платформа аналитики; • машинное обучение.	• сбор и обработка информации; • распределенный анализ неструктурированной информации; • анализ поведения клиентов; • оптимизация процессов; • улучшение прогнозных аналитических моделей.	• использование больших данных для создания маркетинговых кампаний и персонализированных предложений для клиентов на основе их предпочтений и покупательского поведения.
Открытый API (Application Programming Interface)	Подход, позволяющий организациям предоставлять стандартизированный и программно-ориентированный доступ к своим сервисам и данным через интерфейсы приложений. Российские банки также активно внедряют эту технологию в свою деятельность.	• интерфейсы приложений; • стандартизация протоколов и форматов данных; • единый идентификатор.	• расширение функциональности; • улучшение клиентского опыта; • развитие платформенности; • интеграция с партнерами; • развитие экосистемной инфраструктуры.	• предоставление платежных API для сторонних платежных систем или электронных кошельков; • использование API для автоматического импорта данных клиентов в системы банка или обратной интеграции с внешними системами для автоматизации процессов.
Облачные технологии (Cloud Technologies)	Подход к предоставлению компьютерных ресурсов, таких как вычислительная мощность, хранение данных и программное обеспечение, через интернет с использованием удаленных серверов.	• инфраструктура как сервис (Infrastructure as a Service, IaaS); • платформа как услуга (Platform as a Service, PaaS); • программное обеспечение (Software as a Service, SaaS).	• гибкость и масштабируемость; • оптимизация процессов; • улучшение доступности и надежности; • безопасность и конфиденциальность.	• использование облачных хранилищ для хранения и обработки данных клиентов; • резервное копирование данных и восстановление после сбоев с использованием облачных услуг для обеспечения непрерывности банковских операций.

1	2	3	4	5
Искусственный интеллект (Artificial Intelligence, AI)	Область компьютерных наук, которая изучает создание интеллектуальных систем и алгоритмов, способных выполнять задачи, которые обычно требуют человеческого интеллекта. Российские банки также внедряют технологии искусственного интеллекта в свою деятельность.	• машинное обучение; • глубокое обучение; • обработка естественного языка; • компьютерное зрение; • большие данные.	• автоматизация и оптимизация процессов; • принятие решений и анализ данных; • персонализация и улучшение клиентского опыта; • выявление мошеннической активности.	• разработка виртуальных ассистентов и чат-ботов для обработки клиентских запросов и предоставления персонализированной поддержки; • автоматизация процессов кредитного решения с использованием алгоритмов машинного обучения для анализа кредитных историй и оценки риска.
Биометрия (Biometric Technologies)	Технология основана на использовании уникальных физических, поведенческих или анатомических характеристик человека для идентификации и аутентификации личности.	• распознавание лица и отпечатков пальцев; • голосовое распознавание; • сканирование и анализ.	• усиление безопасности; • улучшение клиентского опыта; • автоматизация процессов идентификации и аутентификации.	• внедрение систем распознавания лица для идентификации клиентов при посещении филиалов банка или проведении онлайн-транзакций.
Интернет вещей (Internet of things, IoT)	Технология позволяет подключать различные устройства и объекты к Интернету, собирать данные и взаимодействовать с ними.	• устройства IoT; • сети связи; • облачные платформы; • искусственный интеллект.	• сбор и мониторинг данных; • улучшение клиентского опыта; • управление физическими активами.	• умные банкоматы и терминалы самообслуживания, которые предоставляют более релевантные и персонализированные услуги клиентам.
Цифровые платформы (Digital Platforms)	Совокупность инструментов, приложений и сервисов, предназначенных для создания, расширения цифровых экосистем и управления ими.	• API и сервисы; • функциональные модули; • языки программирования; • искусственный интеллект; • интерфейс.	• создание цифровых экосистем; • оптимизация процессов; • обеспечение цифровой трансформации; • основа программы лояльности.	• интеграция мобильных приложений банка с электронной коммерцией, позволяющая клиентам совершать покупки, оплачивать счета и получать финансовые рекомендации, связанные с их тратами.

экосистемы находится банк. При этом, если ключевые элементы экосистемы приобретают цифровой вид, а их взаимосвязь достигается использованием цифровых технологий, такая экосистема будет именоваться цифровой.

Наиболее точным определением (далее – банковской экосистемы) будет банкцентричная цифровая экосистема – это сеть сервисов и услуг на базе различных платформенных решений и цифровых технологий, в основе которой находится банк [10 – 12]. В табл. 4 представлены технологии, внедряемые в российских банках.

Заключение

В ходе исследования было выявлено, что аналогично другим видам экосистем, банковские экосистемы обладают специфическими характеристиками и признаками, позволяющими их распознать. Ключевые признаки, по которым можно идентифицировать банковскую экосистему:

– банк выступает центром экосистемы, то есть все собственные или партнерские сервисы экосистемы формируются вокруг его бренда и координируются им;

- использование продвинутых цифровых технологий, благодаря которым обеспечивается стабильная работа всех механизмов экосистемы;
- дистанционное банковское обслуживание (ДБО) является элементом экосистемы, открывающим клиентам доступ к интегрированным финансовым продуктам;
- прямое или косвенное отношение элементов экосистемы к единому бренду, способствующему формированию эффективной системы сквозной лояльности клиентов;
- интеграция цифровой банковской платформы в единую среду экосистемы;
- удовлетворение финансовых и нефинансовых потребностей клиентов.

Таким образом, исходя из проведенного анализа, можно предложить следующее обобщающее определение: банковская экосистема представляет собой сеть сервисов и услуг на базе различных платформенных решений и цифровых технологий, в основе которой находится банк. Сформулировать определение банковской экосистемы необходимо не только с теоретической точки зрения, что тоже важно, но и в целях регулирования деятельности таких экосистем, что стало особенно актуальным в последние годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобошко Д.Ю. Цифровые экосистемы и их роль в развитии малого и среднего предпринимательства в РФ // Экономика и управление инновациями. 2023. № 2(25). С. 22–30. <https://dx.doi.org/10.26730/2587-5574-2023-2-22-30>
2. Tolstykh T.O., Shmeleva N.V., Alpeeva E.A., Boboshko D.Yu., Malkova T.B. Ecosystem Approach for Assessing the Socio-economic Development of Industrial and Regional Systems in the Context of Digitalization. In: Cooperation and Sustainable Development: Conference proceedings, Moscow, December 15–16, 2020. Vol. 245. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022. P. 1609–1618. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77000-6>
3. Алексеева Ю.Б., Бабина Е.Н., Бабина Н.В. и др. Формирование цифровой экономики и развитие сквозных цифровых технологий в России как императив новой парадигмы экономического роста. Самара: ООО НИЦ "ПНК", 2023. 300 с.
4. Gamidullaeva L., Shmeleva N., Tolstykh T., Shmatko A. An Assessment Approach to Circular Business Models within an Industrial Ecosystem for Sustainable Territorial Development // Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 2. P. 704. <https://doi.org/10.3390/su14020704>
5. *The Lens - Free & Open Patent and Scholarly Search*. Available at URL: <https://link.lens.org/rA8MDfNyRZ/> (Accessed 07.04.2023).
6. eLIBRARY. URL [Электронный ресурс] // https://www.elibrary.ru/query_results.asp (дата обращения: 08.04.2023).
7. Yu G., Li W., Shao M., Zhang Y., Wang S., Niu S., He H., Dai E., Li F., Ma Z. Ecosystem science research and ecosystem management // Acta Geographica Sinica. 2020. Vol. 75. No. 12. P. 2620–2635. <http://dx.doi.org/10.11821/dlxb202012006>
8. Burda Ye.D., Volkova I.O., Gavrikova E.V. Meaningful analysis of innovation, business and entrepreneurial ecosystem concepts // Russian Management Journal. 2020. Vol. 18. No. 1. P. 73–102. <https://doi.org/10.21638/spbu18.2020.104>
9. Трушина К.В., Смагин А.В. Тренд на развитие крупнейших банков в парадигме экосистемы (к вопросу о понятии "экосистема") // Банковские услуги. 2019. № 12. С. 7–11. https://doi.org/10.36992/2075-1915_2019_12_7
10. Иванович М.Н. Экосистема ПАО Сбербанк. Продукты экосистемы для юридических лиц // Достижения науки и образования. 2020. № 14(68). С. 49–51.
11. Ермолаев К.Н., Артемова А.А., Романов М.А. Формирование и развитие экосистем российских банков в условиях цифровизации на примере экосистем Сбера и Тинькофф банка // Экономика и предпринимательство. 2023. № 4(153). С. 1132–1136. <https://doi.org/10.34925/EIP.2023.153.4.220>
12. Moore J.F. The death of competition: leadership & strategy in the age of business ecosystems. New York: Harper Business, 1996. 297 p.
13. Adner R. Match your innovation strategy to your innovation ecosystem. In: Harvard Business Review, 2006. 98 p.
14. Jacobides M.G., Cennamo C., Gawer A. Towards a theory of ecosystems // Strategic Management Journal, 2018. 39 p. <http://dx.doi.org/10.1002/smj.2904>
15. *Цифровые экосистемы* [Электронный ресурс] // ВШЭ. URL: <https://hsbi.hse.ru/articles/tsifrovye-ekosistemy/> (дата обращения: 13.04.2023).
16. *Регулирование рисков участия банков в экосистемах и вложений в иммобилизованные активы* [Электронный ресурс] // Банк России. URL: http://www.cbr.ru/Content/Document/File/123688/Consultation_Paper_23062021.pdf (дата обращения: 14.04.2022).
17. *Цифровая экосистема: модный термин или новая реальность?* [Электронный ресурс] //

- ECM JOURNAL. URL: https://ecm-journal.ru/material/cifrovaja_ekosistema_modnyjj_termin_ili_novaja_realnost (дата обращения: 14.04.2023).
18. Концепция общего регулирования деятельности групп компаний, развивающих различные цифровые сервисы на базе единой «экосистемы» [Электронный ресурс] // Министерство экономического развития Российской Федерации. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/cb29a7d08290120645a871be41599850/konceptsiya-21052021.pdf> (дата обращения: 14.04.2022).
 19. Развитие финансовых технологий [Электронный ресурс] // Банк России. URL: <https://www.cbr.ru/fintech> (дата обращения: 14.04.2023).
 20. *Fintech and its impact on the banking and financial industry* // DIGIPAY. Available at URL: <https://www.digipay.guru/blog/the-impact-of-fintech-on-banks-and-financial-services/> (Accessed 14.04.2023).
 21. Is fintech disrupting the banking sector? // Economics Observatory. Available at URL: <https://www.economicsobservatory.com/is-fintech-disrupting-the-banking-sector> (Accessed: 14.04.2023).
- ### REFERENCES
1. Boboshko D.Yu. Digital ecosystems and their role in the development of small and medium-sized businesses in the Russian Federation. *Ekonomika i upravlenie innovatsiyami*. 2023, no. 2(25), pp. 22–30. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.26730/2587-5574-2023-2-22-30>
 2. Tolstykh T.O., Shmeleva N.V., Alpeeva E.A., Boboshko D.Yu., Malkova T.B. Ecosystem Approach for Assessing the Socio-economic Development of Industrial and Regional Systems in the Context of Digitalization. In: *Cooperation and Sustainable Development: Conference proceedings, Moscow, December 15-16, 2020*. Vol. 245. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022, pp. 1609–1618. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77000-6>
 3. Alekseeva Yu.B., Babina E.N., Babina N.V. et al. The formation of the digital economy and the development of end-to-end digital technologies in Russia as an imperative of a new paradigm of economic growth. Samara : LLC SIC "PNK", 2023, 300 p. . (In Russ.).
 4. Gamidullaeva L., Shmeleva N., Tolstykh T., Shmatko A. An Assessment Approach to Circular Business Models within an Industrial Ecosystem for Sustainable Territorial Development. *Sustainability*. 2022, vol. 14, no 2, pp. 704. <https://doi.org/10.3390/su14020704>
 5. *The Lens - Free & Open Patent and Scholarly Search*. Available at URL: <https://link.lens.org/rA8MDfNyRZ/> (Accessed 07.04.2023).
 6. eLIBRARY. URL [Электронный ресурс] //: https://www.elibrary.ru/query_results.asp (дата обращения: 08.04.2023).
 7. Yu G., Li W., Shao M., Zhang Y., Wang S., Niu S., He H., Dai E., Li F., Ma Z. Ecosystem science research and ecosystem management. *Acta Geographica Sinica*. 2020, vol. 75, no. 12, pp. 2620–2635. <http://dx.doi.org/10.11821/dlxb202012006>
 8. Burda Ye.D., Volkova I.O., Gavrikova E.V. Meaningful analysis of innovation, business and entrepreneurial ecosystem concepts. *Russian Management Journal*. 2020, vol. 18, no 1, pp. 73–102. <https://doi.org/10.21638/spbu18.2020.104>
 9. Trushina K.V., Smagin A.V. The trend for the development of the largest banks in the ecosystem paradigm (on the question of the concept of "ecosystem"). *Bankovskie uslugi*. 2019, no. 12, pp. 7–11. (In Russ.). https://doi.org/10.36992/2075-1915_2019_12_7
 10. Ivanovich M.N. The ecosystem of Sberbank PJSC. Ecosystem products for legal entities. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya*. 2020, no. 14(68), pp. 49–51.
 11. Ermolaev K.N., Artemova A.A., Romanov M.A. Formation and development of ecosystems of Russian banks in the conditions of digitalization on the example of ecosystems of Beber and Tinkoff Bank. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. 2023, no. 4(153), pp. 1132–1136. (In Russ.). <https://doi.org/10.34925/EIP.2023.153.4.220>
 12. Moore J.F. *The death of competition: leadership & strategy in the age of business ecosystems*. New York: Harper Business, 1996, 297 p.
 13. Adner R. Match your innovation strategy to your innovation ecosystem. In: *Harvard Business Review*, 2006, 98 p.
 14. Jacobides M.G., Cennamo C., Gawer A. Towards a theory of ecosystems. *Strategic Management Journal*, 2018, 39 p. <http://dx.doi.org/10.1002/smj.2904>
 15. *Digital ecosystems* Available at URL: <https://hsbi.hse.ru/articles/tsifrovye-ekosistemy/> (дата обращения: 13.04.2023).
 16. *Regulation of risks of banks' participation in ecosystems and investments in immobilized assets*. Available at URL: <https://www.cbr.ru/Content/Document/File/123>

688/Consultation_Paper_23062021.pdf (Accessed: 14.04.2022).

17. *Digital ecosystem: a fashionable term or a new reality?* Available at URL: https://ecm-journal.ru/material/cifrovaja_ehkosistema_modnyjj_termin_ili_novaja_realnost (Accessed: 14.04.2023).
18. *The concept of general regulation of the activities of groups of companies developing various digital services based on a single "ecosystem".* Available at URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/cb29a7d08290120645a871be41599850/koncepciya-21052021.pdf> (Accessed: 14.04.2022).
19. *Development of financial technologies.* Available at URL: <https://www.cbr.ru/fintech> (Accessed: 14.04.2023).
20. *Fintech and its impact on the banking and financial industry // DIGIPAY.* Available at URL: <https://www.digipay.guru/blog/the-impact-of-fintech-on-banks-and-financial-services/> (Accessed 14.04.2023).
21. *Is fintech disrupting the banking sector? // Economics Observatory.* Available at URL: <https://www.economicsobservatory.com/is-fintech-disrupting-the-banking-sector> (Accessed: 14.04.2023).

Сведения об авторах

Диана Юрьевна Бобошко, к.э.н., доцент, доцент кафедры экономики, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

E-mail: boboshko.dy@misis.ru
ORCID: 0000-0003-3418-2976

Дмитрий Михайлович Трейстарь, студент кафедры экономики, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

E-mail: dmitry@treistar.ru
ORCID: 0009-0006-2459-7405

Information about the authors

Diana Yu. Boboshko, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Department of Economics, National Research Technological University «MISIS»

E-mail: boboshko.dy@misis.ru
ORCID: 0000-0003-3418-2976

Dmitrii M. Treistar', student of the Department of Economics, National Research Technological University «MISIS»

E-mail: dmitry@treistar.ru
ORCID: 0009-0006-2459-7405

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 30.08.2023

После доработки 13.09.2023

Принята к публикации 16.09.2023

Received 30.08.2023

Revised 13.09.2023

Accepted 16.09.2023

Оригинальная статья

УДК 316.43

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-104-110

ФОРМИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КАК СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА НАЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

© 2023 г. М. А. Мирюкова, В. Ф. Соколова

Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (Западный филиал) (Россия, 236016, Калининград, ул. Артиллерийская, 62)

Аннотация. Определены условия обеспечения социально-экономической безопасности как личности в частности, так и государства в целом. Показано, что социальная безопасность является условием достижения экономической безопасности. Выделены факторы социальной безопасности, характеризующие экономическую безопасность (уровень социально-демографического развития государства, социальная стабильность и устойчивость социально-экономического развития). Отражены показатели, способствующие оценке социально-экономической безопасности государства, представленные в российских и зарубежных научных изданиях, позволяющие на постоянной основе осуществлять мониторинг социально-экономической безопасности государства. Отмечена важность грамотного установления пороговых значений показателей, адекватных социально-экономической ситуации конкретного государства. Социально-экономическая безопасность определена как интегральная категория, отражающая комплекс социально-экономических отношений, формирующихся между отдельными субъектами, обществом в целом и государством. Описан механизм формирования социально-экономической безопасности, включающий нормативно-правовые основы обеспечения социально-экономической безопасности и совокупность экономических, политических и социальных мер, определяющих основные направления деятельности и способы воздействия субъектов управления социально-экономической безопасностью на ее угрозы с целью их предотвращения. Обозначены структурные элементы механизма формирования социально-экономической безопасности, позволяющие обеспечить эффективное функционирование системы обеспечения социально-экономической безопасности государства. Отмечено, что элементы такой системы взаимосвязаны, взаимозависимы, взаимодействуют друг с другом в определенной иерархической подчиненности, при этом функционально уникальны. Определены ключевые нормативно-правовые документы, формирующие информационную подсистему системы обеспечения социально-экономической безопасности. Проанализированы имеющие место в Российской Федерации меры социально-экономической поддержки граждан в период пандемии, а также меры, введенные с 1 января 2023 г.

Ключевые слова: безопасность, государство, политика, социальная безопасность, социально-экономический потенциал, мониторинг, стратегическое планирование

Для цитирования: Мирюкова М.А., Соколова В.Ф. Формирование социально-экономической безопасности как системообразующего элемента национальной безопасности // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 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)

Original article

FORMATION OF SOCIO-ECONOMIC SECURITY AS A SYSTEM-FORMING ELEMENT OF NATIONAL SECURITY

M. A. Miryukova, V. F. Sokolova

Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation (Western Branch) (62 Artillery Street, Kaliningrad, 236016, Russian Federation)

Abstract. The article defines the conditions for ensuring socio-economic security of both the individual in particular and the state as a whole. It is shown that social security is a condition for achieving economic security. The factors of social security characterizing economic security are highlighted, including the level of socio-demographic development of the state, social stability and sustainability of socio-economic development. The indicators for assessment of the socio-economic security of the state, presented in Russian and foreign scientific publications, allowing monitoring of the socio-economic security of the state on an ongoing basis, are reflected. The importance of competent establishment of threshold values of these indicators, adequate to the socio-economic situation of a particular state, is noted. Socio-economic security is defined as an integral category reflecting the complex of socio-economic relations formed between individual subjects, society as a whole and the state. The mechanism of formation of socio-economic security is described, including the regulatory framework for ensuring socio-economic security and a set of economic, political and social measures that determine the main activities and ways of influencing the subjects of socio-economic security management on threats to socio-economic security in order to prevent them. The structural elements of the mechanism for the formation of socio-economic security are identified, which make it possible to ensure the effective functioning of the system for ensuring the socio-economic security of the state. It is noted that the elements of the socio-economic security system are interconnected, interdependent, interact with each other in a certain hierarchical subordination, while functionally unique. The key regulatory and legal documents forming the information subsystem of the socio-economic security system are identified. The measures of socio-economic support of citizens in the Russian Federation during the pandemic, as well as measures introduced since January 01, 2023, have been analyzed.

Keywords: security, state, policy, social security, socio-economic potential, monitoring, strategic planning

For citation: 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, no. 3 (45), pp. 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)

Введение

Социально-экономическая безопасность – комплексное понятие, объединяющее в себе две крупные сферы публично-правового регулирования общественных отношений. С одной стороны, социальная безопасность, включает в себя качество и уровень жизни, морально-этические и культурные ценности. С другой стороны, экономическая безопасность отвечает за защиту национальной экономики страны, единство ее экономического пространства, независимость. С точки зрения конкретного индивида, экономическая безопасность отвечает за удовлетворение экономических потребностей, она играет ключевую роль в поддержании социально-приемлемых условий жизнедеятельности, развития человеческого потенциала. Эти два понятия являются взаимодополняемыми, базовыми для выработки более эффективных подходов к решению социально-экономических проблем. Социально-экономическая безопасность государства отражает взаимообусловленность, взаимозависимость, взаимодополняемость отношений, которые складываются в процессе обеспечения безопасности. Исходя из этого, социально-экономическая безопасность отвечает за все отношения социально-экономического характера, которые складываются между государством и обществом в целом, а также государством и личностью, в частности, в процессе обеспечения национальной безопасности.

