

ТОМ 9, №3, 2025

eISSN 2541-9129

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Безопасность техногенных и природных систем

Техносферная
безопасность /
Technosphere Safety

Машиностроение /
Machine Building

Химические технологии,
науки о материалах,
металлургия / Chemical
Technologies, Materials
Sciences, Metallurgy



www.bps-journal.ru
DOI 10.23947/2541-9129



Безопасность техногенных и природных систем Safety of Technogenic and Natural Systems

Рецензируемый научно-практический журнал

eISSN 2541-9129

Издается с 2017 года

Периодичность – 4 выпуска в год

DOI: 10.23947/2541-9129

Учредитель и издатель — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

Создан в целях освещения результатов исследований и реальных достижений по актуальным вопросам машиностроения, техносферной безопасности, современной металлургии и материаловедения. В журнале освещаются проблемы развития фундаментальных исследований и инженерных разработок в ряде важнейших областей технических наук. Одним из главных направлений деятельности журнала является интеграция в международное информационное пространство.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

- 2.1.16 – Охрана труда в строительстве (технические науки)
- 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)
- 2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)
- 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
- 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки)
- 2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
- 2.10.1 – Пожарная безопасность (технические науки)
- 2.10.2 – Экологическая безопасность (технические науки)
- 2.10.3 – Безопасность труда (технические науки)

Регистрация:	Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 66531 от 21 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Индексация и архивация:	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
Сайт:	https://bps-journal.ru
Адрес редакции:	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail:	vestnik@donstu.ru
Телефон:	+7 (863) 2–738–372
Дата выхода №3, 2025 в свет:	30.08.2025





Safety of Technogenic and Natural Systems

Bezopasnost' Tekhnogennykh i Prirodnnykh Sistem

Peer-Reviewed Scientific and Practical Journal

eISSN 2541-9129

Published Since 2017

Periodicity – 4 issues per year

DOI: 10.23947/2541-9129

Founder and Publisher — Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Russian Federation

The journal is created in order to highlight the results of research and real achievements on topical issues of Mechanical Engineering, Technosphere Safety, Modern Metallurgy and Materials Science. The journal highlights the problems of the development of fundamental research and engineering developments in a number of important areas of technical sciences. One of the main activities of the journal is integration into the international information space.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific publications (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation), where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Science in scientific specialties and their respective branches of science should be published.

The Journal Publishes Articles in the Following Fields of Science:

- Labor protection in construction (Engineering Sciences)
- Ground Transport and Technological Means and Complexes (Engineering Sciences)
- Machines, Aggregates and Technological Processes (Engineering Sciences)
- Metallurgical Science and Heat Treatment of Metals and Alloys (Engineering Sciences)
- Powder Metallurgy and Composite Materials (Engineering Sciences)
- Materials Science (Engineering Sciences)
- Fire Safety (Engineering Sciences)
- Environmental Safety (Engineering Sciences)
- Occupational Safety (Engineering Sciences)

Registration: Mass Media Registration Certificate ЭЛ № ФС 77 – 66531 Dated Jule, 21, 2016, Issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media

Indexing and Archiving: RISC, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive

Website: <https://bps-journal.ru>

Address of the Editorial Office: 1, Gagarin Sq. Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

E-mail: vestnik@donstu.ru

Telephone: +7 (863) 2–738–372

Date of Publication No.3,2025: 30.08.2025



Редакционная коллегия

Главный редактор

Месхи Бесарион Чохоевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Заместители главного редактора

Короткий Анатолий Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Азаров Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация)

Выпускающий редактор

Комахидзе Манана Гивиевна, кандидат химических наук, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Ответственные секретари

Хазанович Григорий Шнеерович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Шевченко Надежда Анатольевна, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Абдрахманов Наиль Хадитович, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

Агеева Екатерина Владимировна, доктор технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация)

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация)

Амосов Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, Самарский государственный технический университет (Самара, Российская Федерация)