Материалы и методы исследования

Фундаментальным условием обеспечения социально-экономической безопасности государства является опора на внутренний потенциал социально-экономической системы страны. Вопросам обеспечения социально-экономической безопасности в последнее время уделяется внимание как в разрезе отдельных регионов [1 – 5], так и в разрезе отдельных отраслей экономики [6, 7]. Для самостоятельного решения стоящих перед государством задач необходимо укрепление экономического суверенитета и диверсификация связей с мировыми центрами развития, с одной стороны, с другой – повышение конкурентоспособности отечественной экономики и ее устойчивости к воздействию внешних и внутренних угроз. Усиление роли государства как гаранта безопасности актуализирует значение государственного сектора экономики в контексте обеспечения социально-экономической безопасности государства [8].

Для решения любой стратегической проблемы, а проблема обеспечения национальной экономической безопасности является таковой, необходимо увязать ее со стратегией решения проблемы более высокого порядка (со стратегией социально-экономического развития страны), учитывая системный характер рассматриваемых объектов.

Социальная безопасность, как социальный институт, напрямую влияет на состояние экономической безопасности и прямо пропорционально завит от нее. Можно выделить основные факторы социальной безопасности, характеризующие экономическую безопасность. Во-первых, уровень социально-демографического развития государства (рождаемость, миграцию, трудоспособность населения, уровень развития и качество жизнедеятельности). Во-вторых, социальная стабильность, проявляющая себя на трех уровнях общественного порядка (внутри социальных подсистем, в связях и отношениях между подсистемами, в обществе в целом как суперсистеме, включающей в себя разнообразные структуры, связи и отношения). К основным показателям социальной стабильности относятся материальное благополучие граждан, достойный уровень жизни, возможности для реализации гражданами своего трудового и интеллектуального потенциала, социальная и правовая защищенность, соблюдение прав личности, развитая социальная культура, подразумевающая наличие единых нравственных ценностей и норм, социальных идеалов, государственной идеологии, и, наконец, удовлетворенность индивида социальным окружением. Третья составляющая – это стабильность, устойчивость социально-экономического развития. Основными показателями выступают дифференциация материального благосостояния различных социальных слоев, регионов страны, занятость и безработица, инфляционные процессы, устойчивость экономики в целом, ее способность приспосабливаться к новым условиям, преодолевая циклические кризисы.

В зарубежных источниках выделяются также такие показатели, как доля населения с уровнем образования МСКО 4 и выше [9], «балдж молодежи» (от англ. bulge – выпуклость, вздутие; показатель, характеризующий превалирование молодежи в структуре населения) [10], показатель «NEET» (Neither in Employment nor in Education and Training – доля лиц в возрасте 15 – 24 лет, не работающих, не учащихся, не проходящих профессиональную подготовку, в общей численности молодежи рассматриваемой возрастной группы) [11], коэффициент Джини, характеризующий степень равномерности распределения доходов населения в государстве [12 – 15], индекс качества элит, определяющий влияние элиты на человеческое и экономическое развитие [16].

Таким образом, для формирования социально-экономической безопасности необходим социально-устойчивый механизм ее обеспечения.

Основные результаты

В работах [17 – 19] механизм социально-экономической безопасности представляют как общность различных организационных, экономических и правовых мер, направленных на предотвращение угроз социально-экономической безопасности. Суть рассматриваемого механизма видят в формировании комплекса наиболее оптимальных условий жизнедеятельности, а также личностного развития, общественной стабильности, целостности и государственности государства, включающих в себя противостояние внешним и внутренним угрозам в области социально-экономической безопасности, что, несомненно, является важным элементом национальной безопасности [20].

Опираясь на работу [21], выделим основные структурные элементы механизма формирования социально-экономической безопасности государства: постоянный общественный мониторинг; выработка показателей (пороговых значений), качественно и количественно оценивающих индивидуальную и общественную социальные стабильности; системно-факторное прогнозирование угроз общественной социальной стабильности; моделирование социально важных проектов; проектирование комплекса мер по стабилизации ситуации в случае возникновения угроз социально-экономической безопасности.

Использование указанных выше показателей оценки социально-экономической безопасности и определение пороговых значений рассматриваемых показателей, применимых в Российской Федерации, позволит на постоянной основе осуществлять мониторинг социально-экономической безопасности государства.

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 принадлежат право, а значит и обязанность создавать соответствующие органы и структуры.

Безусловно правовой основой формирования социально-экономической безопасности является Конституция РФ, провозглашающая человека, его права и свободы высшей ценностью государства. Федеральный закон от 28.12.2010 г. № 390-ФЗ «О безопасности» регулирует деятельность по обеспечению безопасности, включающую в себя прогнозирование, мониторинг, анализ и оценку угроз безопасности, определение основных направлений государственной по-

литики и стратегическое планирование в области обеспечения безопасности, правовое регулирование, разработку и применение комплекса оперативных и долговременных мер по выявлению, предупреждению и устранению угроз безопасности, локализации и нейтрализации последствий их проявления.

Федеральный закон от 28.06.2014 г. № 172-ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» определяет понятие стратегического планирования, государственного и муниципального управления, а также целеполагание, прогнозирование, планирование, программирование (разработка комплекса документов). Основные показатели экономической безопасности определены в Указе Президента РФ от 13.05.2017 г. № 208 «О стратегии экономической безопасности в Российской Федерации на период до 2030 г.». Важную роль в обеспечении экономической безопасности играют такие нормативно-правовые акты, как федеральные законы от 25 декабря 2008 г. № 273-ФЗ «О противодействии коррупции», от 29 июля 2004 г. № 98-ФЗ «О коммерческой тайне», от 27 июля 2006 г. № 152-ФЗ (ред. от 31 декабря 2017 г.) «О персональных данных», от 6 марта 2006 г. № 35-ФЗ «О противодействии терроризму», а также документы стратегического планирования (Послание Президента Российской Федерации Федеральному собранию, Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации, Стратегия национальной безопасности Российской Федерации, Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации).

Такой непрерывный и очень сложный процесс, как обеспечение экономической безопасности государства требует постоянной финансовой поддержки, привлечение человеческого капитала, а также систематизации, что и ведет к формированию системы обеспечения экономической безопасности (СОЭБ). Структурные элементы СОЭБ должны рассматриваться как взаимосвязанные, взаимозависимые, взаимовлияющие, взаимодействующие и иерархичные, но, несмотря на это, каждый элемент является эксклюзивно функциональным, за счет чего и происходит надежное обеспечение экономической безопасности.

Формирование и проведение единой политики обеспечения экономической безопасности является основной базовой задачей СОЭБ, включающей в себя разработку системы мер политического, экономического и социального характера, которые должны адекватно соответствовать возникающим угрозам безопасности как личности, так и государству, что означает определение основных направлений деятельно-

сти и способов управления различными органами государственной власти (структурных элементов СОЭБ).

Все вышесказанное определяет СОЭБ как систему смешанного типа, включающую в себя органы государственной власти и представителей негосударственных структур, являющихся носителями определенных полномочий. Система обеспечения экономической безопасности создается и функционирует с целью формирования эффективной защиты интересов Российской Федерации в области национальных и экономических интересов как от внешних, так и от внутренних угроз. Во главе СОЭБ стоит Президент Российской Федерации, отвечающий за руководство действиями всех ветвей федеральной и региональной государственной власти.

Рассматривая СОЭБ России прицельно, необходимо отметить такие структурные элементы как Совет безопасности Российской Федерации (СБ РФ) и Государственный совет РФ, функционирующие также под руководством Президента РФ. Совет безопасности РФ является органом, обладающим определенной распорядительной и консультативной функциями по вопросам безопасности при Президенте РФ. В свою очередь, Государственный совет РФ носит совещательный характер, в его задачи входит содействие реализации полномочий Президента по вопросам обеспечения согласованного функционирования и взаимодействия различных органов государственной власти.

Говоря о социальной составляющей социально-экономической безопасности, необходимо обратить внимание на принятые социально-экономические меры в период пандемии, направленные на поддержание достойного уровня жизни граждан. С 2020 г. был принят ряд мер, направленный на социально-экономическую поддержку и обеспечение безопасности граждан в виде единовременных и ежемесячных выплат, установление кредитных и ипотечных каникул, мораторий на начисление неустойки за коммунальные долги. Все принятые меры носят своевременный характер и определяют современную стратегию обеспечения социально-экономической безопасности.

Введение единого социального пособия с 1 января 2023 г. позволяет учитывать потребности каждой семьи индивидуально. Наличие государственных ипотечных программ ведет не только к улучшению уровня жизни граждан, но и к развитию отдаленных регионов страны и к перспективе развития отдельных профессий. Создание Фонда пенсионного и социального страхования 1 января 2023 г. значительно упро-

щает получение гражданами социального обеспечения.

С целью стабилизации социально-экономической ситуации в условиях роста инфляции предприняты соответствующие меры, в частности, путем повышения МРОТ и индексации материнского капитала.

В связи с обращением Президента к Федеральному собранию в 2023 г., ожидается еще ряд мер социально-экономического характера, способствующих не только поддержанию социально-приемлемого уровня жизни, но и его улучшению.

Выводы

В России существует и успешно функционирует система правовых и экономических институтов, противодействующих угрозам социально-экономической безопасности страны. Она включает в себя соответствующие структуры, функции и процедуры принятия и реализации решений по вопросам безопасности. Базовыми элементами этой системы являются соответствующие органы законодательной, исполнительной и судебной власти, общественные и государственные организации, граждане, участвующие в обеспечении безопасности, а также нормативно-правовые акты, регламентирующие содержание безопасных социально-экономических отношений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shumilin P., Kazyayeva V. Uneven social and economic development of the regions of the Russian federation as a threat to economic security and methods of its solution. In: Modern problems of an economic safety, accounting and the right in the Russian Federation. 2019. Vol. 1. P. 6. https://doi.org/10.26526/conferencearticle_5c5060106753d9.96954670
2. Руденко М.Н. Диагностика социально-экономической безопасности региона // Экономическая безопасность. 2020. Т. 3. № 3. С. 323–334. <https://doi.org/10.18334/ecsec.3.3.110744>
3. Драгой М.С. Определение экономической безопасности региона по социально-экономическим показателям // Экономика и бизнес: теория и практика. 2023. № 6-1 (100). С. 112–115. <http://doi.org/10.24412/2411-0450-2023-6-1-112-115>
4. Попова О.С. Стратегические направления обеспечения социально-экономической безопасности региона (на примере Ленинградской области) // Вестник научных конференций. 2020. № 9-2 (61). С. 91–96.
5. Еремеев Л. М. Проблемы управления социально-экономической безопасностью региона // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2012. Т. 7. № 4 (26). С. 29–32.
6. Швайба Д.Н. Формирование системы обеспечения социально-экономической безопасности горно-химического комплекса. В кн.: Актуальные проблемы социально-гуманитарных наук и межкультурной коммуникации: язык, культура, образование и экономика. Материалы Первой международной научно-практической конференции. Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации. 2020. № 2 (26). С. 325–333.
7. Швайба Д.Н. Система обеспечения социально-экономической безопасности промышленного сектора // Наука и техника. 2019. Т. 18. № 1. С. 70–74. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-70-74>
8. Пенькова И.В. Обеспечение социально-экономической безопасности государства. В кн.: Сборник научных работ серии «Государственное управление». 2022. № 26. С. 49–56. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6901023>
9. Зинченко О.И., Химченко А.Н. Социальная безопасность в системе социально-экономической безопасности государства // Новое в экономической кибернетике. 2021. № 3. С. 177–189.
10. Cincotta R., Engelman R., Anastasion D. The security demographic: population and civil conflict after the Cold War. Washington: Population 4. Action International, 2003. 100 p.
11. Зинченко О.И. Экономическая активность молодежи как фактор социально-экономической безопасности государства (на примере стран ЕС) // Вестник ПВГУС. Экономика. 2017. № 1 (47). С. 19–26.
12. Inequalities and the Post-2015 Development Agenda A Concept Note. United Nations Research Institute for Social Development. URL: chrome-extension://efaidnbmnnn1bpcaj-pcgclclefind-mkaj/https://www.files.ethz.ch/isn/159691/02%20-%20Inequalities.pdf (дата обращения 04.08.2023).
13. Bowles S., Carlin W. Inequality as experienced difference: A reformulation of the Gini coefficient. Economics Letters. Vol. 186, January 2020, 108789. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165176519303969> (дата обращения 04.08.2023).

14. 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. P. 19. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.3979>
15. Неравенство – сокращение разрыва. Организация Объединенных Наций. URL: <https://www.un.org/ru/un75/inequality-bridging-divide> (дата обращения 04.08.2023).
16. Casas T., Cozzi G. Elite Quality Report 2021: Country Scores and Global Rankings. 2021. P. 324.
17. Шевкуненко М.Ю., Стадник М.С., Григорян М.А., Курдакова Е.Г. Основные направления улучшения качества и безопасности жизни населения РФ как фактор обеспечения социально-экономической безопасности // Вестник Академии знаний. 2023. № 2 (55). С. 273–279.
18. Назаренко А.С., Скоморощенко А.А. Сущность социально-экономической безопасности регионов и ее связь с национальной безопасностью страны. В кн.: Молодежь и наука – 2019. Материалы I Всероссийской научно-практической конференции, проводимой в рамках Всероссийского конкурса для молодых исследователей «Лучшая молодежная научная статья 2019 года». 2019. С. 189–193.
19. Пенькова И.В. Разрешение внутрисистемных противоречий развития государственного сектора экономики как фактор обеспечения социально-экономической безопасности государства // Вестник Донецкого национального университета. Серия В. Экономика и право. 2022. № 2. С. 193–202.
20. Шаталова Т.Н., Косолапова О.С. Механизмы обеспечения экономической безопасности. В кн.: Современная парадигма и механизмы экономического роста российской экономики и ее регионов. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Самара, 2 декабря 2019 года. Ч. 1. Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. С. 242–246.
21. Галиуллин Д.Л. Социальная составляющая экономической безопасности // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2008. № 3 (10). С. 115–126.
- vol. 1, pp. 6. https://doi.org/10.26526/conferencearticle_5c5060106753d9.96954670
2. Rudenko M.N. Diagnostics of socio-economic security of the region. *Ekonomicheskaya bezopasnost'*. 2020, vol. 3, no. 3, pp. 323–334. (In Russ.). <https://doi.org/10.18334/ecsec.3.3.110744>
3. Dragoi M.S. Determination of the economic security of the region by socio-economic indicators. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika*. 2023, no. 6-1 (100), pp. 112–115. (In Russ.). <http://doi.org/10.24412/2411-0450-2023-6-1-112-115>
4. Popova O.S. Strategic directions of ensuring socio-economic security of the region (on the example of the Leningrad region). *Vestnik nauchnykh konferentsii*. 2020, no. 9-2 (61), pp. 91–96. (In Russ.).
5. Ereemeev L. M. Problems of managing the socio-economic security of the region. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012, vol. 7, no. 4 (26), pp. 29–32. (In Russ.).
6. Shvaiba D.N. Formation of a system for ensuring socio-economic security of the mining and chemical complex. In: *Actual problems of social and humanitarian sciences and intercultural communication: language, culture, education and economics. Materials of the First International Scientific and Practical Conference. St. Petersburg State University of Civil Aviation*. 2020, no. 2 (26), pp. 325–333. (In Russ.).
7. Shvaiba D.N. The system of ensuring the socio-economic security of the industrial sector. *Nauka i tekhnika*. 2019, vol. 18, no. 1, pp. 70–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-70-74>
8. Pen'kova I.V. Ensuring the socio-economic security of the state. In: *Collection of scientific papers of the series "Public Administration"*. 2022, no. 26, pp. 49–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.6901023>
9. Zinchenko O.I., Khimchenko A.N. Social security in the system of socio-economic security of the state. *Novoe v ekonomicheskoi kiber-netike*. 2021, no. 3, pp. 177–189. (In Russ.).
10. Cincotta R., Engelman R., Anastasion D. *The security demographic: population and civil conflict after the Cold War*. Washington: Population 4. Action International, 2003, 100 p.
11. Zinchenko O.I. Economic activity of youth as a factor of socio-economic security of the state (on the example of EU countries). *Vestnik PVGUS. Ekonomika*. 2017, no. 1 (47), pp. 19–26. (In Russ.).

REFERENCES

1. Shumilin P., Kazyaeva V. Uneven social and economic development of the regions of the russian federation as a threat to economic security and methods of its solution. In: *Modern problems of an economic safety, accounting and the right in the Russian Federation*. 2019,

12. Inequalities and the Post-2015 Development Agenda A Concept Note. United Nations Research Institute for Social Development. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfendmkaj/https://www.files.ethz.ch/isn/159691/02%20-%20Inequalities.pdf (дата обращения 04.08.2023).
 13. Bowles S., Carlin W. Inequality as experienced difference: A reformulation of the Gini coefficient. *Economics Letters*. Vol. 186, January 2020, 108789. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165176519303969 (дата обращения 04.08.2023).
 14. Yong Tao, Xiangjun Wu, Changshuai Li. Rawls' Fairness, Income Distribution and Alarming Level of Gini Coefficient. United Nations Research Institute for Social Development. 2017, no. 2017-67, pp. 19. https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.3979
 15. *Inequality – closing the gap. The United Nations*. URL: https://www.un.org/ru/un75/inequality-bridging-divide/ (Accessed 04.08.2023).
 16. Casas T., Cozzi G. Elite Quality Report 2021: Country Scores and Global Rankings. 2021, pp. 324.
 17. Shevkunenko M.Yu., Stadnik M.S., Grigoryan M.A., Kurdakova E.G. The main directions of improving the quality and safety of life of the population of the Russian Federation as a factor of ensuring socio-economic security. *Vestnik Akademii znanii*. 2023, no. 2 (55), pp. 273–279. (In Russ.).
 18. Nazarenko A.S., Skomoroshchenko A.A. The essence of the socio-economic security of the regions and its connection with the national security of the country. In: *Youth and Science – 2019: Materials of the I All-Russian Scientific and practical conference held within the framework of the All-Russian competition for young researchers "The best youth scientific article of 2019"*. 2019, pp. 189–193. (In Russ.).
 19. Pen'kova I.V. Resolution of intra-system contradictions in the development of the public sector of the economy as a factor in ensuring the socio-economic security of the state. *Vestnik Donetskogo natsional'nogo universiteta. Seriya V. Ekonomika i pravo*. 2022, no. 2, pp. 193–202. (In Russ.).
 20. Shatalova T.N., Kosolapova O.S. Mechanisms for ensuring economic security. In: *Modern paradigm and mechanisms of economic growth of the Russian economy and its regions. Collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Samara, December 02, 2019. Volume Part 1. Samara: ANO "SNC Publishing House", 2019, pp. 242–246. (In Russ.).*
 21. Galiullin D.L. The social component of economic security. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2008, no. 3(10), pp. 115–126. (In Russ.).
- 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
- Вера Федоровна Соколова**, к.ф.н., доцент, заведующий кафедрой гуманитарных и естественнонаучных дисциплин, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (Западный филиал)
E-mail: sokolova-vf@ranepa.ru
- Information about the authors**
Maria A. Miryukova, Candidate of Sociological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Jurisprudence, Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation (Western Branch)
E-mail: miryukova-ma@ranepa.ru
- Vera F. Sokolova**, Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Humanities and Natural Sciences, Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation (Western Branch)
E-mail: sokolova-vf@ranepa.ru
- Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*
The authors declare that there is no conflict of interest.
- Поступила в редакцию 13.09.2023
 После доработки 15.09.2023
 Принята к публикации 18.09.2023
- Received 13.09.2023
 Revised 15.09.2023
 Accepted 18.09.2023

Оригинальная статья

УДК 332.021.8

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-111-123

**ОЦЕНКА ИСТОЧНИКОВ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ
НА УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

© 2023 г. И. А. Нагайцев

Аналитический центр ТЭК (Россия, 121099, Москва, Новинский бульвар, 13, стр. 4)

Аннотация. Приведен один из механизмов государственного экономического регулирования работы организаций-природопользователей. Для предприятий, осуществляющих хозяйственную деятельность, предусмотрена плата за негативное воздействие на выбросы в окружающую среду. Деятельность угледобывающих предприятий характеризуется значительными выбросами метана (газа), являющегося загрязняющим веществом, за которое предусмотрена плата. Произведен расчет платы за выбросы метана, проведен анализ полученных значений. Сделаны выводы, что предприятия, использующие технологии по снижению выбросов метана, сокращают операционные затраты и впоследствии способны управлять рисками, связанными с увеличением платы за негативное воздействие на окружающую среду. Отмечено, что помимо экономической нагрузки на предприятия, выбросы метана оказывают негативное воздействие (парниковый эффект), приводящее к изменениям климата. Приведены мировые и российские научные исследования по направлению актуализации учета и снижения выбросов парниковых газов в горнодобывающей отрасли. Актуальность направления углеродного регулирования и снижения парниковых выбросов подтверждается развитием законодательной базы в Российской Федерации, обязательной отчетностью о выбросах парниковых газов для предприятий и реализующимся пилотным проектом системы торговли квотами на выбросы парниковых газов на Сахалине. Показаны основные источники выбросов парниковых газов на угольных шахтах: горные выработки и трубопроводы, предназначенные для отвода метана из шахты; факельные установки для сжигания метана; выбросы от сжигания топлива на котельных для обогрева горных выработок и административно-бытовых помещений; выбросы от сжигания топлива транспортными средствами на предприятии. Сделаны выводы, что выбросы метана составляют наибольшую часть выбросов парниковых газов на угольных шахтах. Управление этими выбросами позволит предприятиям соответствовать курсу страны на декарбонизацию экономики и реализацию механизмов углеродного регулирования (система торговли квотами) по всей стране.

Ключевые слова: плата за негативное воздействие, окружающая среда, парниковые газы, углеродная нейтральность, шахтный метан, угольная отрасль

Для цитирования: Нагайцев И.А. Оценка источников выбросов парниковых газов на угледобывающих предприятиях // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 111 – 123. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-111-123](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-111-123)

Original article

**ASSESSMENT OF SOURCES OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM COAL
MINING OPERATIONS**

© 2023 I. A. Nagaitsev

Energy Research Centre (4 p., 13 Novinsky Boulevard, Moscow 121099, Russian Federation)

Abstract. The article applies one of the principles of state regulation of organizations that are users of natural resources. Organizations carrying out economic activities are subject to a fee for the negative impact on emissions into the environment. The activities of coal mining companies lead to significant emissions of

methane, a gas that is a pollutant included in the payment. Calculations of the cost of methane emissions were made, the values obtained were analyzed and it was concluded that companies using technologies to reduce total methane emissions reduce operating costs and, as a result, are able to manage factors and changes with external consequences that have a negative impact on the environment. The paper notes that in addition to the economic burden on the enterprise, methane emissions have a negative greenhouse effect, leading to climate change. The article presents world and Russian scientific researches in the direction of updating the accounting and protection of interests of young greenhouse gases in the field of mining. The relevance of the direction of carbon regulation and reduction of greenhouse gas emissions in the Russian Federation is confirmed by the creation of a legislative framework in the Russian Federation, mandatory reporting of greenhouse gas emissions by enterprises and the implementation of pilot project systems for trading quotas for greenhouse gas emissions on Sakhalin. The main provisions for two gases in the southern mines are given, including: mine workings and pipelines for methane removal from the mines, methane flares, emissions from fuel combustion in boiler houses for heating mine workings and administrative buildings, and emissions from fuel-burning vehicles at the enterprise. From the analysis of the values obtained, it was concluded that methane emissions are the main greenhouse gas emissions in coal mines, and that the management of emissions will allow companies to comply with the country's course in the economics of decarbonization and to achieve a low carbon economy.

Keywords: negative impact fee, environment, greenhouse gases, carbon neutrality, coal mine methane, coal industry

For citation: Nagaitsev I.A. Assessment of sources of greenhouse gas emissions from coal mining operations. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 111 – 123. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-111-123](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-111-123)

Введение

Основной целью любого коммерческого предприятия является рост прибыли, одним из инструментов достижения которого является снижение затрат. Частью операционных затрат российских предприятий является плата за негативное воздействие на окружающую среду (НВОС). Это один из механизмов государственного экономического регулирования в области охраны окружающей среды (ОС). Законом об охране окружающей среды предусмотрено, что негативное воздействие на ОС является платным и внесение платы не освобождает субъектов хозяйственной и иной деятельности от выполнения мероприятий по охране окружающей среды и возмещения причиненного ей вреда [1].

В настоящее время актуальным направлением в мире и в России, в частности, является переход к экономике устойчивого низкоуглеродного развития. В рамках саммита БРИКС в августе 2023 г. президент России В.В. Путин отметил в своем обращении значимость развития сотрудничества стран объединения в области декарбонизации экономики, снижения антропогенного воздействия на природу, адаптации к изменениям климата. Он подчеркнул, что страна готова к совместной работе для продвижения более сбалансированных подходов к климатической проблематике на международной арене. Для реализации намерений в стране разрабатываются и принимаются нормативно-правовые акты, регулирующие деятельность компаний, которая характеризуется значительными выбросами парниковых газов. В настоящее время су-

ществует несколько предпосылок реализации системы торговли квотами на выбросы парниковых газов в России [2]. Реализация системы способствует дополнительной нагрузке на компании в части увеличения платы за выбросы парниковых газов сверх установленного лимита (квоты), а также открывает дополнительные возможности для компаний России в части снижения затрат за счет выполнения установленных квот на выбросы парниковых газов путем реализации климатических проектов.

Для предприятий угольной отрасли, добывающих полезные ископаемые подземным способом, наибольшая часть платы за НВОС формируется за счет выбросов метана. Метан – взрыво- и пожароопасный газ, выделяющийся из угольных пластов при их отработке. Для безопасного ведения горных работ, технология отработки предусматривает снижение концентрации метана до предельно-допустимой. Снижение концентрации позволяет безопасно выполнять технологические операции, связанные с подготовкой, добычей и транспортировкой полезных ископаемых на поверхность. Для снижения концентрации метана используются различные способы и схемы проветривания и дегазации горных выработок. Далее метан выбрасывается на поверхность. Являясь загрязняющим веществом (ЗВ), газ оказывает огромное влияние на процесс изменения климата, поскольку потенциал влияния метана (CH₄) на глобальное потепление во много раз выше (в 25 раз), чем оксид углерода CO₂.

Снижение выбросов метана плата за выбросы которого для угольных шахт составляет одну из статей операционных затрат, позволит компаниям снизить часть издержек и улучшить финансовые показатели. Кроме того, снижая выбросы метана, компании стремятся выполнить Парижские соглашения [3], в рамках которых страны обязались сократить антропогенные выбросы парниковых газов (ПГ). В России в 2015 г. издан Указ Президента РФ «О сокращении выбросов парниковых газов». Цель этого документа – обеспечить к 2030 г. сокращение выбросов парниковых газов до 70 % относительно уровня 1990 г. с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов, иных экосистем при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития Российской Федерации [4]. Согласно Указу разработана и принята Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. (Стратегия) [5].

В рамках реализации Стратегии принят Федеральный закон № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [6]. Закон включает меры по ограничению выбросов парниковых газов:

- государственный учет выбросов парниковых газов;
- установление целевых показателей сокращения выбросов парниковых газов;
- поддержка в соответствии с законодательством Российской Федерации деятельности по сокращению выбросов парниковых газов и увеличению поглощения парниковых газов.

Закон предписывает, что организациям, хозяйственная и иная деятельность которых сопровождается выбросами парниковых газов, масса которых эквивалентна 150 и более тысячам тонн оксида углерода в год (2023) или 50 и более тысячам тонн оксида углерода в год (2024), необходимо предоставлять отчетность о выбросах парниковых газов в порядке и по форме, установленным Правительством Российской Федерации. Для выполнения расчетов объемов выбросов парниковых газов необходимо пользоваться методиками количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов (приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 371 от 27 мая 2022 г.) [7].

Вышеописанные экономические и регуляторные действия приводят к выводу, что исследование возможностей управления и снижения выбросов метана позволяют решить сразу несколько задач, стоящих перед современными угледобывающими предприятиями:

– уменьшение негативного воздействия на окружающую среду путем снижения выбросов метана, являющегося парниковым газом, влияющим на глобальное изменение климата (экологический эффект);

– снижение операционных затрат компаний за счет уменьшения платы за НВОС (экономический эффект);

– митигация будущих рисков, связанных с введением в России системы торговли квотами на выбросы парниковых газов, что несет существенный риск увеличения операционных затрат, связанных с платой за выбросы парниковых газов сверх установленного лимита (экономический эффект).

Необходимость в изучении рассматриваемой проблематики подтверждается множеством научных исследований в России и за рубежом.

Обзор литературы

Научными сотрудниками инженерного департамента горного дела и полезных ископаемых Виргинского технологического института проведен сравнительный анализ выбросов парниковых газов от добычи угля подземным способом и использования на электростанциях и подземной газификации угля (UCG) с выработкой электроэнергии. Анализ показал, что выбросы парниковых газов от UCG на 28 % меньше, чем по традиционной технологии [8].

Группа немецких исследователей провела оценку выбросов ПГ методом, основанном на наблюдениях в региональном масштабе с высокой точностью, используя авиационные и наземные наблюдения, а также скорость ветра в результате нескольких исследовательских полетов. Сделаны выводы о том, что полученные значения в результате эксперимента коррелируют с выбросами ПГ в отчетах, предложено масштабирование метода, используемого в исследовании в другие регионы для более точной оценки выбросов парниковых газов [9].

Научными сотрудниками ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (Институт угля) рассмотрены методологические подходы к контролю эмиссии метана и повышению достоверности ее количественного учета в угледобывающей промышленности Кузбасса. Представлено алгоритмическое обеспечение оценки фугитивных выбросов метана и оксида углерода при добыче угля открытым и подземным способами, а также выбросов метана при последующем обращении с углем, добытым подземным способом [10].

В работе индийских исследователей представлены обновленные оценки запасов парниковых

газов для подземной добычи угля в Индии на основе уточнений Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Исследование устраняет пробелы в отчетности по парниковым газам за счет количественной оценки выбросов на угольных шахтах [11].

Научными сотрудниками из США представлен прогноз глобальных выбросов метана при добыче угля при различных сценариях добычи, с увеличением глубины разработки до 2100 г. В работе [12] представлена обновленная методология расчета выбросов метана при добыче угля, в которой учитываются метод добычи, марка и глубина разработки, а также используются коэффициенты выбросов, основанные на фактических данных, полученных от предприятий отрасли. В исследовании используется новая методология расчета выбросов метана из заброшенных шахт. В работе [12] сделаны выводы, что к 2100 г. выбросы метана от действующих шахт увеличатся в четыре раза, а от ликвидированных – в восемь раз.

В работе [13] проведен анализ выбросов парниковых газов от угольных шахт и выявлена тенденция к снижению прямых выбросов ПГ (метана) с 2011 по 2019 гг. за счет сокращения числа шахт. Всего было закрыто 9567 угольных шахт мощностью 1610 т угля. Корректировка структуры добычи угля влияет на интенсивность выбросов метана в угольных шахтах, следовательно, средний коэффициент выбросов на угольных шахтах по стране снизился с 9 в 2011 г. до 8 млн³/т в 2019 г.

Научными сотрудниками Федерального исследовательского центра угля и углехимии проделано исследование, в котором рассмотрены категории выбросов парниковых газов, связанных с деятельностью угледобывающих предприятий. Особенности и количественная оценка выбросов парниковых газов рассматриваются на примере угледобывающего предприятия. Даны рекомендации по сокращению выбросов парниковых газов на угледобывающих предприятиях [14].

Китайскими научными сотрудниками проведено исследование модели и метода расчета выбросов ПГ для подземного полностью механизированного процесса добычи полезных ископаемых. Работа актуальна для страны, поскольку угольная отрасль является одной из основных отраслей промышленности, которая сопровождается выбросами ПГ. Количественная оценка выбросов углерода при добыче угля является важным шагом в сокращении этих выбросов. В работе [15] исследуется модель учета выбросов ПГ (B-R модель) при полностью механизированной добыче угля, которая включает в себя

общее количество выбросов ПГ и выбросы ПГ от каждого звена технологической цепочки.

В работе [16] проведена оценка интенсивности выбросов парниковых газов от утечек газа при его транспортировке, а также выбросов метана при добыче угля. Сделаны выводы о необходимости ускорения методов обнаружения, учета и управления выбросами метана от утечек в газовых системах, для подтверждения того, что газовые утечки менее интенсивны по отношению к утечкам метана на угольных шахтах.

В работе [17] проведена оценка выбросов парниковых газов при добыче угля. Отмечено, что уголь является основным ископаемым топливом в стране для производства электроэнергии. Сделаны выводы о необходимости повышения энергоэффективности и использования энергии из возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

В работе [18] отмечена необходимость в снижении выбросов парниковых газов в угледобывающей отрасли. Представлены рекомендации по корректировке текущего законодательства по регулированию угольной отрасли (в части выбросов парниковых газов).

В работе [19] произведен анализ характеристик выбросов метана в угледобывающей промышленности Китая и исследованы меры по сокращению выбросов. Сделаны выводы, что за последние десять лет сильно изменилась структура добычи угля в Китае, но при этом коэффициенты, которые используются при расчете выбросов парниковых газов, не изменились. Отмечено, что выбросы ПГ снизились за счет сокращения числа шахт с высокой метанодностью и газообильностью.

Большое количество исследований подтверждают высокую заинтересованность научного сообщества в обосновании необходимости снижения загрязнения окружающей среды выбросами метана (ПГ), влияющим на процессы глобального потепления в мире. Проводятся различные исследования возможности снижения выбросов метана от угольных шахт, актуализируются расчетные коэффициенты для более точного определения выброса парниковых газов предприятиями.

Источники выбросов

Расчет выбросов парниковых газов осуществляется в соответствии с утвержденной методикой (Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 371 от 27 мая 2022 г.). Организации документируют границы количественного определения выбросов парниковых газов, в границы включают прямые выбросы парниковых газов. Источниками выбросов являются производственно-технологические процессы на объектах организаций, в результате которых в атмосферу выделяются ПГ.

Исходные данные для расчета выбросов ПГ
Table 1. Baseline data used to calculate GHG emissions

Показатель	Значение показателя для шахты		
	1	2	3
Объем добычи, млн т/год	3,5	1,5	1,8
Прямые выбросы метана, тыс. т/год	100,5	60,3	90,5
Утилизация метана на факеле, тыс. т/год	–	4,5	7,8
Объем выбросов метана после утилизации, тыс. т/год	100,5	55,8	82,7
Месторождение угля, который сжигается котельными шахт	Кузнецкое	Кузнецкое	Кузнецкое
Потребление угля котельными, тыс. т/год	45,5	20,0	15,5
Вид сжигаемого топлива транспортом:			
– бензин, т/год	20	14	10
– дизельное топливо, т/год	380	250	170

Для угольных шахт в границы количественного определения выбросов ПГ попадают следующие категории источников выбросов.

1. Проведение технологических операций, осуществляемых при добыче угля подземным способом. В категорию включают выбросы метана (CH_4) на угольных шахтах от следующих источников [20]:

- вентиляционные горные выработки, предназначенные для отвода исходящей струи воздуха (концентрация метана в струе менее 0,75 %);
- трубопроводы для изолированного отвода метана, газодренажные горные выработки (концентрация метана в струе менее 3,5 %);
- дегазационные трубопроводы (концентрация метана в струе более 25 %).

2. Сжигание выбросов на факельных установках (источник соединений CO_2 и CH_4). Сжигание на факельных установках проводится с целью утилизации метана, выбрасываемого при подземной добыче. Распространено использование факельных установок закрытого типа для бессажевого сжигания метана.

3. Выбросы оксида углерода CO_2 от сжигания топлива транспортными средствами. В производственной цепочке при добыче угля используется различный транспорт (подземный транспорт для доставки людей и материалов в подземных горных выработках, наземный транспорт для перевозки полезного ископаемого, доставки людей и материалов, технологический транспорт для выполнения наземных работ с целью дальнейшей разведки полезных ископаемых и жизнеобеспечения работы предприятия). Также к учету принимается топливо, сожженное для генерации электроэнергии в местах, где нет возможности подключения питания от общей сети.

4. Стационарное сжигание газообразного, жидкого и твердого топлива. Выбросы CO_2 от сжигания топлива котельными для отопления подземных горных выработок и административно-бытовых помещений.

Расчет объемов выбросов парниковых газов для трех угледобывающих предприятий

Расчет выполнен на примере трех действующих предприятий, осуществляющих добычу угля подземным способом:

- шахта 1 (относится к сверхкатегорной по газу, с относительной газообильностью более $15 \text{ м}^3/\text{т}$, средняя глубина горных работ 560 м, добывается уголь марки ГЖ);
- шахта 2 (относится к сверхкатегорной по газу, с относительной газообильностью более $15 \text{ м}^3/\text{т}$, средняя глубина горных работ 640 м, для снижения выбросов метана на предприятии используются факельные установки, добывается уголь марки КС);
- шахта 3 (относится к сверхкатегорной по газу, с относительной газообильностью более $15 \text{ м}^3/\text{т}$, средняя глубина горных работ 710 м, для снижения выбросов метана на предприятии используются факельные установки, добывается уголь марки Ж).

Исходные данные для расчетов объемов выбросов парниковых газов на шахтах представлены в табл. 1.

Расчет выбросов парниковых газов

1. Проведение технологических операций, осуществляемых при добыче, обработке, транспортировке и хранении угля.

Для выбросов метана, осуществляемых при добыче угля подземным способом (дегазация

Выбросы парниковых газов от процессов, осуществляемых при добыче угля

Table 2. Greenhouse gas emissions from coal mining

Шахта	Парниковый газ	$FC_{j,y}$ т/год	Коэффициент пересчета	E_{CO_2} , т CO_2 -экв. /год
1	Метан (CH_4)	100 500	25	2 512 500
2	Метан (CH_4)	55800	25	1 395 000
3	Метан (CH_4)	82700	25	2 067 500

сопутствующих газов из угольных пластов и вентиляция воздуха угольных шахт) коэффициент пересчета величин выбросов парниковых газов в эквивалент оксида углерода CO_2 определяется (на горизонте 100 лет) равен 25.

Выбросы парниковых газов рассчитываются по формуле:

$$E_{CO_2} = FC_{j,y} \cdot 25, \quad (1)$$

где E_{CO_2} – масса выбросов парникового газа, т CO_2 -экв.; $FC_{j,y}$ – масса выбросов парникового газа, т.

Произведенные расчеты выбросов парниковых газов при проведении процессов, осуществляемых при добыче угля, сведены в табл. 2.

2. Сжигание на факельных установках.

Количественное определение выбросов парниковых газов от сжигания на факельных установках углеводородных смесей выполняется по следующей формуле:

$$E_{i,y} = \sum_{j=1}^n (FC_{j,y} EF_{i,j,y}), \quad (2)$$

где $E_{i,y}$ – выбросы i -ого парникового газа от сжигания углеводородных смесей на факельной установке за период y , т; $FC_{j,y}$ – расход j -ой углеводородной смеси на факельной установке

за период y , тыс. m^3 (т); $EF_{i,j,y}$ – коэффициент выбросов i -парникового газа от сжигания j -ой углеводородной смеси на факельной установке за период y , т/тыс. m^3 (т/т).

Коэффициенты представлены в табл. 3 для оксида CO_2 (i – вид парникового газа (CO_2 , CH_4); j – вид углеводородной смеси; n – количество видов углеводородных смесей, сжигаемых на факельной установке).

При сжигании метана на факельной установке часть метана выбрасывается в атмосферу, и для расчета выбросов парниковых газов используется коэффициент недожога углеводородной смеси на факельной установке ($CF_{j,y}$), который принимается в зависимости от условий сжигания углеводородных смесей (бессажевое или сажевое сжигание). Коэффициент недожога углеводородной смеси на факельной установке составляет 0,0006 (бессажевое сжигание, в том числе природного газа некondиционных газовых и газоконденсатных смесей).

Результаты расчета объемов выбросов парниковых газов от сжигания метана на факельных установках представлены в табл. 4.

3. Сжигание на транспорте.

Расчет выполняется по отдельным типам автотранспортных средств (грузовой, пассажирский, легковой) и видам потребленного топлива по следующему уравнению:

Коэффициенты выбросов ПГ от сжигания углеводородной смеси на факельной установке

Table 3. GHG emission factors from the combustion of a hydrocarbon mixture at a flare plant

Вид углеводородной смеси	$EF_{CO_2,j,y}$		$EF_{CH_4,j,y}$, %	
	т/т	т/тыс. m^3	т/т	т/тыс. m^3
Газ дегазации угольных пластов	1,8863	1,6294	0,0206	0,0178

Результаты расчета ПГ от сжигания метана на факельных установках
Table 4. Results of GHG calculation from methane combustion in flares

Показатель	Значение показателя для шахты	
	2	3
$FC_{j,y}$ т CH ₄ /год	4 500	7 800
$EF_{CO_2,j,y}$ т/т	1,8863	1,8863
$EF_{CH_4,j,y}$ т/т	0,0006	0,0006
$E_{CO_2,y}$ выбросы CO ₂ расчетным методом, т CO ₂ /год	8 488	14 713
$E_{CH_4,y}$ выбросы CH ₄ расчетным методом, т CO ₂ /год	2,7	4,7
$E_{i,y}$ суммарные выбросы парниковых газов от сжигания метана на факеле, т CO ₂ /год	8 491	14 718

$$E_{CO_2,y} = \sum_{j,b,y} (FC_{j,b,y} EF_{j,b}), \quad (3)$$

где $E_{CO_2,y}$ – выбросы CO₂ от сжигания топлива в двигателях автотранспортных средств за период y , т CO₂; $FC_{j,b,y}$ – расход топлива вида j транспортным средством типа b за период y , т; $EF_{j,b}$ – коэффициент выбросов оксида CO₂ при использовании в транспортном средстве типа b вида топлива j , т CO₂/т (принимается по табл. 5); j – вид топлива (бензин, дизельное топливо, сжиженные

нефтяные и природные газы); b – тип транспортного средства (грузовой, пассажирский, легковой).

Расчеты объемов выбросов парниковых газов от сжигания топлива транспортными средствами представлены в табл. 6.

4. Стационарное сжигание топлива.