Баурова Наталья Ивановна, доктор технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (Москва, Российская Федерация)

Беспалов Вадим Игоревич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Булыгин Юрий Игоревич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Воронова Элеонора Юрьевна, доктор технических наук, доцент, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация)

Гапонов Владимир Лаврентьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Гурова Оксана Сергеевна, доктор технических наук, доцент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Гутаревич Виктор Олегович, доктор технических наук, доцент, Донецкий национальный технический университет (Донецк, Донецкая Народная Республика)

Деев Владислав Борисович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация)

Дорофеев Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный технический университет (НПИ) имени М. И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация)

Егоров Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный технический университет (НПИ) имени М. И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация)

Еремеева Жанна Владимировна, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация)

Копчиков Вячеслав Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация)

Лагерева Александр Валерьевич, доктор технических наук, профессор, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация)

Лагерева Игорь Александрович, доктор технических наук, доцент, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация)

Манжула Константин Павлович, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербургский, Российская Федерация)

Мензелинцев Надежда Васильевна, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация)

Минко Всеволод Афанасьевич, доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (Белгород, Российская Федерация)

Москвичев Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор, Красноярский филиал Федерального исследовательского центра «Информационных и вычислительных технологий» (Красноярск, Российская Федерация)

Носенко Алексей Станиславович, доктор технических наук, профессор, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация)

Плешко Михаил Степанович, доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС (Москва, Российская Федерация)

Пустовойт Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Пушенко Сергей Леонардович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Порошин Александр Алексеевич, доктор технических наук, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Балашиха, Российская Федерация)

Севастьянов Борис Владимирович, доктор технических наук, кандидат педагогических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова (Ижевск, Российская Федерация)

Тюрин Александр Павлович, доктор технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашикова (Ижевск, Российская Федерация)

Хазанович Григорий Шнеерович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Хафизов Ильдар Фанисович, доктор технических наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

Хафизов Фаниль Шамильевич, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

Чукарин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Editorial Board

Editor-in-Chief

Besarion Ch. Meskhi, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Deputy Chief Editors

Anatoliy A. Korotkiy, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Valery N. Azarov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation)

Executive Editor

Manana G. Komakhidze, Cand.Sci. (Chemistry), Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Executive Secretaries

Grigoriy Sh. Khazanovich, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Nadezhda A. Shevchenko, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Aleksandr A. Poroshin, Dr.Sci. (Eng.), All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Balashikha, Russian Federation)

Aleksandr N. Chukarin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Rostov State Transport University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Aleksandr P. Amosov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Samara State Technical University (Samara, Russian Federation)

Aleksandr P. Tyurin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

Aleksandr V. Lagerev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Ivan Petrovsky Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Aleksey S. Nosenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Shakhty Road Institute (branch) SRSPU (NPI) named after. M.I. Platova (Shakhty, Russian Federation)

Boris V. Sevastyanov, Dr.Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Pedagog.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

Ekaterina V. Ageeva, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russian Federation)

Eleonora Yu. Voronova, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Shakhty Road Institute (branch) SRSPU (NPI) named after. M.I. Platov (Shakhty, Russian Federation)

Evgeniy V. Ageev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Southwest State University (Kursk, Russian Federation)

Fanil Sh. Hafizov, Dr.Sci. (Eng.) Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Grigoriy Sh. Khazanovich, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Igor A. Lagerev, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Ivan Petrovsky Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Ildar F. Hafizov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Konstantin P. Manzhula, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Mikhail S. Pleshko, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation)

Nadezhda V. Menzelintseva, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation)

Nail Kh. Abdrakhmanov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Natalya I. Baurova, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (Moscow, Russian Federation)

Oksana S. Gurova, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Sergey L. Pushenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Sergey N. Egorov, Dr.Sci. (Eng.), South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Platov (Novocherkassk, Russian Federation)

Vadim I. Bepalov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Viktor N. Pustovoit, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Viktor O. Gutarevich, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Donetsk National Technical University (Donetsk, Donetsk People's Republic)