Количественное определение выбросов оксида углерода CO₂ от стационарного сжигания топлива выполняется расчетным методом по отдельным источникам, группам источников или организации в целом по формуле:

$$E_{CO_2} = \sum_{j=1}^n (FC_{j,y} EF_{CO_2,j,y} OF_{j,y}), \quad (4)$$

Т а б л и ц а 5

Коэффициент выбросов оксида углерода CO₂ при использовании топлива в транспортном средстве
Table 5. CO₂ emission factor when fuel is used in a vehicle

Вид топлива	EF			Плотность (P), кг/л
	т CO ₂ /т (тыс. м ³)	кг/ТДж	кг/т у.т.	
Бензин АИ-92	3,026	69 300	2 031	0,735
Дизельное топливо зимнее	3,149	74 100	2 172	0,840

Т а б л и ц а 6

Расчеты объемов выбросов ПГ от сжигания топлива транспортными средствами
Table 6. Calculations of greenhouse gas emissions from vehicle fuel combustion

Показатель	Значение показателя для шахты		
	1	2	3
$FC_{j,b,y}$ т/год	20	14	10
$FC_{j,b,y}$ т/год	380	150	170
$EF_{j,b}$ т CO ₂ /т	3,026	3,026	3,026
$EF_{j,b}$ т CO ₂ /т	3,149	3,149	3,149
$E_{CO_2,y}$ т CO ₂ /год	61	42	30
$E_{CO_2,y}$ т CO ₂ /год	1197	472	535
$E_{i,y}$ т CO ₂ /год	1258	514	565

Т а б л и ц а 7

Коэффициенты выбросов и содержания углерода для соответствующих видов топлива**Table 7. Emission factors and carbon content for each fuel**

Вид топлива	Коэффициенты перевода в тонны условного топлива и энергетические единицы ($NCV_{j,y}$)			$EF_{CO_2, j, y}$		$W_{c, j, y}$	
	Единица измерения	т у.т./т (тыс. м ³)	ТДж/тыс. т (млн м ³)	т CO ₂ /т у.т.	т CO ₂ /ТДж	С/т у.т.	т С/ТДж
Кузнецкий уголь	т	0,876	25,4	2,69	91,9	0,73	25,1

где E_{CO_2} – выбросы CO₂ от стационарного сжигания топлива за период y , т CO₂; $FC_{j,y}$ – расход топлива j за период y , тыс. м³, т, т у.т. или ТДж; $EF_{CO_2, j, y}$ – коэффициент выбросов CO₂ от сжигания топлива j за период y , т CO₂/ед.; $OF_{j,y}$ – коэффициент окисления топлива j , доля; j – вид топлива, используемого для сжигания; n – количество видов топлива, используемых за период y .

Коэффициенты выбросов оксида CO₂ от сжигания топлива ($EF_{CO_2, j, y}$) рассчитываются на основе фактических данных о содержании углерода в твердом и жидком топливе:

$$EF_{CO_2, j, y} = W_{c, j, y} \cdot 3,664, \quad (5)$$

где $EF_{CO_2, j, y}$ – коэффициент выбросов оксида CO₂ от сжигания j -ого топлива за период y , т CO₂/т; $W_{c, j, y}$ – содержание углерода в j -ом топливе за период y , т С/т; 3,664 – коэффициент перевода, т CO₂/т С.

Для расчета используются значения коэффициентов выбросов и содержания углерода для соответствующих видов топлива. В табл. 7 указаны коэффициенты перевода для кузнецкого угля.

Для кузнецкого угля содержание углерода согласно Приказу МПР № 371 равно $W_{c, j, y} = 0,73$ т С/т у.т.,

Коэффициент выбросов оксида CO₂ от сжигания j -углей за период составит:

$$EF_{CO_2, j, y} = 0,73 \cdot 3,664 = 2,67 \text{ т CO}_2/\text{т у.т.}$$

Расход топлива котельной в отопительный период на шахте 1 составляет 45 500 т угля. Тогда выбросы оксида CO₂ составят:

$$E_{CO_2} = 45500 \cdot 2,67 = 121485 \text{ т CO}_2 \text{ экв.}$$

Для шахт 2 и 3 произведены аналогичные расчеты, итоговые результаты сведены в табл. 8.

Для определения объема выбросов парниковых газов необходимо суммировать объем выбросов парниковых газов от каждого технологического процесса (табл. 9).

Анализ рассчитанных объемов выбросов парниковых газов предприятий

Анализ рассчитанного объема выбросов парниковых газов от различных процессов на угледобывающих предприятиях позволяет сделать следующие выводы.

Выбросы метана от общего количества выбросов ПГ для предприятий в среднем составляют около 96 % (рис. 1).

Эксплуатация факельных установок на шахтах 2 и 3 позволила снизить выбросы метана на 4,5 и 7,8 тыс. т CH₄ (табл. 1).

Т а б л и ц а 8

Результаты расчетов выбросов ПГ от стационарного сжигания топлива**Table 8. Results of calculations of greenhouse gas emissions from stationary fuel combustion**

Шахта	$W_{c, j, y}$, т	$EF_{CO_2, j, y}$, т CO ₂ /т у.т.	E_{CO_2} , т CO ₂ -экв
1	45500	2,67	121485
2	20000	2,67	53400
3	15500	2,67	41385

Результаты расчетов выбросов ПГ
Table 9. Results of GHG emissions calculations

Технологические процессы (показатель)	Значение показателя для шахты		
	1	2	3
Проведение технологических операций, осуществляемых при добыче, обработке, транспортировке и хранении угля, т CO ₂ /год	2 512 500	1 395 000	2 067 500
Сжигание на факельных установках, т CO ₂	–	8 491	14 718
Сжигание на транспорте	1258	514	565
Стационарное сжигание топлива, т CO ₂	121485	53400	41385
Суммарный объем выбросов парниковых газов, т CO ₂	2 635 243	1 457 405	2 124 168

Выбросы метана и сниженный объем выбросов ПГ представлены на рис. 2.

Снижение выбросов метана факельными установками позволяет, кроме снижения выбросов парниковых газов, сократить плату за негативное воздействие на окружающую среду.

В настоящее время согласно нормативной базе эколого-экономических расчетов плата за негативное воздействие на окружающую среду в пределах нормативов допустимых выбросов или сбросов загрязняющих веществ $\Pi_{нд}$ рассчитывается по формуле [22]:

$$\Pi_{нд} = \sum_{i=1}^n M_{ндi} H_{нли} K_{от} K_{но} K_{во}), \quad (6)$$

где $M_{ндi}$ – платежная база за выбросы или сбросы i -го загрязняющего вещества (определяют как

объем или массу выбросов или сбросов ЗВ в количестве установленных нормативов допустимых выбросов или сбросов ЗВ); $H_{нли}$ – ставка платы за выброс или сброс i -го загрязняющего вещества (ставка платы за выбросы метана составляет 108 руб. за т) [23]; $K_{от}$ – дополнительный коэффициент к ставкам платы (применяется в отношении территорий и объектов, находящихся под особой охраной в соответствии с федеральными законами, равен двум); $K_{но}$ – коэффициент к ставкам платы за выброс или сброс i -го ЗВ за объем или массу выбросов или сбросов ЗВ, в пределах допустимых нормативов, равный 1; $K_{во}$ – коэффициент к ставкам платы за сбросы ЗВ организациями, эксплуатирующими централизованные системы водоотведения поселений или городских округов при сбросах загрязняющих веществ, равный 0,5; n – количество видов ЗВ.

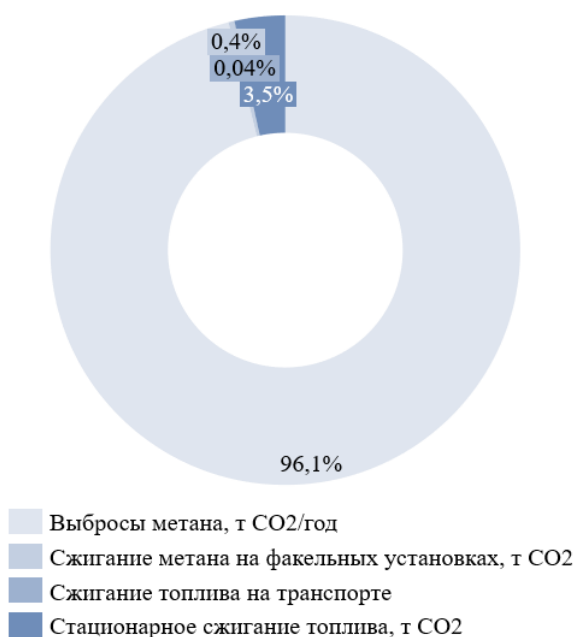


Рис. 1 Распределение среднего объема выбросов ПГ предприятиями
 Fig. 1. Distribution of average GHG emissions by company

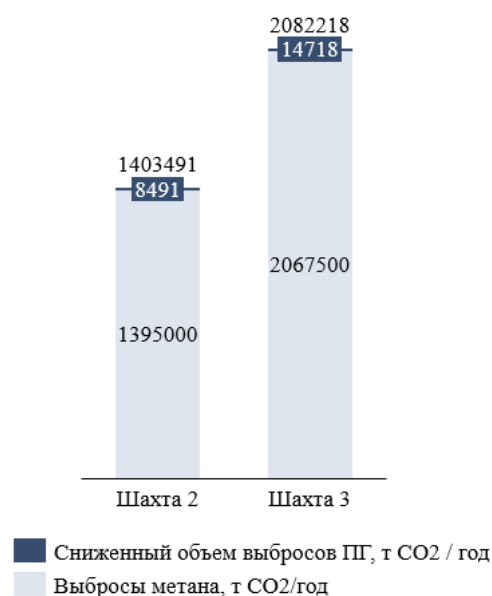


Рис. 2 Выбросы метан и сниженный объем выбросов ПГ, т CO₂ экв.
 Fig. 2. Methane emissions and reduced greenhouse gas emissions, t CO₂ eq.

Плата за выбросы метана
Table 10. Payment for methane emissions

Показатель	Значение показателя для шахты		
	1	2	3
Прямые выбросы метана, тыс. т /год	100,5	60,3	90,5
Утилизация метана на факельных установках, тыс. т/год	–	4,5	7,8
Объем выбросов метана после утилизации, тыс. т/год	100,5	55,8	82,7
Снижение платы за НВОС, млн руб./год	–	0,6	1,1
Итого плата за НВОС, млн руб./год	13,7	7,6	11,2

Для расчета платы за НВОС при превышении количества загрязняющих веществ, которое установлено для объектов категории I, коэффициент $K_{нд}$ принимается равным 100.

Коэффициент индексации тарифов платы за негативное воздействие на окружающую среду в 2023 г. равен 1,26 [27].

Расчет размера платы шахт за выбросы метана представлена в табл. 10.

Внедрение факельных установок на шахтах 2 и 3 позволило снизить операционные затраты предприятий за год на 0,6 и 1,1 млн руб.

Эксплуатация установок на предприятиях позволяет управлять выбросами метана и удерживать их в пределах нормативных значений, снижая тем самым вероятность платы за НВОС с применением 100-кратного коэффициента за сверхнормативные выбросы.

Управление выбросами метана позволяет компаниям снижать негативное воздействие предприятий на окружающую среду; минимизировать операционные затраты в части платы за НВОС; снижать риск платы за сверхнормативные выбросы метана; соответствовать планам России по декарбонизации и нивелировать риски, связанные с реализацией на всей территории страны системы торговли квотами на выбросы парниковых газов.

В настоящее время в России реализовано небольшое количество проектов по снижению выбросов парниковых газов. Сдерживающими факторами являются высокие капитальные затраты и отсутствие углеродного регулирования на всей территории страны.

Выводы

Определены источники выбросов парниковых газов угольных шахт, произведены расчеты выбросов парниковых газов, согласно утвер-

жденной Министерством природных ресурсов методике, установлено, что наибольшие выбросы парниковых газов приходятся на метан. Отмечено, что факельные установки позволяют уменьшить загрязнение окружающей среды на территории работы предприятия, а также снизить операционные затраты, что является двойным эффектом (экологическим и экономическим) для предприятий. Внедрение большего количества установок позволит предприятиям управлять выбросами ПГ и нивелировать риск платы за НВОС в стократном размере. Снижение выбросов парниковых газов компаниями соответствует курсу страны на декарбонизацию экономики и реализацию механизмов углеродного регулирования (система торговли квотами) по всей стране.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузмаков С.А., Воронов Г.А. Основные подходы в определении качества окружающей среды // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 2. С.587–590.
2. Нагайцев И.А., Петрова Т.В. Предпосылки становления системы торговли квотами на выбросы парниковых газов в России // Актуальные проблемы экономики и управления в XXI веке. Ч. 2. 2023. С. 161–166.
3. Парижское соглашение к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. Генеральная Ассамблея, 2015. 42 с.
4. Указ Президента Российской Федерации № 666. О сокращении выбросов парниковых газов. 2020. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202011040008> (дата обращения 15.08.2023).
5. Стратегия социально экономического развития Российской Федерации с низким

- уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. Правительство Российской Федерации. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/726639341> (дата обращения 20.08.2023).
6. Федеральный закон № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» от 2 июля 2021 г. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (дата обращения 22.08.2023).
 7. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 371 от 27 мая 2022 года. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (дата обращения 25.08.2023).
 8. Hyder Z., Ripepi, N.S., Karmis M.E. A life cycle comparison of greenhouse emissions for power generation from coal mining and underground coal gasification // *Mitig Adapt Strateg Glob Change*. 2016. Vol. 21. P. 515–546. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9561-8>
 9. Fiehn, A., Kostinek, J., Eckl, M., Klausner, T., Gałkowski, M., Chen, J., Gerbig, C., Röckmann, T., Maazallahi, H., Schmidt, M., Korbeń, P., Nečki, J., Jagoda, P., Wildmann, N., Mallaun, C., Bun, R., Nickl, A.-L., Jöckel, P., Fix, A., and Roiger, A.: Estimating CH₄, CO₂ and CO emissions from coal mining and industrial activities in the Upper Silesian Coal Basin using an aircraft-based mass balance approach // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 20. No. 21. P. 12675–12695. <https://doi.org/10.5194/acp-20-12675-2020>
 10. Тайлаков О.В., Соколов С.В., Уткаев Е.А., Михалев Д.С. Алгоритмическое обеспечение цифровой платформы мониторинга fugитивных выбросов парниковых газов при угледобыче // *Уголь*. 2023. № 5. С. 84–89. <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-84-89>
 11. Ajay K. Singh, Udayan Singh, Durga C. Panigrahi1 and Jayant Singh // *iScience*. 2022. Vol. 25. P. 104946. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106878>
 12. Nazar Kholod, Meredydd Evans, Raymond C. Pilcher, Volha Roshchanka, Felicia Ruiz, Michael Coté, Ron Collings. Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 256. P. 120489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120489>
 13. Guo J., Gao J., Yan K., Zh. Bo. Unintended mitigation benefits of China's coal de-capacity policies on methane emissions // *Energy Policy*. 2023. Vol. 181. P. 113718. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113718>
 14. Zastrelov D., Snetova E., Lukina E. Estimate of greenhouse gas emissions during coal production // *E3S Web of Conferences*. 2021. No. 330. P. 04003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133004003>
 15. Li Benzhen, Shi Yongkui, Hao Jian, Ma Chengyun, Pang Chuming, Yang Huidi. Research on a Carbon Emission Calculation Model and Method for an Underground Fully Mechanized Mining Process // *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 8. P. 2871. <http://dx.doi.org/10.3390/en15082871>
 16. Singh Ajay. Better accounting of greenhouse gas emissions from Indian coal mining activities A field perspective // *Environmental Practice*. 2019. Vol. 21. No. 1. P. 36–40. <http://dx.doi.org/10.1080/14660466.2019.1564428>
 17. Ivanova S., Vesnina A., Fotina N., Prosekov A. An Overview of Carbon Footprint of Coal Mining to Curtail Greenhouse Gas Emissions // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. No. 22. P. 15135. <http://dx.doi.org/10.3390/su142215135>
 18. Christensen S., Durrant N., Connor P.O., Phillips A. Regulating greenhouse gas emissions from coal mining activities in the context of climate change // *Environmental and Planning Law Journal*. 2011. Vol. 28. No. 6. P. 381–415.
 19. Zhu Anyu, Wang Qifei, Liu Dongqiao, Zhao Yihan. Analysis of the Characteristics of CH₄ Emissions in China's Coal Mining Industry and Research on Emission Reduction Measures // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19. No. 12. P. 7408. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127408>
 20. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 507 от 8 декабря 2020 года. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012210103?rangeSize=50> (дата обращения 26.08.2023).
 21. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 2979-р от 22.10.2021 г.». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202110260021> (дата обращения 26.08.2023).
 22. Постановление Правительства РФ от 03.03.2017 № 255 «Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201703090002> (дата обращения 27.08.2023).

23. Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 № 913 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/420375216> (дата обращения 29.08.2023).
24. Постановление Правительства РФ от 20.03.2023 № 437 «О применении в 2023 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202303300046> (дата обращения 29.08.2023).

REFERENCES

1. Buzmakov S.A., Voronov G.A. The main approaches in determining the quality of the environment. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2016, vol. 18, no. 2, pp. 587–590. (In Russ.).
2. Nagaitsev I.A., Petrova T.V. Prerequisites for the establishment of a system of trading quotas for greenhouse gas emissions in Russia. *Aktual'nye problemy ekonomiki i upravleniya v XXI veke*. Ch.2. 2023, pp. 161–166. (In Russ.).
3. Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change. General Assembly, 2015. 42 p. (In Russ.).
4. Decree of the President of the Russian Federation No. 666. On reducing greenhouse gas emissions. 2020. – Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202011040008> (Accessed 15.08.2023). (In Russ.).
5. The strategy of socio-economic development of the Russian Federation with a low level of greenhouse gas emissions until 2050. The Government of the Russian Federation. – Available at URL: <https://docs.cntd.ru/document/726639341> (Accessed 20.08.2023). (In Russ.).
6. Federal Law No. 296-FZ "On Limiting Greenhouse Gas Emissions" dated July 2, 2021 – Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (Accessed 22.08.2023). (In Russ.).
7. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation No. 371 dated May 27, 2022. Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (Accessed 25.08.2023). (In Russ.).
8. Hyder Z., Ripepi, N.S., Karmis M.E. A life cycle comparison of greenhouse emissions for power generation from coal mining and underground coal gasification. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*. 2016, vol. 21, pp. 515–546. <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9561-8>
9. Fiehn, A., Kostinek, J., Eckl, M., Klausner, T., Gałkowski, M., Chen, J., Gerbig, C., Röckmann, T., Maazallahi, H., Schmidt, M., Korbeň, P., Nečki, J., Jagoda, P., Wildmann, N., Mallaun, C., Bun, R., Nickl, A.-L., Jöckel, P., Fix, A., and Roiger, A.: Estimating CH₄, CO₂ and CO emissions from coal mining and industrial activities in the Upper Silesian Coal Basin using an aircraft-based mass balance approach. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020, vol. 20, no. 21, pp. 12675–12695. <https://doi.org/10.5194/acp-20-12675-2020>
10. Tailakov O.V., Sokolov S.V., Utkaeв E.A., Mikhalev D.S. Algorithmic support of a digital platform for monitoring fugitive greenhouse gas emissions from coal mining. *Ugol'*. 2023, no. 5, pp. 84–89. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-5-84-89>
11. Ajay K. Singh, Udayan Singh, Durga C. Panigrahi,1 and Jayant Singh. *iScience*. 2022, vol. 25, pp. 104946. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106878>
12. Nazar Kholod, Meredydd Evans, Raymond C. Pilcher, Volha Roshchanka, Felicia Ruiz, Michael Coté, Ron Collings. Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 256, pp. 120489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120489>
13. Guo J., Gao J., Yan K., Zh. Bo. Unintended mitigation benefits of China's coal de-capacity policies on methane emissions. *Energy Policy*. 2023, vol. 181, pp. 113718. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113718>
14. Zastrellov D., Snetova E., Lukina E. Estimate of greenhouse gas emissions during coal production. *E3S Web of Conferences*. 2021, no. 330, pp. 04003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133004003>
15. Li Benzhen, Shi Yongkui, Hao Jian, Ma Chengyun, Pang Chuming, Yang Huidi. Research on a Carbon Emission Calculation Model and Method for an Underground Fully Mechanized Mining Process. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 8, pp. 2871. <http://dx.doi.org/10.3390/en15082871>
16. Singh Ajay. Better accounting of greenhouse gas emissions from Indian coal mining activities A field perspective. *Environmental Practice*. 2019, vol. 21, no. 1, pp. 36–40. <http://dx.doi.org/10.1080/14660466.2019.1564428>
17. Ivanova S., Vesnina A., Fotina N., Prosekov A. An Overview of Carbon Footprint of Coal Mining to Curtail Greenhouse Gas Emissions . *Sus-*

- tainability. 2022, vol. 14, no. 22, pp. 15135. <http://dx.doi.org/10.3390/su142215135>
18. Christensen S., Durrant N., Connor P.O', Phillips A. Regulating greenhouse gas emissions from coal mining activities in the context of climate change. *Environmental and Planning Law Journal*. 2011, vol. 28, no. 6, pp. 381–415.
 19. Zhu Anyu, Wang Qifei, Liu Dongqiao, Zhao Yihan. Analysis of the Characteristics of CH₄ Emissions in China's Coal Mining Industry and Research on Emission Reduction Measures. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022, vol. 19, no. 12, pp. 7408. <https://doi.org/10.3390/ijerph19127408>
 20. Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision No. 507 dated December 8, 2020. Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012210103?rangeSize=50> (Accessed 26.08.2023). (In Russ.).
 21. Decree of the Government of the Russian Federation No. 2979-r dated 10/22/2021.– Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202110260021> (Accessed 29.08.2023). (In Russ.).
 22. Decree of the Government of the Russian Federation No. 255 dated 03.03.2017 «On the Calculation and collection of fees for negative environmental impact». – Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201703090002> (Accessed 29.08.2023). (In Russ.).
 23. Decree of the Government of the Russian Federation No. 913 dated 13.09.2016 «On the rates of payment for negative environmental impact and additional coefficients». – Available at URL: <https://docs.cntd.ru/document/420375216> (Accessed дд.мм.2023). (In Russ.).
 24. Decree of the Government of the Russian Federation No. 437 dated 20.03.2023 «On the Application of Payment rates for negative Environmental impact in 2023». – Available at URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202303300046> (Accessed дд.мм.2023). (In Russ.).
- Сведения об авторах**
Илья Александрович Нагайцев, главный эксперт департамента устойчивого развития, Аналитический центр ТЭК
E-mail: ia.nagaitzev@yandex.ru
ORCID 0009-0004-0777-0857
- Information about the authors**
Ilya A. Nagaitsev, Chief Expert of the Sustainable Development Department, Analytical Centre of the Fuel and Energy Complex
E-mail: ia.nagaitzev@yandex.ru
ORCID 0009-0004-0777-0857
- Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*
The authors declare that there is no conflict of interest.
- Поступила в редакцию 14.09.2023
 После доработки 18.09.2023
 Принята к публикации 21.09.2023
- Received 14.09.2023
 Revised 18.09.2023
 Accepted 21.09.2023

Оригинальная статья

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-124-140

НАУЧНАЯ ШКОЛА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ОБЛАСТИ ТЯЖЕЛОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

© 2023 г. А. Б. Юрьев, А. Н. Савельев, С. В. Коновалов

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

*К 85-летию кафедры механического оборудования
металлургических заводов, в настоящее время объединенной
кафедры механики и машиностроения*

Аннотация. Показана значимость для успешного существования кафедры постепенно накапливаемого опыта выработки научной продукции и постоянного воспроизводства научных кадров. Научная работа позволяет кафедре как научной школе планировать на ближайшие годы виды работ по решению актуальных научных задач, связанных с технологическим оборудованием, и готовить для этой сферы научной деятельности научных сотрудников. Все это вселяет уверенность в то, что научная школа, которая зародилась в далекие тридцатые годы XX века, неуклонно развивалась и, сформировавшись, заняла достойное место в научном сообществе нашей страны, успешно продолжит свою деятельность. Задачи, решаемые кафедрой как научной школой в последние десятилетия, могут быть обозначены как задачи теории и практики, нацеленные на формирование сложных технических и социально-технических систем требуемой работоспособности. Подчеркивается, что технические и производственные комплексы в настоящее время изучаются сотрудниками кафедры как сложные, взаимосвязанные, работающие синхронно энергетические системы. Научная школа кафедры занимается выработкой знаний, которые позволят в итоге формировать производственные комплексы, обладающие рациональной компоновкой и требуемой в настоящее время работоспособностью.

Ключевые слова: научная школа, последовательность развития, тяжелое технологическое оборудование, сложные технические системы, этапы обеспечения работоспособности

Благодарности: авторы благодарят коллектив кафедры механики и машиностроения СибГИУ за активное участие в сборе материала, используемого в настоящей работе.

Для цитирования: Юрьев А.Б., Савельев А.Н., Коновалов С.В. Научная школа Западной Сибири в области тяжелого технологического оборудования // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 3 (45). С. 124 – 140. [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-124-140](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-124-140)

Original article

SCIENTIFIC SCHOOL OF WESTERN SIBERIA IN THE FIELD OF HEAVY TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

© 2023 A. B. Yur'ev, A. N. Savel'ev, S. V. Konovalov

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

Abstract. The importance for the successful existence of the department of gradually accumulating experience in the development of scientific products and the constant reproduction of scientific personnel is shown. Scientific work allows the department, as a scientific school, to plan for the coming years the types of work on solving urgent scientific problems related to technological equipment, and to train scientific staff for this field of scientific activity. All this inspires confidence that the scientific school, which was founded in the distant thirties of the XX century, steadily developed and, having formed, took a worthy place in the scientific community of our country, will successfully continue its activities. The tasks solved by the department as a scientific school in recent decades can be designated as problems of theory and practice aimed at the formation of complex technical and socio-technical systems of the required efficiency. It is emphasized that technical and industrial complexes are currently being studied by the staff of the department as complex, interconnected, synchronously operating energy systems. The scientific school of the department is engaged in the development of knowledge that will eventually form production complexes with a rational layout and the currently required performance.

Keywords: scientific school, sequence of development, heavy technological equipment, complex technical systems, stages of ensuring operability

Acknowledgements: the authors thank the staff of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering of SibGIU for their active participation in collecting the material used in this work.

For citation: Yur'ev A.B., Savel'ev A.N., Konovalov S.V. Scientific school of Western Siberia in the field of heavy technological equipment. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023, no. 3 (45), pp. 124 – 140. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3\(45\)-124-140](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2023-3(45)-124-140)

Введение

Кафедра механического оборудования металлургических заводов и сформированная на ее основе научная школа в области тяжелого технологического оборудования возникла и сформировалась в Кузбассе в конце тридцатых – начале сороковых годов двадцатого века. Создание и функционирование кафедры как научного коллектива теснейшим образом были связаны с советским этапом развития отечественной металлургической промышленности. Возникла кафедра 21 октября 1938 года в Институте черной металлургии (в настоящее время Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ)).

Начальный состав кафедры был небольшим. В него вошли: доцент Н.М. Куницын, ассистент Евстифеев и ассистент А.В. Шатулина, а возглавил кафедру кандидат технических наук, доцент Э.Х. Шамовский (см. рисунок).

Предвоенный период

С первых дней своего существования кафедра была привлечена к решению важных научно-технических задач того времени. Стране в период ее развития нужен был качественный прокат, для получения которого крайне необходимо было освоить огневую зачистку исходных заготовок. Решить эту задачу можно было только путем разработки научных основ, позволяющих создать оборудование огневой зачистки металла.

И кафедра приступила к решению этой проблемы. Основным исполнителем этой работы был доцент Н.М. Куницын. Решение этой проблемы было поддержано другими кафедрами и спустя тридцать лет завершилось созданием теории функционирования широкополосных резаков для огневой зачистки проката [1 – 3] Таким образом была решена одна из первых поставленных перед кафедрой научных задач в области технологического оборудования металлургической промышленности.

Военный период

В начале 1941 – 1942 учебного года – первого, очень тяжелого учебного года Второй мировой войны, кафедру возглавил кандидат технических наук, доцент Е.А. Рохман. Он приехал в Новокузнецк из Днепропетровска и привез с собой научный опыт Украинской школы ученых в области тяжелого технологического оборудования.

Кафедра с первых дней войны включилась в процесс решения вызовов военного времени и работала совместно с кафедрой прокатного производства над задачами повышения качества прокатной продукции. Исследования были посвящены преимущественно технологическим вопросам процесса прокатки и успешно были выполнены под руководством профессора Т.М. Голубева [4 – 6].

Послевоенный период

В 1945 году Е.А. Рохман возвращается в свой родной Днепропетровский металлургический институт, а руководителем кафедры становится кандидат технических наук, доцент Л.Д. Соколов. Он, совместно с коллективом кафедры, продолжает интенсивно развивать тематику военного времени и к пятидесятому году XX века заканчивает основную часть своих изысканий. В 1951 году Л.Д. Соколов защищает докторскую диссертацию по проблемам пластической деформации металла [7, 8]. Полученный на кафедре за военные и послевоенные годы в области исследования функционирования прокатного оборудования материал обобщается группой сотрудников кафедры во главе с Л.Д. Соколовым в монографию, которая опубликована в 1964 году в издательстве «Металлургия» [9]. В последующий период своей научной деятельности Л.Д. Соколов сосредотачивает внимание кафедры на вопросах технической библиографии. В результате проделанной в этом направлении работы в 1956 году появляется трехтомный технический справочник, содержащий сведения по литературным источникам свыше 3000 наименований.

С 1953 года коллективом кафедры разрабатывается и активно реализуется единая научная программа, в формировании которой особенно активно участвуют кандидаты технических наук, доценты В.М. Гребеник и И.Н. Вексин. При реализации этой программы основное внимание было уделено оптимизации энергосиловых параметров металлургического оборудования. При этом учитывалось, что это оборудование работает в широком диапазоне температур, скоростей и динамических нагрузок. Для регистрации нагрузок в оборудовании как один из передовых методов оценки его энергосиловых параметров сотрудниками кафедры осваивается метод тензометрирования. Для этого на кафедре проводится большая подготовительная работа. Создается специальная измерительная аппаратура, проектируются и изготавливаются всевозможные устройства для регистрации нагрузок и крутящих моментов в оборудовании, изготавливаются специальные усилители сигналов, регистрирующие устройства и т.п. [10, 11]. Удачно проведенная подготовительная работа позволила кафедре начать широкомасштабные исследования энергосиловых параметров технологических агрегатов черной металлургии на всей территории Сибири, Урала и Дальнего Востока. Целью такой работы было получение отсутствующих в то время знаний о характере изменения энергосиловых параметров машин технологических агрегатов в процессе их эксплуатации. В том же 1953 году на кафедре открывается аспирантура, в которой начинают обучение пер-

вые два аспиранта: И.А. Жданов и С.А. Серегин. Таким образом, кафедра одновременно с научной деятельностью начинает готовить высшие научные кадры.

В 1954 году Л.Д. Соколов уезжает в длительную заграничную командировку, а заведующим кафедрой становится кандидат технических наук, доцент В.М. Гребеник. Научная работа кафедры сориентирована на разработку методов расчета механизмов и машин с определением действительного запаса прочности их элементов. Накопленный в предшествующий период экспериментальный материал позволил осознать проблему правильного определения коэффициентов, оценивающих изменение механических характеристик материалов в зависимости от условий эксплуатации технологического оборудования: коэффициентов изменения напряжений в местах их концентрации, вида деформации деталей машин, остаточных напряжений в материале и т.д. В этот набор коэффициентов вошли и коэффициенты, оценивающие точность расчетов, дисперсию характеристик прочности металла, ответственность деталей машин и характер их нагружения [12 – 14]. Выбор и расчет общего коэффициента при определении действительных запасов прочности вылился в большое научное направление, в рамках которого В.М. Гребеник подготовил, а затем защитил докторскую диссертацию. В дальнейшем это позволило заложить основы теории долговечности, а затем надежности технологического оборудования металлургической промышленности [15 – 17]. Это направление В.М. Гребеник успешно и плодотворно продолжил развивать и после его перехода в Днепропетровский металлургический институт.

Период стабильной работы кафедры

В 1960 году кафедру возглавил профессор В.Н. Широков – ученик И.П. Бардина, первостроитель Кузнецкого металлургического комбината. В.Н. Широков пришел на кафедру МОМЗ в 1955 году, будучи уже зрелым ученым. В 1960 году ВАКом страны ему было присвоено звание профессора.

Основные направления научной деятельности кафедры связаны были, главным образом, с оптимизацией энергосиловых параметров металлургического оборудования и определением действительных нагрузок в технологических машинах. Активно участвуют в этих работах и аспиранты кафедры. В этот период в результате изучения напряженного состояния и определения действительных напряжений станин прокатных станов защищает кандидатскую диссертацию Ю.Н. Леденев [18, 19]. Выполнив работу

по исследованию напряжений, возникающих при прессовании грубозернистых малопластичных масс, в 1963 году защищает кандидатскую диссертацию инженер Н.М. Савельев [20, 21]. В 1967 году, закончив работу по исследованию напряженного состояния станин прокатных станков при наличии горизонтальных усилий, защищает кандидатскую диссертацию инженер И.Л. Баклушин [22, 23]. К 1969 году закончил свою работу на тему «Исследование механизма кантования вагоноопрокидывателя башенного типа» и успешно защитил на эту тему кандидатскую диссертацию В.А. Шарапов [24, 25].

Во второй половине шестидесятых годов XX века кафедра возвращается к опробованной в 1943 году теме изучения процесса резания металла дисковыми пилами. Однако на этот раз исследования были смещены в область изучения процесса резания стали быстровращающимися пилами трения. Эта работа велась совместно с кафедрой сопротивления материалов, а инициатором работы выступил доцент С.А. Серегин. В рамках данного исследования выполнена широкая серия промышленных и лабораторных экспериментов. В результате получен богатейший экспериментальный материал, который затем был обобщен в ряде теоретических работ. На этом этапе исследований сотрудники кафедры подготовили и защитили три кандидатские и одну докторскую диссертации. В 1968 году кандидатскую диссертацию защитил доцент В.И. Люленков [26, 27], в 1970 году – аспирант Н.А. Огарков [28], в 1971 году – старший преподаватель Ю.А. Епифанцев [29, 30]. Несколько позже доцент С.А. Серегин защитил по данной тематике докторскую диссертацию.

В шестидесятые-семидесятые годы кафедра МОМЗ значительно расширяет и совершенствует свою научную и лабораторную базу. Сооружаются новые исследовательские установки, лаборатории оснащаются современными приборами, стендами и станками. Как и прежде продолжают работы, связанные с оптимизацией параметров металлургического оборудования и его привода. Сотрудники кафедры ведут активную научную работу, охватывающую сразу несколько типов технологического оборудования. Изучением энергетических параметров аглодомного оборудования занимается группа сотрудников, возглавляемая доцентом В.И. Люленковым. В эту группу входят доценты В.А. Шарапов, старший преподаватель П.Ф. Егоров и ряд других сотрудников кафедры. Параллельно ведутся работы по повышению надежности и эффективности использования оборудования обжимных и заготовочных станков. Этим научным направлением занимается старший преподаватель А.М. Кирносов, аспиранты А.Н. Саве-

льев, В.С. Горяшин, В.С. Чалков и другие сотрудники кафедры. Возглавляет это направление исследований на кафедре доцент В.А. Воскресенский. Еще одним научным направлением, связанным с исследованием оборудования сортовых станков, занимается группа сотрудников, возглавляемых доцентом И.Л. Баклушиным. В результате выполненных кафедрой исследований на Кузнецком металлургическом комбинате начинает работу реконструированный башенный вагоноопрокидыватель, параметры которого оптимизированы по разработкам кафедры [31, 32]. Совместно с «СибГипрометом» проводятся исследования и работы по созданию новых загрузочных устройств доменных печей [33, 34]. В результате исследований, выполненных на блюмингах 1300 Западно-Сибирского металлургического комбината (ЗСМК) и 1120 Орско-Халиловского металлургического комбината (ОХМК), начинают использоваться рациональные режимы прокатки с поджатием заднего конца полосы [41, 42]. Исследование загрузки агрегатов сортовых станков позволяет повысить надежность их элементов и обеспечить оптимальные маховые массы их приводов. Все выполненные на данном временном этапе исследования стали основой для написания кандидатских диссертаций. В 1972 году защищает диссертацию аспирант Г.Б. Трушевич [35, 36], в 1973 году – старший преподаватель А.М. Кирносов [37, 38], в 1974 году – аспирант В.Ф. Егоров [39, 40] и в 1975 году – аспиранты А.Н. Савельев [41, 42] и В.С. Горяшин.

В шестидесятые-семидесятые годы продолжают и исследования пил трения. Данное направление постепенно трансформируется в область изучения влияния высокоэнергетического воздействия вращающимся диском трения на поверхностные свойства материалов: фрикционно-упрочняющую обработку материалов (ФрУО). С 1969 года на кафедре под руководством доцента В.И. Люленкова начинаются работы по использованию быстровращающегося диска для упрочняющей обработки поверхностей деталей машин. Выяснилось, что химико-термические процессы насыщения поверхностных слоев металлов легирующими элементами, протекающие во время обработки металлов трением, позволяют получить поверхностные слои с высокой износостойкостью [43, 44]. По результатам этих работ в 1983 году старшим преподавателем И.И. Логуновым была защищена кандидатская диссертация.

Первый этап изменения структуры кафедры

В 1975 году из состава кафедры выделяется группа сотрудников и образуется родственная кафедра механического оборудования заводов цветной металлургии (МОЗЦМ). В силу этого

научная тематика кафедры несколько сужается. С этого момента кафедрой заведует кандидат технических наук, доцент Баклушин Иринарх Леонидович.

Научные работы концентрируются на разработке и внедрении в производство нового, прежде всего аглодоменного оборудования. Особенно активное участие на кафедре в этом процессе принимает доцент В.И. Люленков. В результате обширных экспериментальных лабораторных и промышленных исследований было спроектировано и изготовлено в цехах отдела главного механика ЗСМК новое, не имеющее аналогов загрузочное устройство доменных печей с лопастным распределением шихты [45, 46]. Этот агрегат был установлен на доменной печи № 2 ЗСМК и в процессе эксплуатации показал лучшую рудную на тот момент загрузку в печь. Основываясь на наработанном при исследовании загрузочного устройства материале, главный механик ЗСМК А.С. Шинкаренко защитил кандидатскую диссертацию [47, 48]. В это же время на ЗСМК успешно прошел испытания классификатор агломерата производительностью 100 т/час, предназначенный для образования «постели» на крупных агломерационных машинах [49]. Успешной экспериментальной прокаткой арматурных профилей с винтовыми ребрами на мелкосортном стане 250 завершается на кафедре разработка механизмов согласования углового положения прокатных валков. Ведется ряд поисковых тем.

С 1987 года заведующим кафедрой избирается кандидат технических наук, доцент Геннадий Борисович Трушевич. Наиболее интересной исследовательской работой этого периода является разработка способа соединения термоупрочненных стержней арматуры с любым профилем оребрения [50]. В этот же период продолжается разработка конструкции классификатора для сыпучих материалов высокой производительности [51]. Выполняется целый ряд других работ, связанных с совершенствованием конструктивных решений оборудования металлургической промышленности и повышения его надежности.

В середине восьмидесятых годов в промышленности появляются очередные проблемы, связанные с повсеместным ее переходом на непрерывные технологические процессы. Этот очередной шаг в развитии технологического процесса потребовал от специалистов в области тяжелого технологического оборудования новых усилий для решения возникших проблем. Одна из таких проблем заключалась в отсутствии у спроектированного по существующим на тот момент методам оборудования показателей работоспособности, необходимых при непрерыв-

ном режиме его эксплуатации. Сотрудники кафедры совместно с родственной кафедрой МОЗЦМ интенсивно начинают заниматься этой проблемой. В результате проведенных исследований зарождается и развивается теория формирования сложных технических и социально-технических систем, которая позволяет устанавливать рациональное сочетание эксплуатационных показателей комплекса непрерывно действующего оборудования для всего жизненного цикла его существования. Это дает возможность организовывать рациональный режим эксплуатации оборудования в течение всего его жизненного цикла. Первые публикации, связанные с разработкой этой теории, появились в печати в 1991 году [52, 53].

Второй этап реорганизации кафедры

В 1995 году проводится реорганизация кафедр и существовавшие с 1975 года параллельно кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии» и «Механическое оборудование заводов цветной металлургии» объединяются. С этого момента теория формирования сложных технических и социально-технических систем получает новый импульс в своем развитии. К 2000 году над разработкой методов применения этой теории на практике работает большой научный коллектив, возглавляемый профессором А.Н. Савельевым. В работе коллектива участвуют такие опытные научные работники, как доценты А.М. Кирносов и М.И. Ступаков, главный механик ЗСМК В.В. Гайдук и другие. Рядом с опытными сотрудниками работают над данной проблемой аспиранты М.В. Шаламай, Ю.Г. Тимошенко, Д.Ю. Бойко, М.Л. Босняк, старший преподаватель Т.А. Бич и др. В результате работы данного коллектива появилась серия методов формирования сложных объектов и инструментарий для их применения. Таким образом, было создано первое методическое обеспечение для проектирования и выработки эксплуатационных характеристик технологического оборудования, соответствующего по своей работоспособности современным непрерывным технологическим процессам [54 – 56]. Используя полученный в результате проведенных изысканий материал, аспирант Ю.Г. Тимошенко в 2007 году защитил кандидатскую диссертацию [57, 58].

В течение последнего десятилетия XX века на кафедре продолжает развиваться, но теперь уже не только в экспериментальном, но и в теоретическом плане научное направление, связанное с изучением и использованием механизма высокоэнергетического взаимодействия пар трения. Процесс исследования механизма высо-

коэнергетического взаимодействия контактируемых поверхностей в этот период перешел от этапа накопления экспериментального материала к его осмыслению. Первые теоретические представления о высокоэнергетическом взаимодействии поверхностей, позволившие выделить и обосновать новый эффект в зоне высокоэнергетического трения, были опубликованы в 1991 году [59, 60]. Дальнейшие исследования позволили выделить и обосновать особенности этого эффекта, который его автор, профессор А.Н. Савельев назвал эффектом циркуляционного трения. Открытие этого эффекта явилось новым закономерным этапом изучения высокоэнергетических процессов воздействия инструментом трения на обрабатываемый материал. Эффект циркуляционного трения позволил сформировать на кафедре новое научное направление, получившее название «Эффект циркуляционного трения и трибометаллургические технологии» [61, 62]. Трибометаллургические технологии оказались интересными тем, что они позволяют осуществлять одновременно тройное, механо-термо-химическое воздействие на обрабатываемый материал. Это дает возможность получать аморфизированные металлы и композиты сложного химического состава с уникальными механо-физико-химическими свойствами. Таким образом, традиционная область исследований кафедры, начавшаяся в далеком 1942 году с изучения пил резания, через изучение пил трения, изучение фрикционно-упрочняющей обработки материалов пришла к очень важному для современного машиностроения направлению: производству уникальных материалов и покрытий деталей машин.