Vladimir L. Gaponov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Vladimir V. Moskvichev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Krasnoyarsk, Russian Federation)

Vladimir Yu. Dorofeev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Platov (Novocherkassk, Russian Federation)

Vladislav B. Deev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation)

Vsevolod A. Minko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Belgorod, Russian Federation)

Vyacheslav G. Kopchenkov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, North-Caucasus Federal University (Stavropol, Russian Federation)

Yuriy I. Bulygin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Zhanna V. Ereemeeva, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation)

Содержание

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Разработка вычислительного комплекса для оценки пожарной опасности производственных объектов с учетом их характеристик 185
А.А. Кондашов
- Исследование сорбции тяжелых металлов наземными экосистемами на участках города Чита с различной антропогенной нагрузкой 196
Т.В. Турушева, В.Е. Есипов
- Применение шахтного метана в качестве газомоторного топлива для коммерческого автомобильного транспорта городов Донбасса 208
Н.В. Савенков, Е.Л. Головатенко

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Идентификация морфологии поверхности стального естественного феррито-мартенситного композита с использованием программного обеспечения ImageJ 221
В.В. Дука, Л.П. Арефьева
- Влияние способа получения и структуры хромоникелевых коррозионностойких сталей на кинетику формирования наружной облоймы сферических шарниров 230
Н.А. Конько, Б.Г. Гасанов
- Влияние магнитного поля на особенности поведения трещин в стали после термической обработки на высокопрочное состояние 242
В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачев
- Тонкая структура стали после микродугового молибденирования 250
М.С. Степанов, Ю.М. Домбровский

Contents

TECHNOSPHERE SAFETY

- Development of a Computational Complex for Fire Hazard Assessment of Production Facilities, Taking into Account Their Characteristics** 185
Andrey A. Kondashov
- Investigation of the Sorption of Heavy Metals by Terrestrial Ecosystems in Areas of the City of Chita with Various Anthropogenic Loads** 196
Tatyana V. Turusheva, Vyacheslav E. Esipov
- The Use of Coal Mine Methane as a Natural Gas Motor Fuel for Commercial Motor Transport in Donbass Cities** 208
Nikita V. Savenkov, Ekaterina L. Golovatenko

CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

- Surface Morphology Identification of Steel Natural Ferrite-Martensitic Composite Using ImageJ Software** 221
Valentina V. Duka, Lyudmila P. Aref'eva
- Influence of the Production Method and the Structure of Chromium-Nickel Corrosion Resistant Steels on the Kinetics of the Formation of the Outer Cage of Spherical Joints** 230
Nikolai A. Konko, Badrudin G. Gasanov
- Influence of the Magnetic Field on the Behavior of Cracks in Steel after Heat Treatment to a High-Strength State** 242
Viktor N. Pustovoit, Yuri V. Dolgachev
- Fine Steel Structure after Microarc Molybdenum Steel Saturation** 250
Makar S. Stepanov, Yurii M. Dombrovskii

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 614.84

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-185-195>

Разработка вычислительного комплекса для оценки пожарной опасности производственных объектов с учетом их характеристик

А.А. Кондашов

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны», г. Балашиха, Российская Федерация

✉ akond2008@mail.ru

EDN: SBQHNQ

Аннотация

Введение. Ежегодно в Российской Федерации на производственных объектах происходит около 5 тыс. пожаров, ущерб от которых исчисляется миллиардами рублей. В целях снижения количества пожаров и минимизации ущерба в настоящее время ведется работа по совершенствованию методики расчета численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны, создаваемых для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ в организациях, утвержденной приказом МЧС России от 15 октября 2021 г. № 700¹ (далее — Методика). В научной литературе, посвященной анализу пожарной опасности производственных объектов различных отраслей экономики, отсутствует комплексный показатель для оценки пожарной опасности предприятий, который бы учитывал их технико-экономические характеристики с учетом отраслевой принадлежности. Цель настоящего исследования состоит в разработке безразмерного вычислительного комплекса, описывающего состояние пожарной опасности производственных объектов, принимающего во внимание их характерные особенности. Разработанный комплекс использован при формировании подходов к обоснованию численности и технической оснащенности объектовых подразделений пожарной охраны.