С середины 1995 года кафедрой заведует профессор А.Н. Савельев. За эти годы на кафедре возобновила свою работу аспирантура и молодые аспиранты вновь получили возможность испытывать свои силы в самой тяжелой области человеческой деятельности – области производства новых знаний и умений. Кафедра продолжила развивать обозначенные ранее научные направления. Интенсивно продолжает развиваться теория формирования сложных технических и социально-технических систем [63 – 68]. Эта теория доведена до методического уровня и включена в блок специальных курсов, читаемых студентам-механикам и гидроприводчикам. Не менее интенсивно развивается научное направление «Циркуляционное трение и трибометаллургия». В рамках этого направления продолжается разработка новых композиционных материалов, прежде всего на основе меди, бронзы и стали [69 – 71]. К вышеотмеченным научным направлениям в этот период добавляются разра-

ботки по развитию теории работоспособности технологических агрегатов. Генетически эта теория связана с начатыми еще в 1954 году на кафедре исследованиями энергосиловых и прочностных характеристик оборудования, его рациональной загруженностью, надежностью и долговечностью. Теория работоспособности возникает и постепенно разрабатывается, начиная с 1991 года [72 – 74]. В течение первых лет XXI века она интенсивно дорабатывается и приобретает свою законченную форму. В 2008 году профессор А.Н. Савельев публикует на эту тему свою монографию [75].

Параллельно с тремя основными научными направлениями, разрабатываемыми на кафедре, продолжаются работы по совершенствованию энергосиловых характеристик технологического оборудования (профессор Г.Б. Трушевич, доцент В.Ф. Егоров). Продолжаются также работы по созданию нового технологического оборудования (профессор В.И. Люленков, доцент А.М. Кирносов, старший преподаватель Д.Ю. Бойко). При этом постоянно ведется интенсивная работа по внедрению полученных на кафедре научных результатов в учебный процесс. Так, группой сотрудников кафедры написана серия методических работ по оценке динамических процессов в тяжелом технологическом оборудовании, в которые включены результаты научных изысканий сотрудников кафедры [76 – 78]. Разработаны с учетом результатов выполненных на кафедре исследований методические пособия по технологическому оборудованию прокатных цехов [79, 80]. Начат выпуск ряда методических пособий по другим видам тяжелого технологического оборудования. К 2015 году кафедра в полной мере выполняет свои функции, производит новые знания и умения, подготавливает их для передачи в процессе обучения студентов и выпускает специалистов высшей квалификации. К этому времени кафедра изменила свое название и стала называться кафедрой машин и агрегатов технологического оборудования (МиАТО).

Третий этап преобразования структуры кафедры

С 2015 года кафедру возглавляет профессор Александр Григорьевич Никитин. В этот период в университете начинаются значительные структурные преобразования, связанные с объединением кафедр. К кафедре добавляются таких же значимые по уровню научной и методической работе кафедры, а именно: кафедра сопротивления материалов, деталей машин и основ конструирования, теоретической механики. Объединенная кафедра приобретает название «Кафедра механики и машиностроения» и стремится

ся выработать рациональные в новых условиях направления и режимы своей научной деятельности. К научным направлениям, разрабатываемым ранее на кафедре МиАТО, добавилось направление «Исследование энергосиловых параметров технологических машин и оборудования», возглавляемое профессором А.Г. Никитиным, и научное направление профессора Л.Т. Дворникова «Теория структуры механических систем и практика ее использования при синтезе сложных машин, включая горные». Леонид Трофимович Дворников как руководитель данного направления являлся известным, активно работающим в своей области ученым. Им было разработано более 400 изобретений, написано более 600 научных статей, издано 10 монографий. В рамках данного направления было подготовлено к защите 10 докторов технических наук, 50 кандидатов наук [81].

В новых условиях кафедра проводит изучение энергосиловых параметров дробильного оборудования под руководством А.Г. Никитина, а также исследования в области структуры механизмов и машин под руководством Л.Т. Дворникова [82, 83]. В этот период предлагаются и изучаются новые конструктивные решения дробилок крупного и среднего дробления [84, 85]. Нарботанный научный материал позволяет подготовить и защитить кандидатские диссертации аспирантам А.В. Вишугину и К.В. Тагильцев-Галете.

С сентября 2017 года к руководству кафедрой приступает профессор Эдуард Яковлевич Живаго.

В этот период продолжает активно работать профессор А.Г. Никитин. Исследование дробилок крупного дробления с эластичными опорами позволяет выделить это направление как перспективное с точки зрения рациональной эксплуатации дробилок крупного дробления [86, 87]. Развивается научное направление, возглавляемое доцентом Л.Н. Гудимовой [88]. Проводит ряд исследований доцент С.А. Ку克林 [89]. Продолжает свою работу научное подразделение, связанное с теорией и практикой формирования сложных технических и социально-технических систем [90, 91]. Однако кафедра все еще находится в стадии своей реорганизации. С июня 2018 года кафедру возглавляет доцент И.А. Жуков. К наработанной к этому времени научной тематике добавляется направление по изучению волновых процессов в машинах ударного действия [92, 93].

В 2020 году И.А. Жуков уезжает из Новокузнецка и с июня 2020 года кафедру возглавляет доцент А.В. Макаров. Численный состав кафедры к этому времени несколько уменьшился. К традиционным направлениям, развиваемым кафедрой [94 – 98], добавились интересные научные работы, написанные С.А. Куклиным [99,

100], И.С. Баклушиной [101, 102], Н.О. Адамович [103], М.Г. Попугаевым [104, 105] и рядом других сотрудников кафедры.

С 2023 года кафедрой руководит профессор С.В. Коновалов. На кафедре появляется новая научная тематика. Часть сотрудников кафедры начинает работы в области разработки методов сварки специальных сталей. Продолжаются работы в области теории механизмов и машин и в области технологического оборудования.

Заключение

Накопленный опыт выработки научной продукции и постоянное воспроизводство научных кадров позволяют кафедре как научной школе планировать на ближайшие годы виды работ по решению актуальных научных задач, связанных с технологическим оборудованием, и готовить для этой сферы научной деятельности научных сотрудников. Все это позволяет рассчитывать на то, что научная школа, которая зародилась в далекие тридцатые годы XX века, неуклонно развивалась и, сформировавшись, заняла достойное место в научном сообществе нашей страны и успешно продолжает свою деятельность. Задачи, решаемые кафедрой как научной школой в последние десятилетия, могут быть обозначены как задачи теории и практики, нацеленные на формирование сложных технических и социально-технических систем требуемой работоспособности. В этом направлении подчеркнuto, что технические и производственные комплексы изучаются сотрудниками кафедры как сложные, взаимосвязанные, работающие синхронно энергетические системы. И одновременно сотрудники кафедры нацелены на выработку знаний, которые позволяют в итоге формировать производственные комплексы, обладающие рациональной компоновкой и требуемой в настоящее время работоспособностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

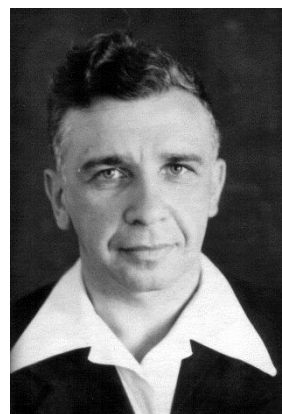
1. Куницын Н.М., Шамовский Э.Х., Яковлев И.М., Сороко Л.Н. Проектирование широкозахватного резака для огневой зачистки металла // Известия вузов. Черная металлургия. 1958. № 3. С. 154–160.
2. Шамовский Э.Х., Яковлев И.М., Кафтanova З.К. Удаление заплесков при огневой зачистке металла // Известия вузов. Черная металлургия. 1958. № 4. С. 117–126.
3. Шамовский Н.М., Яковлев И.М. Широкополосный коксо-кислородный резак для машинной огневой зачистки холодного углеродистого металла // Известия вузов. Черная металлургия. 1961. № 10. С. 165–169.



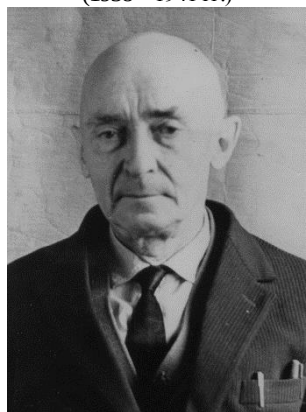
к.т.н., доцент Э.Х. Шамовский
(1938 – 1941 гг.)



д.т.н., профессор Л.Д. Соколов
(1945 – 1954 г.)



д.т.н., профессор В.М. Гребеник
(1954 – 1960 гг.)



д.т.н., профессор В.Н. Широков
(1960 – 1975 гг.)



к.т.н., профессор И.Л. Баклушин
(1975 – 1987 гг.)



к.т.н., профессор Г.Б. Трушевич
(1987 – 1995 гг.)



к.т.н., доцент А.Н. Савельев
(1995 – 2015 гг.)



д.т.н., профессор А.Г. Никитин
(2015 – 2017 гг.)



д.т.н., профессор Э.Я. Живаго
(2017 – 2018 гг.)



д.т.н., доцент И.А. Жуков (2018 – 2020 гг.)



к.т.н. А.В. Макаров (2020 – 2023 гг.)



д.т.н., профессор С.В. Коновалов (с 2023 г.)

Заведующие кафедрой Сибирского государственного индустриального университета
Heads of the Department of the Siberian State Industrial University

4. Голубев Т.М., Соколов Л.Д. Удельные давления при прокатке крупных фасонных профилей // Бюллетень ЦНИИ информации и технико-экономических исследований черной металлургии (Минчермет СССР). 1946. № 6(50). С. 25–26.
5. Голубев Т.М., Соколов Л.Д. Исследование удельных давлений хромистой и медистой стали // Сталь. 1950. № 9. С. 818–820.
6. Голубев Т.М., Соколов Л.Д., и др. Энергетические показатели прокатки на рельсобалочном стане // Сталь. 1952. № 5.
7. Соколов Л.Д. К вопросу об определении удельных давлений при прокатке в фасонных калибрах // Известия вузов. Черная металлургия. 1958. № 6. С. 109–116.
8. Соколов Л.Д. О критерии напряженного состояния диаграммы механической деформации // Доклады АН СССР. Новая серия. 1952. Т. 87. № 6. С. 905–908.
9. Соколов Л.Д., Гребеник П.М., Тылкин М.А. Исследование прокатного оборудования. Москва: Металлургия, 1964. 487с.
10. Вексин И.Н., Гребенник В.М., Соколов Л.Д., Широков В.Н. Исследование несущей способности листового стана 425 холодной прокатки // Известия вузов. Черная металлургия. 1958. № 1. С. 160–178.
11. Баклушин И.Л., Вексин И.Н., Гребенник В.М., Люленков В.И., Сабанцев В.П., Соколов Л.Д., Широков В.Н. Аппаратура для работы с проволочными датчиками сопротивления // Известия вузов. Черная металлургия. 1958. № 6. С. 149–154.
12. Гребенник В. М. О методах учета различных факторов при расчетах на прочность // Известия вузов. Черная металлургия. 1958. № 7. С. 168–175.
13. Гребеник В.М. К вопросу определения запаса прочности // Известия вузов. Черная металлургия. 1959. № 3. С. 137–142.
14. Гребеник В.М. Расчет на долговечность деталей при нестационарных переменных нагрузках // Известия вузов. Черная металлургия. 1959. № 10. С. 147–160.
15. Гребеник В.М. О системах коэффициентов, применяемых при расчетах на прочность // Известия вузов. Машиностроение. 1962. № 12.
16. Гребеник В.М. Усталостная прочность и долговечность металлургического оборудования. Москва: Машиностроение, 1969. 256 с.
17. Гребеник В.М., Тылкин М.А., Кучеренко В.Ф., Черневич Е.М. Анализ поломок деталей металлургического оборудования // Известия вузов. Черная металлургия. 1962. № 8. С. 175–182.
18. Леденев Ю.Н. К расчету станин закрытого типа прокатных станов // Известия вузов. Черная металлургия. 1958. № 10. С. 169–179.
19. Леденев Ю.Н. К расчету плоских станин прокатных станов методом сеток // Известия вузов. Черная металлургия. 1958. № 11. С. 125–134.
20. Савельев Н.М. Исследование напряжений прессования // Огнеупоры. 1962. № 8. С. 355–362.
21. Савельев Н.М. Огнеупоры из малопластичных грубозернистых масс // Кузбасс индустриальный. 1962. № 4.
22. Баклушин И.Л., Вексин И.Н., Люленков В.И., Сабанцев В.П., Соболев А.П., Соколов Л.Д., Широков В.Н. Анализ прочностных резервов станины блюминга «1100» Кузнецкого металлургического комбината // Известия вузов. Черная металлургия. 1964. № 2. С. 205–212.
23. Баклушин И.Л., Вексин И.Н., Гребеник В.Н., Люленков В.И., Сабанцев В.П., Соколов Л.Д., Широков В.Н. Исследование стана 740 холодной прокатки листа // Известия вузов. Черная металлургия. 1959. № 8. С. 143–148.
24. Шарاپов В.А., Люленков В.И. К вопросу об оптимальном весе контргрузов механизма кантования вагоноопрокидывателя башенного типа // Известия вузов. Черная металлургия. 1968. № 12. С. 195–199.
25. Шарاپов В.А., Люленков В.И. Исследование механизма кантования вагоноопрокидывателя башенного типа // Известия вузов. Черная металлургия. 1969. № 10. С. 179–182.
26. А.с. 270667 СССР. Способ зачистки поверхности металлов и сплавов / Люленков В.И., Серегин С.А.; заявл. 15.07.1968; опубл. 12.05.1970. Бюл. № 17.
27. Огарков Н.Н., Серегин С.А., Люленков В.И., Широков В.Н. Распределение температуры на контакте при резании ст3 дисками трения // Известия вузов. Черная металлургия. 1970. № 8. С. 175–177.
28. Огарко Н.Н., Серегин С.А., Люленков В.И., Широков В.Н. К исследованию сил трения // Известия вузов. Черная металлургия. 1970. № 6. С. 177–180.
29. Епифанцев Ю.А., Серегин С.А., Вершинина Л.В. Упрочнение поверхности металла при обработке быстровращающимся диском // Известия вузов. Черная металлургия. 1970. № 6. С. 167–169.

30. Серегин С.А., Епифанцев Ю.А. Повышение износостойкости металлов высокоскоростным трением // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1974. № 11. С. 61–63.
31. Шарапов В.А., Люленков В.И. К вопросу об оптимальном весе контргрузов механизма кантования вагоноопрокидывателя башенного типа // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1968. № 12. С. 195–200.
32. Шарапов В.А., Люленков В.И. Исследование механизма кантования вагоноопрокидывателя башенного типа // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1969. № 10. С. 179–183.
33. Люленков В.И., Шарапов В.А., Левин В.С., Бардышев В.Г. Исследование загрузочных устройств доменных печей // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1977. № 6. С. 174–177.
34. Левин В.С., Бардышев В.Г., Люленков В.И., Шарапов В.А., Епифанцев Ю.А., Трушевич Г.Б., Хамицев Ш.В. Загрузочное устройство клапанного типа с вращающейся вставкой и конусом изменяемого диаметра // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1976. № 6. С. 175–177.
35. Трушевич Г.Б., Баклушин И.Л., Широков В.Н. К определению оптимальных контргруза системы рычажного уравнивания // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1971. № 10. С. 169–170.
36. Трушевич Г.Б., Баклушин И.Л., Широков В.Н. Определение оптимальных значений плеча и веса контргруза систем рычажного уравнивания. В кн.: *Исследование и расчет металлургического оборудования. Часть 2.. Новокузнецк*, 1971. С. 11–18.
37. Воскресенский В.А., Кирносов А.М., Мизин Ю.Г., Коломников Г.Ф., Новиков В.М., Чичигин В.А., Лехов О.С. Экспериментальное исследование нажимного механизма блюминга 1300 ЗСМК // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1972. № 4. С. 175–178.
38. Воскресенский В.А., Кирносов А.М. Поджатие раската нажимным механизмом // *Исследование и расчет металлургического оборудования*. 1971. № 2. С. 275.
39. Егоров В.Ф., Люленков В.И., Широков В.Н., Паунов А.М. К вопросу выбора нагрузочной диаграммы двигателя механизмов повторно-кратковременного режима работы // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1973. № 6. С. 166–170.
40. Егоров В.Ф., Люленков В.И., Широков В.Н., Паунов А.М. Усреднение нагрузок привода пресс-ножниц. Сообщение 3 // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1973. № 8. С. 179–182.
41. Савельев А.Н., Воскресенский В.А. Динамика в главной линии при захвате клиновидного слитка // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1975. № 10. С. 92–95.
42. Савельев А.Н., Воскресенский В.А., Перетягко В.Н. Исследование процесса захвата металла валками. В кн: *Сборник трудов кафедры «Машины и технология обработки металла давлением»*. Омск: Омский политехнический институт, 1975. С. 152–157.
43. А.с. 1230807 СССР. Способ поверхностного упрочнения деталей и устройство для его реализации / Люленков В.И., Логунов И.И., Чалков В.С., Егоров В.Ф., Трушевич Г.Б.; заявл. 23.12.1983; опубл. 15.05.1986. Бюл. № 18.
44. А.с. 1397790 СССР. Трубчатый образец для механических испытаний / Чалков В.С., Люленков В.И., Логунов И.И., Савельев А.Н.; заявл. 05.05.1986; опубл. 23.05.1988. Бюл. № 19.
45. А.с. 806768 СССР. Загрузочное устройство доменной печи / Люленков В.И., Шарапов В.А., Шинкаренко А.С.; заявл. 09.02.1977; опубл. 23.02.1981. Бюл. № 7.
46. А.с. 887861 СССР. Газоуплотнительный клапан засыпного аппарата доменной печи / Шинкаренко А.С., Игонин И.Г., Люленков В.И.; заявл. 04.04.1980; опубл. 07.12.1981. Бюл. № 45.
47. Люленков В.И., Шарапов В.А., Шинкаренко А.С. Исследование загрузочного устройства доменной печи с неподвижной распределительной воронкой // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1977. № 12. С. 174–176.
48. Люленков В.И. Усовершенствование загрузочных устройств доменных печей. В кн.: *Материалы VI научно-практ. конференции по проблемам машиностроения, металлургии и горных машин / Под ред. Л.Т. Дворникова. Новокузнецк: СибГТМА, 1997. С. 65, 66*
49. А.с. 1238811 СССР. Установка для разделения сыпучих материалов / Люленков В.И., Тырышкин Ю.П., Матехин Н.А., Шинкаренко А.С.; заявл. 22.06.1984; опубл. 23.06.1986. Бюл. № 23.
50. А.с. 1827314 СССР. Способ получения внутренней резьбы на полый металлической заготовке / Береснев С.И., Люленков В.И., Шинкаренко А.С., Абрамин Г.В.; заявл. 17.06.1991; опубл. 15.07.1993. Бюл. № 26.
51. А.с. 1837999 РФ. Установка для разделения сыпучих материалов / Тырышкин Ю.П., Люленков В.И., Шинкаренко А.С., Шарига

- А.Д., Лебедев С.Н., Купцов В.И., Кретинин В.И.; заявл. 08.01.1991; опубл. 30.08.1993. Бюл. № 32.
52. Савельев А.Н. Проектирование гомеостазных прокатных комплексов // Известия вузов. Черная металлургия. 1991. № 12. С. 78–82.
 53. Савельев А.Н., Гайдук В.В. Совершенствование информационного обеспечения в системе обслуживания технологического оборудования // Сталь. 1994. № 6. С. 82–85.
 54. Савельев А.Н. О методологических основах проектирования надежного технологического оборудования // Известия вузов. Черная металлургия. 1998. № 6. С. 22–26.
 55. Савельев А.Н., Босняк М.Л. Особенности формирования работоспособных прокатных комплексов для выпуска заготовок // Известия вузов. Черная металлургия. 2005. № 2. С. 59–65.
 56. Савельев А.Н. Структурные особенности устойчиво функционирующей сложной технической системы // Известия вузов. Черная металлургия. 1996. № 12. С. 53–58.
 57. Савельев А.Н., Тимошенков Ю.Г., Бич Т.А. Оценка показателей безотказности и ремонтпригодности агрегатов устойчиво работающей технологической линии МНЛЗ // Известия вузов. Черная металлургия. 2006. № 6. С. 57–60.
 58. Савельев А.Н., Тимошенков Ю.Г., Бич Т.А. Моделирование распределение элементов по надежности в машинах непрерывного литья заготовок // Известия вузов. Черная металлургия. 2006. № 8. С. 46–49.
 59. Савельев А.Н. Особенности механизма трения при скоростном воздействии гладким диском на металл. В кн.: Повышение эксплуатационной надежности деталей и технологического инструмента. Сборник научных трудов МИСИС. Москва: Металлургия, 1991. С. 92–96.
 60. Савельев А.Н. Особенности механизма циркуляционного трения твердых тел // Известия вузов. Черная металлургия. 1991. № 4. С. 101–103.
 61. Савельев А.Н., Савельева Н.А. Основы технологических процессов получения амортизированных лент на основе эффекта циркуляционного трения. В кн.: Материалы седьмой научно-практической конференции по проблемам машиностроения, металлургических и горных машин. Новокузнецк, 1998. С. 95–99.
 62. Пат. № 2224801 РФ. Способ получения лент с аморфной структурой / Савельев А.Н., Савельева Н.А.; заявл. 19.10.1999; опубл. 27.02.2004.
 63. Савельев А.Н. Математическое описание внутренних процессов формирования сложной технической системы // Известия вузов. Черная металлургия. 1997. № 8. С. 52–56.
 64. Савельев А.Н. Особенности формирования работоспособных технических чичтем // Известия вузов. Черная металлургия. 1998. № 8. С. 69–75.
 65. Савельев А.Н., Тимошенков Ю.Г., Бич Т.А. Идентификация модели распределения элементов в сложной технической системе // Известия вузов. Черная металлургия. 2004. № 6. С. 64–67.
 66. Saveliev A.N., Bosnyak M.L. Effective rolling systems for dillet production // Steel in translation. 2005. Vol. 35. No. 2. P. 40–46.
 67. Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Моисеев Л.Л. Оценка эффективности линейной системы пневмоснабжения // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 2. С. 58–61.
 68. Савельев А.Н., Тимошенков Ю.Г. Способ формирования временных параметров функционирования элементов МНЛЗ. В кн.: Материалы шестнадцатой научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения. Новокузнецк, 2006. С. 107–110.
 69. Савельев А.Н., Осколкова Т.Н., Савельева Н.А. Оценка фазового состава и характера изменения параметров решетки фаз амортизированного слоя бронзы АЖ9-4. В кн.: Материалы десятой научно-практической конференции по проблемам машиностроения и горных машин. Новокузнецк, 2000. С. 168–178.
 70. Савельев А.Н., Локтева Н.А., Бич Т.А. Математическая модель динамических процессов в установке циркуляционного трения. В кн.: Материалы одиннадцатой научно-практической конференции по проблемам машиностроения и горных машин. Новокузнецк, 2001. С. 159–163.
 71. Локтева Н.А., Савельев А.Н. О характеристиках колебательного процесса в зоне взаимодействия инструмента с материалом при циркуляционном трении // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 8. С. 48–52.
 72. Савельев А.Н. Работоспособность оборудования как комплексный критерий // Известия вузов. Черная металлургия. 1991. № 6. С. 102–104.
 73. Савельев А.Н. Использование критерия работоспособности деталей в расчетах на долговечность // Известия вузов. Черная металлургия. 1991. № 10. С. 84–86.

74. Савельев А.Н., Громов В.Е. Влияние частоты нагружения на характер распределения движений в материалах // Известия вузов. Черная металлургия. 1999. № 6. С. 62–66.
75. Савельев А.Н. Теория работоспособности технологических машин. Кемерово: Кузбассвуиздат, 2008. 225 с.
76. Дворников Л.Т., Локтева Н.А., Савельев А.Н. Механизм взаимодействия контактирующих поверхностей при различных процессах трения. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2006. 74 с.
77. Савельев А.Н., Ступаков М.И., Савельев Н.В. Динамика тяжело нагруженных технологических машин. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2000. 190 с.
78. Савельев А.Н. Основы теории формирования технологических линий и комплексов, как сложных технических систем. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2018. 70 с.
79. Фастыковский А.Р., Савельев А.Н. Конструкции и расчеты оборудования прокатных клетей сортовых и листовых станов. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2008. 316 с.
80. Фастыковский А.Р., Савельев А.Н. Особенности конструирования и безаварийной работы валковой арматуры сортовых станов. Москва: Теплотехник, 2015. 170 с.
81. Жуков И.А. Жизнь, посвященная науке // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314. № 2. С. 159–163.
82. Пат. 2622731 РФ. Самоустанавливающаяся пятисателлитная планетарная передача / Дворников Л.Т., Герасимов С.П.; заявл. 24.12.2015; опубл. 19.06.2017. Бюл. № 17.
83. Дворников Л.Т. О принципиальных некорректностях в исследованиях проф. Пожбелко В.И. по структуре механизмов // Теория механизмов и машин. 2016. Т. 14. № 3(31). С. 145–165.
84. Никитин А.Г., Абрамов А.В., Гредина А.А., Горяшин В.В. Анализ работы шарнира кривошип-коренная опора кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 12. С. 875–878.
85. Никитин А.Г., Лактионов С.А., Медведева К.С. Определение мощности привода одновалковой дробилки // Вестник машиностроения. 2016. № 1. С. 85–86.
86. Никитин А.Г., Абрамов А.В. Повышение надежности работы щековых дробилок применением упругих пневматических элементов в сочленениях кинематических пар. В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XX Международной научно-технической конференции Ч. 2. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017. С. 439–442.
87. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Medvedeva K.S. Diagnosis of the rock crushing model to increase the efficiency of one – roll crusher operation // IOP Conference Series: Earth and Environment Science. 2017. Vol. 84. P. 1–5
88. Пат. 182350 РФ. Плоский кривошипно-ползунный механизм / Дворников Л.Т., Гудимова Л.Н., Береснев Д.А.; заявл. 05.04.2018; опубл. 15.08.2018. Бюл. № 23.
89. Куклин С.А. Аналитический расчет углов контакта в подшипниках качения // Журнал передовых исследований в области естествознания. 2017. № 2. С. 11–28.
90. Savelev A.N., Kozlov S.V., Vinokurov N.E. Dynamic loads influencing on elements of multi-motor hydraulic drive of ccm cooler // Steel in Translation. 2018. Vol. 61. No. 2. P. 149–155.
91. Савельев А.Н., Козлов С.В., Живаго Э.Я., Прохоренко О.Д. Формирование математической модели продольных колебаний, возникающих в многодвигательном гидроприводе холодильников МНЛЗ // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2018. № 2 (24). С. 58–64.
92. Bychkov I.V., Zhukov I.A., Dvornikov L.T. Kinematics of Metallurgical Cutters with Parallel Blades // Steel in Translation. 2019. Vol. 49. No. 4. P. 238–244.
93. Жуков И.А., Тимофеев Е.Г. Математическое и компьютерное моделирование ударных процессов в стержневой системе машин ударного действия // Современные наукоемкие технологии. 2020. Т. 1. № 12. С. 43–49.
94. Гудимова Л.Н., Дворников Л.Т., Макаров А.В., Живаго Э.Я. Создание структурной схемы щековой дробилки нового поколения без избыточных связей // РАЕ. Современные наукоемкие технологии. 2021. № 4. С. 30–36.
95. Гудимова Л.Н., Макаров А.В., Баклушина И.С. К вопросу о создании самоустанавливающихся механизмов в металлургическом производстве // РАЕ. Современные наукоемкие технологии (Ч. 1). 2022. № 5. С. 83–87.
96. Савельев А.Н., Анисимов Д.О., Карташов Р.Н. Определение динамической составляющей напряжения в материале при реализации метода синергетически организованной эмиссии волн напряжений. В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XXII Международной научно-практической конференции. Часть 2. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021. С. 266–272.

97. Савельев А.Н., Макаров А.В., Анисимов Д.О. Оценка динамической составляющей напряжения в материале при мелкоступенчатом нагружении образца на растяжение // ТГиСМ. 2022. № 16. С. 9–17.
98. Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С. Математическая модель определения числа упоров на валке одновалковой дробильной машины // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 12. С. 909–911.
99. Куклин С.А., Адамович Н.О. Использование программного комплекса "Geogebra" при исследовании механизмов // Современные проблемы теории машин. 2020. № 10. С. 13–17.
100. Куклин С.А., Адамович Н.О., Камко К.Д. Внесение изменений в схему восьмизвенного кривошипного пресса двойного действия // Наука, техника и образование. 2022. № 5 (88). С. 51–56.
101. Пат. 2780448 РФ. Десятистержневая строительная арка / Баклушина И.С., Дворников Л.Т., Устименко А.Е.; заявл. 21.02.2022; опубл. 23.09.2022. Бюл. № 11.
102. Гудимова Л.Н., Баклушина И.С., Макаров А.В. К вопросу о создании самоустанавливающихся механизмов в металлургическом производстве // Современные наукоемкие технологии. Ч. 1. 2022. № 5. С. 85–88.
103. Адамович Н.О., Куклин С.А., Купцов Н.В. К вопросу о кинематическом исследовании секции механизированной крепи // Наукосфера. 2021. № 4-1. С. 132–137.
104. Корнеев В.А., Корнеев П.А., Попугаев М.Г., Гусев М.М., Бедарев С.А. Определение прочностных свойств горных пород в шпурах // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2020. № 4 (34). С. 29–31.
105. Пат. 197270 РФ. Восьмистержневая арка / Дворников Л.Т., Попугаев М.Г.; заявл. 09.01. 2020; опубл. 16.04.2020. Бюл. № 27.
4. Sokolov L.D. Specific pressures when rolling large shaped profiles. *Byulleten' TsNII informatsii i tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniy chernoi metallurgii*. Минчермет СССР. 1946, no. 6(50), pp. 25–26. (In Russ.).
5. Golubev T.M., Sokolov L.D. Investigation of specific pressures of chromium and copper steel. *Stal'*. 1950, no. 9, pp. 818–820. (In Russ.).
6. Golubev T.M., Sokolov L.D., etc. Energy indicators of rolling on a rail-block mill. *Stal'*. 1950, no. 5. (In Russ.).
7. Sokolov L.D. On the issue of determining specific pressures during rolling in shaped calibers. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1958, no. 6, pp. 109–116. (In Russ.).
8. Sokolov L.D. On the stress state criteria of the mechanical deformation diagram. *Doklady AN SSSR. Novaya seriya*. 1952, vol.87, no. 6, pp. 905–908. (In Russ.).
9. Sokolov L.D., Grebenik P.M., Tylkin M.A. *Research of rolling equipment*. Moscow: Metallurgiya, 1964, 487 p. (In Russ.).
10. Veksin I.N., Grebennik V.M., Sokolov L.D., Shirokov V.N. Investigation of the bearing capacity of the cold rolling sheet mill 425. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1958, no. 1, pp. 160–178. (In Russ.).
11. Baklushin I.L., Veksin I.N., Grebennik V.M., Lyulenkov V.I., Sabantsev V.P., Sokolov L.D., Shirokov V.N. Equipment for working with wire resistance sensors. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1958, no. 6, pp. 149–154. (In Russ.).
12. Grebennik V.M. On the methods of accounting for various factors in strength calculations. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1958, no. 7, pp. 168–175. (In Russ.).
13. Grebennik V.M. On the issue of determining the margin of safety. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1959, no. 3, pp. 137–142. (In Russ.).
14. Grebennik V.M. Calculation of the durability of parts under non – stationary variable loads. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1959, no. 10, pp. 147–160. (In Russ.).
15. Grebennik V.M. On the systems of coefficients used in strength calculations. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1962, no. 12. (In Russ.).
16. Grebennik V.M. Fatigue strength and durability of metallurgical equipment. Moscow: Mashinostroenie, 1969, 256 p. (In Russ.).
17. Grebennik V.M., Tylkin M.A., Kucherenko V.F., Chernevich E.M. Analysis of breakdowns of metallurgical equipment parts. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1962, no. 8, pp. 175–182. (In Russ.).

REFERENCES

1. Kunitsin N.M., Shamovskii E.Kh., Yakovlev I.M., Soroko L.N. Design of a wide-reach cutter for fire stripping of metal. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1958, no. 3, pp. 154–160. (In Russ.).
2. Shamovskii E.Kh., Yakovlev I.M., Kaftanova Z.K. Removal of splashes during fire stripping of metal. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1958, no. 4, pp. 117–126. (In Russ.).
3. Shamovskii N.M., Yakovlev I.M. Broadband coke-oxygen cutter for machine fire stripping of cold carbon metal. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1961, no. 10, pp. 165–169. (In Russ.).

18. Ledenev Yu.N. To the calculation of closed-type rolling mills. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1958, no. 10, pp. 169–179. (In Russ.).
19. Ledenev Yu.N. To the calculation of flat mills of rolling mills by the method of grids. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1958, no. 11, pp. 125–134. (In Russ.).
20. Savel'ev N.M. Investigation of pressing stresses. *Ogneupory*. 1962, no. 8. (In Russ.).
21. Savel'ev N.M. Refractories from low-plastic coarse-grained masses. 1962, no. 4. (In Russ.).
22. Baklushin I.L., Veksin I.N., Lyulenkov V.I., Sabantsev V.P., Sobolev A.P., Sokolov L.D., Shirokov V.N. Analysis of the strength reserves of the bluming bed "1100" KMK. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1964, no. 2, pp. 205–212. (In Russ.).
23. Baklushin I.L., Veksin I.N., Grebenik V.N., Lyulenkov V.I., Sabantsev V.P., Sokolov L.D., Shirokov V.N. Investigation of the cold rolling mill 740 sheet. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1959, no. 8, pp. 143–148. (In Russ.).
24. Sharapov V.A., Lyulenkov V.I. On the question of the optimal weight of counterloads of the tilting mechanism of the tower-type car dumper. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1968, no. 12, pp. 195–199. (In Russ.).
25. Sharapov V.A., Lyulenkov V.I. Investigation of the mechanism of tilting of a tower-type car dumper. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1969, no. 10, pp. 179–182. (In Russ.).
26. Lyulenkov V.I., Seregin S.A. *Method of surface cleaning of metals and alloys*. Certificate of authorship USSR no. 270667 USSR. *Byulleten' izobretenii*. 1970, no. 17. (In Russ.).
27. Ogarkov N.N., Seregin S.A., Lyulenkov V.I., Shirokov V.N. Temperature distribution at the contact when cutting st 3 friction discs. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1970, no. 8, pp. 175–177. (In Russ.).
28. Ogarkov N.N., Seregin S.A., Lyulenkov V.I., Shirokov V.N. To the study of friction saws. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1970, no. 6, pp. 177–180. (In Russ.).
29. Seregin S.A., Vershinina L.V., Epifantsev Yu.V. Hardening of the metal surface during processing with a fast-rotating disk. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1970, no. 6, pp. 167–169. (In Russ.).
30. Seregin S.A., Epifantsev Yu.A. Increased wear resistance by high-speed friction. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 1974, no. 11, pp. 61–63. (In Russ.).
31. Sharapov V.A., Lyulenkov V.I. On the question of the optimal weight of counterloads of the tilting mechanism of the tower-type car dumper. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1968, no. 12. (In Russ.).
32. Sharapov V.A., Lyulenkov V.I. Investigation of the mechanism of tilting of a tower-type car dumper. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1969, no. 10, pp. 179–183. (In Russ.).
33. Lyulenkov V.I., Sharapov V.A., Levin V.S., Bardyshev V.G. Investigation of blast furnace loading devices. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1977, no. 6, pp. 174–177. (In Russ.).
34. Levin V.S., Bardyshev V.G., Lyulenkov V.I., Sharapov V.A., Epifantsev Yu.A., Trushevich G.B., Khamitsev Sh.V. Valve-type loading device with a rotating insert and a cone of variable diameter. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1976, no. 6, pp. 175–177. (In Russ.).
35. Trushevich G.B., Baklushin I.L., Shirokov V.N. To determine the optimal counterloads of the lever balancing system. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1971, no. 10, pp. 169–170. (In Russ.).
36. Trushevich G.B., Baklushin I.L., Shirokov V.N. Determination of optimal values of the shoulder and counterweight of lever balancing systems. *Issledovanie i raschet metallurgicheskogo oborudovaniya*. Part 2. Novokuznetsk, 1971, pp. 11–18. (In Russ.).
37. Voskresenskii V.A., Kirnosov A.M., Mizin Yu.G., Kolomnikov G.F., Novikov V.M., Chichigin V.A., Lekhov O.S. Experimental study of the pressure mechanism of the bluming 1300 ZSMK. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1972, no. 4, pp. 175–178. (In Russ.).
38. Voskresenskii V.A., Kirnosov A.M. Preloading of the roll with a push mechanism. *Issledovanie i raschet metallurgicheskogo oborudovaniya*. 1971, no. 2, pp. 275. (In Russ.).
39. Egorov V.F., Lyulenkov V.I., Shirokov V.N., Paunov A.M. To the question of choosing the load diagram of the engine of mechanisms of repeated-short-term operation. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1973, no. 6, pp. 166–170. (In Russ.).
40. Egorov V.F., Lyulenkov V.I., Shirokov V.N., Paunov A.M. Averaging of the shear press drive loads. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1973, no. 8, pp. 179–182. (In Russ.).
41. Savel'ev A.N., Voskresenskii V.A. Dynamics in the main line when capturing a wedge-shaped ingot. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1975, no. 10, pp. 92–95. (In Russ.).
42. Savel'ev A.N., Voskresenskii V.A., Peretyat'ko V.N. Investigation of the process of metal capture by rolls. In: *Collection of works of the department "Machines and technology of metal processing by pressure"*. Omsk Polytechnic Institute. Omsk, 1975, pp. 152–161. (In Russ.).
43. Lyulenkov V.I., Logunov I.I., Chalkov V.S., Egorov V.F., Trushevich G.B. *A method of surface hardening of parts and a device for its im-*

- plementation. Certificate of authorship USSR no. 1230807. 1986, no. 18. (In Russ.).
44. Chalkov V.S., Lyulenkov V.I., Logunov I.I., Savel'ev A.N. *Tubular sample for mechanical testing*. Certificate of authorship USSR no. 1397790. 1988, no. 19. (In Russ.).
 45. Lyulenkov V.I., Sharapov V.A., Shinkarenko A.S. *Blast furnace loading device*. Certificate of authorship USSR no. 806768. 1981, no. 7. (In Russ.).
 46. Shinkarenko A.S., Igonin I.G., Lyulenkov V.I. *Gas sealing valve of the blast furnace filling apparatus*. Certificate of authorship USSR no. 887861. 1981, no. 45. (In Russ.).
 47. Lyulenkov V.I., Sharapov V.A., Shinkarenko A.S. Investigation of the loading device of a blast furnace with a stationary distribution funnel. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1977, no. 12, pp. 161–163. (In Russ.).
 48. Lyulenkov V.I. Improvement of loading devices of blast furnaces. In: Proceedings of the VI Scientific and Practical Conference on problems of mechanical engineering, metallurgy and mining machines / Edited by L.T. Dvornikov. Novokuznetsk: SibGGMA, 1997. pp. 65, 66 (In Russ.).
 49. Lyulenkov V.I., Tyryshkin Yu.P., Matekhin N.A., Shinkarenko A.S. *Installation for separation of bulk materials*. Certificate of authorship USSR no. 1238811. 1986, no. 23. (In Russ.).
 50. Beresnev S.I., Lyulenkov V.I., Shinkarenko A.S., Abramov G.V. *A method for obtaining an internal thread on a hollow metal workpiece*. Certificate of authorship USSR no. 1827314. 1993, no. 26. (In Russ.).
 51. Tyryshkin Yu.P., Lyulenkov V.I., Shinkarenko A.S., Shariga A.D., Lebedev S.N., Kuptsov V.I., Kretinin V.I. *Installation for separation of bulk materials*. Certificate of authorship RF no. 1837999. 1993, no. 32. (In Russ.).
 52. Savel'ev A.N. Design of homeostasis rolling complexes. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1991, no. 12, pp. 78–82. (In Russ.).
 53. Savel'ev A.N., Gaiduk V.V. Improvement of information support in the maintenance system of technological equipment. *Stal'*. 1994, no. 6, pp. 82–85. (In Russ.).
 54. Savel'ev A.N. On the methodological foundations of the design of reliable technological equipment. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1998, no. 6, pp. 22–26. (In Russ.).
 55. Savel'ev A.N., Bosnyak M.L. Features of the formation of workable rolling complexes for the production of blanks. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2005, no. 2, pp. 59–65. (In Russ.).
 56. Savel'ev A.N. Structural features of a stable functioning complex technical system. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1996, no. 12, pp. 53–58. (In Russ.).
 57. Savel'ev A.N., Timoshenkov Yu.G., Bich T.A. Evaluation of reliability and maintainability indicators of units of a steadily operating technological line of the MNLZ. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2006, no. 6, pp. 57–60. (In Russ.).
 58. Savel'ev A.N., Timoshenkov Yu.G., Bich T.A. Modeling the distribution of elements by reliability in continuous casting machines. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2006, no. 8, pp. 46–49. (In Russ.).
 59. Savel'ev A.N. Features of the friction mechanism during high-speed impact of a smooth disk on metal. In: Improving the operational reliability of parts and technological tools. Collection of scientific works of MISIS. Moscow: Metallurgiya. 1991, pp. 92–96. (In Russ.).
 60. Savel'ev A.N. Features of the mechanism of circulating friction of solids. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1991, no. 4, pp. 101–103. (In Russ.).
 61. Savel'ev A.N., Savel'eva N.A. Fundamentals of technological processes for obtaining amorphized tapes based on the effect of circulating friction. *Materialy sed'moi nauchno-prakticheskoi konferentsii po problemam mashinostroeniya, metallurgicheskikh i gornykh mashin*. Novokuznetsk, 1998, pp. 95–99. (In Russ.).
 62. Savel'ev A.N., Savel'eva N.A. *Method of obtaining tapes with an amorphous structure*. Patent RF no. 2224801. 2004. (In Russ.).
 63. Savel'ev A.N. Mathematical description of the internal processes of the formation of a complex technical system. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1997, no. 8, pp. 52–56. (In Russ.).
 64. Savel'ev A.N. Features of the formation of workable technical systems. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1998, no. 8, pp. 69–75. (In Russ.).
 65. Savel'ev A.N., Timoshenkov Yu.G., Bich T.A. Identification of the element distribution model in a complex technical system. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2004, no. 6, pp. 64–67. (In Russ.).
 66. Savel'ev A.N., Bosnyak M.L. Effective rolling systems for dillet. *Steel in translation*. 2005, vol. 35, no. 2, pp. 40–46.
 67. Savel'ev A.N., Kipervasser M. V., Moiseev L.L. Evaluation of the effectiveness of the linear pneumatic supply system. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2008, no. 2, pp. 58–61. (In Russ.).
 68. Savel'ev A.N., Timoshenkov Yu.G. The method of forming the time parameters of the functioning of the elements of the MNLZ. *Materialy shestnadsatoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*

- po problemam mekhaniki i mashinostroeniya*. Novokuznetsk, 2006, pp. 107–110. (In Russ.).
69. Savel'ev A.N., Oskolkova T.N., Savel'eva N.A. Evaluation of the phase composition and the nature of the change in the lattice parameters of the phases of the amorphized bronze layer AZH9-4. *Materialy desyatoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po problemam mashinostroeniya i gornykh mashin*. Novokuznetsk, 2000, pp. 168–178. (In Russ.).
 70. Savel'ev A.N., Lokteva N.A., Bich T.A. Mathematical model of dynamic processes in a circulation friction unit. *Materialy odinnadtsatoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po problemam mashinostroeniya i gornykh mashin*. Novokuznetsk, 2001, pp. 159–163. (In Russ.).
 71. Lokteva N.A., Savel'ev A.N. On the characteristics of the oscillatory process in the zone of interaction of the tool with the material during circulation friction. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2008, no. 8, pp. 48–52. (In Russ.).
 72. Savel'ev A.N. Equipment operability as a complex criterion. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1991, no. 6, pp. 102–104. (In Russ.).
 73. Savel'ev A.N. Using the criterion of operability of parts in calculations for durability. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1991, no. 10, pp. 84–86. (In Russ.).
 74. Savel'ev A.N., Gromov V.E. Influence of the loading frequency on the nature of the distribution of movements in materials. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1999, no. 6, pp. 62–66. (In Russ.).
 75. Savel'ev A. N. Theory of operability of technological machines. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2008, 225 p. (In Russ.).
 76. Dvornikov L.T., Lokteva N.A., Savel'ev A.N. The mechanism of interaction of contacting surfaces during various friction processes. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2006, 74 p. (In Russ.).
 77. Savel'ev A.N., Stupakov M.I., Savel'ev N.V. Dynamics of heavily loaded technological machines. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2000, 190 p. (In Russ.).
 78. Savel'ev A.N. Fundamentals of the theory of the formation of technological lines and complexes as complex technical systems. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2018, 70 p. (In Russ.).
 79. Fastyskovskii A.R., Savel'ev A.N. Designs and calculations of equipment for rolling stands of varietal and sheet mills. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2008, 316 p. (In Russ.).
 80. Fastyskovskii A.R., Savel'ev A.N. Features of the design and trouble-free operation of roll fittings of long mills. Moscow: Teplotekhnika, 2015, 170 p. (In Russ.).
 81. Zhukov I.A. A life dedicated to science. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2009, vol. 314, no. 2, pp. 159–163. (In Russ.).
 82. Dvornikov L. T., Gerasimov S. P. *Self-aligning five-satellite planetary transmission*. Patent RF no. 2622731. 2017, no. 17. (In Russ.).
 83. Dvornikov L.T. About fundamental inaccuracies in the research of Prof. Pozhbelko V.I. On the structure of mechanisms. *Teoriya mekhanizmov i mashin*. 2016, vol. 14, no. 3(31), pp. 145–165. (In Russ.).
 84. Nikitin A.G., Abramov A.V., Gredina A.A., Garyashin V.V. Analysis of the operation of the crank joint-the root support of the crank-rocker mechanism of the jaw crusher. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 12, pp. 875–878. (In Russ.).
 85. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Medvedeva K.S. Determination of the drive power of a single-roll crusher. *Vestnik mashinostroeniya*. 2016, no. 1, pp. 85–86. (In Russ.).
 86. Nikitin A.G., Abramov A.V. Improving the reliability of jaw crushers by using elastic pneumatic elements in the joints of kinematic pairs. In: *Metallurgy: Technologies, innovations, quality: Proceedings of the XX International Scientific and Technical Conference Ch. 2*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2017, pp. 439–442. (In Russ.).
 87. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Medvedeva K.S. Diagnosis of the rock crushing model to increase the efficiency of one – roll crusher operation. *IOP Conference Series: Earth and Environment Science*. 2017, vol. 84, pp. 1–5.
 88. Dvornikov L. T., Gudimova L.N., Beresnev D.A. *Flat crank-slide mechanism*. Patent RF no. 182350. 2018, no. 23. (In Russ.).
 89. Kuklin S.A. Analytical calculation of contact angles in rolling bearings. *Journal of Advanced Research in the field of Natural Science*. 2017, no. 2, pp. 11–28. (In Russ.).
 90. Savel'ev A.N., Kozlov S.V., Vinokurov N.E. Dynamic loads influencing on elements of multi-motor hydraulic drive of ccm cooler. *Steel in Translation*. 2018, vol. 61, no. 2, pp. 149–155.
 91. Savel'ev A.N., Kozlov S.V., Zhivago E.Ya., Prokhorenko O.D. Formation of a mathematical model of longitudinal vibrations arising in a multi-motor hydraulic drive of refrigerators of the MNLZ. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2018, no. 2 (24), pp. 58–64. (In Russ.).
 92. Bychkov I.V., Zhukov I.A., Dvornikov L.T. Kinematics of Metallurgical Cutters with Parallel Blades. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, no. 4, pp. 238–244. (In Russ.).

93. Zhukov I.A., Timofeev E.G. Mathematical and computer modeling of impact processes in the core system of impact machines. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2020, vol. 1, no. 12, pp. 43–49. (In Russ.).
94. Gudimova L.N., Dvornikov L.T., Makarov A.V., Zhivago E.Ya. Creating a block diagram of a new generation jaw crusher without redundant connections. In: *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2021, no. 4, pp. 30–36. (In Russ.).
95. Gudimova L.N., Makarov A.V., Baklushina I.S. On the issue of creating self-aligning mechanisms in metallurgical production. *RAE. Sovremennye naukoemkie tekhnologii (Ch.1)*. 2022, no. 5, pp. 83–87. (In Russ.).
96. Savel'ev A.N., Anisimov D.O., Kartashov R.N. Determination of the dynamic component of stress in the material when implementing the method of synergetic organized emission of stress waves. In: *Metallurgy: Technologies, Innovations, quality: Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference. Part 2*. Novokuznetsk: ITs SibGIU. 2021, pp. 266–272. (In Russ.).
97. Savel'ev A.N., Makarov A.V., Anisimov D.O. Estimation of the dynamic component of the stress in the material during finely stepped tensile loading of the sample. *TGiSM*. 2022, no. 16, pp. 9–17. (In Russ.).
98. Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S. Mathematical model for determining the number of stops on the roll of a single-roll crushing machine. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 12, pp. 909–911. (In Russ.).
99. Kuklin S.A., Adamovich N.O. The use of the Geogebra software package in the study of mechanisms. *Sovremennye problemy teorii mashin*. 2020, no. 10, pp. 13–17. (In Russ.).
100. Kuklin S.A., Adamovich N.O., Kamko K.D. Making changes to the scheme of the double-acting eight-branch crank press. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*. 2022, no.5 (88), pp. 51–56. (In Russ.).
101. Baklushina I.S., Dvornikov L.T., Ustimenko A.E. *Ten - tower construction arch* Patent RF no. 2780448. 2022, no. 11. (In Russ.).
102. Gudimova L.N., Baklushina I.S., Makarov A.V. On the issue of creating self-aligning mechanisms in metallurgical production. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Ch. 1*. 2022, no. 5, pp. 85–88. (In Russ.).
103. Adamovich N.O., Kuklin S.A., Kuptsov N.V. On the question of the kinematic study of the mechanized support section. *Naukosfera*. 2021, no. 4–1, pp. 132–137. (In Russ.).
104. Korneev V.A., Korneev P.A., Popugaev M.G., Gusev M.M., Bedarev S.A. Determination of the strength properties of rocks in boreholes. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2020, no. 4 (34), pp. 29–31. (In Russ.).
105. Dvornikov L.T., Popugaev M.G. *Eight - rod arch*. Patent RF no. 197270. *Byulleten' izobretenii*. 2020, no. 27. (In Russ.).

Сведения об авторах

Алексей Борисович Юрьев, д.т.н., доцент, ректор, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: rector@sibsiu.ru

Александр Николаевич Савельев, к.т.н., доцент кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: Savelyev2000@mail.ru

Сергей Валерьевич Коновалов, д.т.н., профессор, и.о. заведующего кафедрой механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

Information about the authors

Aleksei B. Yur'ev, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Rector, Siberian State Industrial University

E-mail: rector@sibsiu.ru

Alexander N. Savelyev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University

Email: Savelyev2000@mail.ru

Sergey V. Kononov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Acting Head of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University

E-mail: konovalov@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0003-4809-8660

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

Поступила в редакцию 28.08.2023

После доработки 04.09.2023

Принята к публикации 07.09.2023

Received 28.08.2023

Revised 04.09.2023

Accepted 07.09.2023

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-141

**РЕЦЕНЗИЯ НА МОНОГРАФИЮ Е.В. ПРОТОПОПОВА, М.В. ТЕМЛЯНЦЕВА
«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ФУТЕРОВКИ
КИСЛОРОДНЫХ КОНВЕРТЕРОВ». – НОВОСИБИРСК: СО РАН, 2023. – 324 С.**

В соответствии с общепризнанным мнением кислородно-конвертерный способ производства стали является преобладающим во всех сталепроизводящих странах мира. Его развитию и совершенствованию посвящено множество монографий и научных исследований отечественных и зарубежных ученых. Наиболее обсуждаемыми и актуальными направлениями совершенствования технологий и технико-экономических показателей процесса являются разработки по повышению стойкости футеровки конвертерных агрегатов. Особый интерес в рассматриваемой проблематике связан с перспективами снижения расходов по переделу, уменьшением себестоимости производимой стали и количества межремонтных простоев конвертеров, что позволяет в целом обеспечить эффективную эксплуатацию огнеупорной футеровки.

Рецензируемая монография представляет собой комплексное научное издание, включающее аналитические, исследовательские и производственно-технические разделы. В главах 1 – 6 критически проанализирована, систематизирована и обобщена новейшая информация о существующих технологиях кислородно-конвертерной выплавки стали, конструкциях агрегатов, применяемых футеровках оборудования и способах ремонтов, типах используемых огнеупорных материалов. Рассмотрены вопросы организации «горячих» ремонтов футеровки, применяемые дутьевые устройства, агрегаты и материалы. Представлена информация по современным методам контроля и анализа стойкости футеровки при эксплуатации. В монографии использован значительный по объему (239 источников) список отечественных и зарубежных публикаций, что свидетельствует о достаточно глубоком и всестороннем анализе решаемой научно-практической проблемы.

Особую научную ценность монографии представляет авторский материал собственных исследований и разработок, обобщающий работы в рассматриваемой области, проведенные в последние 30 лет, который описан в главах 7 – 11. В этих разделах представлены следующие материалы:

– технологические варианты совершенствования процесса шлакообразования и использования специальных присадок с целью повышения стойкости футеровки;

– результаты исследования и оптимизации технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку кислородных конвертеров;

– совершенствование конструкций дутьевых устройств для нанесения шлакового гарнисажа на футеровку;

– технологии «горячих» ремонтов, сочетающие торкретирование и нанесение шлакового гарнисажа на футеровку;

– технологическое обеспечение газопорошкового нанесения шлакового гарнисажа.

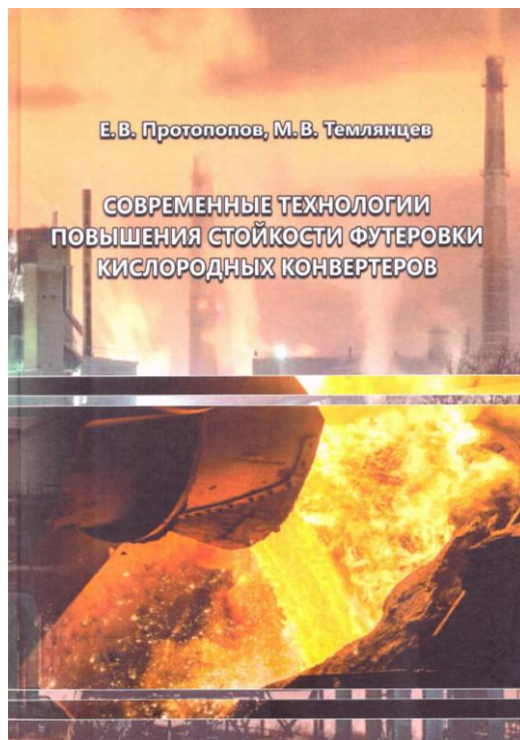
Материал изложен последовательно, логично, технически грамотно, понятным языком. Книга содержит массу иллюстраций, схем, чертежей и фотографий, наглядно поясняющих конструкцию устройств и физическую природу протекающих процессов. Изложенный в монографии материал имеет научную новизну и представляет практическую ценность. Содержащиеся в книге разработанные методики исследования, методы расчетов и принципы конструирования дутьевых устройств, обеспечивающих газопорошковое нанесение шлакового гарнисажа, имеют широкую область практического применения на металлургических предприятиях, содержащих в своей структуре конвертерное производство. Авторы в монографии приводят целый ряд примеров использования разработанных технологий и устройств с конкретными результатами их промышленного внедрения.

Монография, безусловно, представляет большой научный и практический интерес, ориентирована на ученых, занимающихся проблемами повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров, инженерно-технических работников металлургических предприятий и обучающихся в вузах.

*И.Д. Рожихина, д.т.н., профессор,
Сибирский государственный
индустриальный университет*

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-3(45)-142-143

**РЕЦЕНЗИЯ НА МОНОГРАФИЮ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ФУТЕРОВКИ КИСЛОРОДНЫХ КОНВЕРТЕРОВ» /
Е.В. ПРОТОПОПОВ, М.В. ТЕМЛЯНЦЕВ. – НОВОСИБИРСК: СО РАН, 2023. – 324 С.**



Современный кислородно-конвертерный процесс даже с учетом признанных и неоспоримых преимуществ имеет целый ряд проблемных областей, над которыми постоянно работают ученые-металлурги всего мира. Одной из таких критических областей является служба и эксплуатация футеровки конвертерных агрегатов. Высокие температуры и коррозионный износ, вызванные агрессивными воздействиями расплавов стали и шлака, механические нагрузки, теплосмены и, как следствие, термическое скалывание – все эти факторы приводят к интенсивному разрушению и износу огнеупорной футеровки. Повышение стойкости футеровки, приводящее к снижению расхода огнеупоров на тонну выплавляемой стали, способствует снижению ее себестоимости, а, самое главное, к увеличению продолжительности кампании по футеровке и производительности.

Монография является специализированным научным изданием, выполненным на высоком профессиональном уровне. Работа посвящена вопросам повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров посредством применение различных способов, методов и технологий «горячих» ремонтов, значительное количество ко-

торых являются авторскими разработками. Книга содержит 11 разделов, рационально объединенных в представлении актуального для металлургии материала.

Глава 1. Особенности и тенденции развития мирового производства стали – представлена общая современная ситуация развития различных способов производства стали, краткий экскурс в историю возникновения кислородно-конвертерного способа, перспективы и направления его совершенствования.

Глава 2. Современные варианты технологии конвертерной плавки и особенности эксплуатации огнеупорной футеровки – посвящена анализу вариантов технологий (верхняя, донная, комбинированная продувки) конвертерной ванны и особенностям их влияния на футеровку.

Глава 3. Типы применяемых огнеупорных материалов в кислородных конвертерах – посвящена описанию современных огнеупорных материалов, применяемых для выполнения футеровок, их свойствам, химико-минералогическому составу, механизмам износа.

Глава 4. Конструкции современных конвертерных агрегатов – рассмотрены основные тенденции развития конструкции современных конвертеров и особенности износа огнеупорных футеровок.

Глава 5. Современное оборудование и методы выполнения футеровки конвертерных агрегатов – посвящена анализу оборудования, применяемого для ремонта огнеупорных футеровок кислородных конвертеров, особенностям выполнения футеровок конвертеров различной конструкции. Рассмотрены новые технологии и методики лазерного сканирования и измерения профиля износа футеровки.

Глава 6. Оборудование и методы ремонта футеровки конвертерных агрегатов – рассмотрены методы и виды торкретирования футеровки, оборудование и материалы, используемые для его реализации.

Глава 7. Технологические варианты совершенствования процесса шлакообразования с целью повышения стойкости футеровки – выполнен анализ технологических вариантов совершенствования процесса шлакообразования и использования специальных добавок с целью повыше-

ния стойкости футеровки. Глава посвящена различным аспектам совершенствования технологии кислородно-конвертерной плавки с применением магнезиальных, известково-магнезиальных и других композиционных материалов с целью повышения стойкости футеровки.

Глава 8. Исследование и оптимизация современных технологий нанесения шлакового гарнисажа на футеровку кислородных конвертеров – рассмотрены методы исследования различных процессов в газо-жидкостных системах, представлены результаты математического, физического моделирования и оптимизации технологических параметров процессов нанесения шлакового гарнисажа на футеровку.

Глава 9. Совершенствование технологии и конструкций дутьевых устройств для нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера – рассмотрены особенности применения технологии вихревых течений для нанесения огнеупорных шлаковых покрытий на футеровку. Представлен большой объем собственных исследований по изучению газодинамики технологических газов при выполнении операций, связанных с повышением стойкости футеровки, в том числе результаты моделирования присоединенной массы шлака к сверхзвуковой газовой струе при его раздувке в полости конвертера и моделированию параметров сверхзвуковой струи, используемых при раздувке шлака. Приведено инженерное обоснование определяющих параметров дутьевого режима ошлакования футеровки. Показаны результаты оптимизации технологии нанесения шлакового гарнисажа с использованием раздувочной фурмы для нанесения шлакового гарнисажа с двухрядным расположением сопел.

Глава 10. Технология рационального сочетания процесса торкретирования и нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера – представлены результаты моделирования тер-

могазодинамических процессов при раздуве шлака и факельном торкретировании, разработки конструкции комбинированной торкрет-гарнисажной фурмы и технологических вариантов нанесения шлакового гарнисажа с ее использованием в промышленных условиях.

Глава 11. Разработка и совершенствование технологического обеспечения газопорошкового нанесения шлакового гарнисажа – рассмотрена математическая модель гидродинамических и массопереносных процессов в полости конвертера при продувке шлакового расплава газопорошковыми струями, методики расчета фурм для подачи порошка при раздуве шлака, особенности проектных решений конструкций дутьевых устройств для газопорошковой раздувки шлака и освоения технологии.

В монографии авторам удалось целостно систематизировать сведения, обобщить данные собственных исследований в предметной области и органично сочетать с большим количеством литературных источников, представляя богатый теоретический и экспериментальный материал технических решений по данной проблеме. Издание написано на хорошем уровне, понятным профессиональным языком, хорошо иллюстрировано, содержит примеры практической реализации разработок. Полученные результаты научно обоснованы, конструктивные и технологические решения нашли практическое применение на металлургических предприятиях отрасли.

Книга оставляет очень хорошее впечатление и адресована ученым, специалистам промышленных предприятий, аспирантам вузов, интересующимся проблемой повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров.

*Н.Ф. Якушевич, д.т.н., профессор,
Сибирский государственный
индустриальный университет*

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

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: vestnicsibgiu@sibsiu.ru*. При направлении материалов в редакцию необходимо указывать раздел, в котором статья будет опубликована.

Таблицы, библиографический список и подристочный 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 пространственных программ MS Excel, MS Visio и др., следует представлять в формате исходного приложения (*.xls, *.vsd и др.).

Шрифтовое оформление физических величин: латинские буквы в светлом курсивном начертании, русские и греческие – в светлом прямом. Числа и единицы измерения – в светлом прямом начертании. Особое внимание следует обратить на правильное изображение индексов и показателей степеней. Формулы набираются с помощью редакторов формул Equatn или Math Type, масштаб формул должен быть 100 %. Масштаб устанавливается в диалоговом окне «Формат объекта». В редакторе формул для латинских и греческих букв использовать стиль «Математический» («Math»), для русских – стиль «Текст» («Text»). Размер задается стилем «Обычный» («Full»), для степеней и индексов – «Крупный индекс / Мелкий индекс» («Subscript / Sub-Subscript»). Недопустимо использовать стиль «Другой» («Other»).

Необходимо избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, графиках и тексте статьи. Объем статьи не должен превышать 18 – 20 страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала.

Рукопись должна быть тщательно выверена, подписана автором (при наличии нескольких авторов, число которых не должно превышать пяти, – всеми авторами); в конце рукописи указывают полное название высшего учебного заведения (предприятия) и кафедры, дату отправки рукописи, а также полные сведения о каждом авторе (Ф.И.О., место работы, должность, ученая степень, звание, служебный и домашний адреса с почтовыми индексами, телефон, e-mail, ORCID). Необходимо указать, с кем вести переписку.

Цитируемую в статье литературу следует давать общим списком в порядке упоминания в статье с обозначением ссылки в тексте порядковой цифрой. Перечень литературных источников рекомендуется не менее 20.

Библиографический список оформляют в соответствии с ГОСТ 7.0.100 – 2018: а) для книг – фамилии и инициалы авторов, полное название книги, номер тома, место издания, издательство и год издания, общее количество страниц; б) для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, полное название журнала, название статьи, год издания, номер тома, номер выпуска, страницы, занятые статьей; в) для статей из сборников – фамилии и инициалы авторов, название сборника, название статьи, место издания, издательство, год издания, кому принадлежит, номер или выпуск, страницы, занятые статьей.

Иностранные фамилии и термины следует давать в тексте в русской транскрипции, в библио-

графическом 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»)).

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