Материалы и методы. Проведен анализ статистических данных по количеству пожаров, числу погибших и травмированных, а также материальному ущербу от пожаров на производственных объектах по отраслям экономики с использованием информации из федеральной государственной информационной системы «Федеральный банк данных «Пожары». Для определения технико-экономических и оперативных характеристик предприятий, на которых созданы объектовые подразделения пожарной охраны, был проведен анкетный опрос, по результатам которого собраны сведения о 726 производственных объектах. Исследованы технико-экономические характеристики данных объектов: площади территории и застройки, численность персонала, массы обращающихся пожароопасных, пожаровзрывоопасных и взрывоопасных технологических сред, площади зданий и сооружений, отнесенных к определенным категориям взрывопожароопасности, количество пожаров на предприятии и др.

Результаты исследования. Разработан безразмерный вычислительный комплекс $U_{по}$, характеризующий уровень пожарной опасности производственных объектов. Построено распределение значений комплекса $U_{по}$ для производственных объектов, на которых созданы подразделения пожарной охраны, и определены параметры полученного распределения. Определены критерии отнесения производственного объекта к определенной категории пожарной опасности. Рассчитаны значения показателя пожарной опасности для отраслей экономики. В категорию высокой пожарной опасности попадает черная металлургия ($U_{по} = 0,77$), машиностроение и металлообработка (0,73), цветная металлургия (0,70) и топливная промышленность (0,68). Приведен пример расчета уровня пожарной опасности для предприятия электроэнергетики.

¹ Об утверждении методик расчета численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны. Приказ МЧС России № 700 от 15 октября 2021. Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/7454> (дата обращения: 11.05.2025).

Обсуждение. При нормировании количества и дислокации объектовых подразделений пожарной охраны, при определении численности их личного состава и технической оснащенности необходимо учитывать уровень пожарной опасности производственного объекта. Анализ распределения значений комплекса $U_{по}$ показал, что он распределен нормально со средним значением $m = 0,47$ и стандартным отклонением $\sigma = 0,19$. В результате, такие отрасли, как черная металлургия и машиностроение, отнесены к категории высокой пожарной опасности, в то время как электроэнергетика классифицирована как средняя. Таким образом, предложенный метод позволяет эффективно оценивать пожарную опасность в различных секторах экономики.

Заключение. Полученные результаты использованы для подготовки новой редакции Методики расчета численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны, создаваемых для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ в организациях, утвержденной приказом МЧС России от 15 октября 2021 г. № 700. Использование разработанного комплекса позволит более точно учитывать особенности производственного объекта при определении ресурсов пожарной охраны.

Ключевые слова: пожарная опасность, производственный объект, отрасль экономики, объектовое подразделение пожарной охраны, комплексный показатель

Благодарности. Автор выражает благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Кондашов А.А. Разработка вычислительного комплекса для оценки пожарной опасности производственных объектов с учетом их характеристик. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(3):185–195. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-185-195>

Original Empirical Research

Development of a Computational Complex for Fire Hazard Assessment of Production Facilities, Taking into Account Their Characteristics

Andrey A. Kondashov 

All-Russian Research Institute of Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Russian Federation
✉ akond2008@mail.ru

Abstract

Introduction. Every year in the Russian Federation, approximately five thousand fires occur at production facilities, causing damage estimated in billions of rubles. To reduce the number of fires and minimize damage, work is underway to improve the methodology for calculating the number and equipment of fire protection units created to extinguish fires and conduct emergency rescue operations in organizations. This methodology was approved by Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated October 15, 2021 No. 700 (hereinafter referred to as the Methodology). In the scientific literature on the analysis of fire hazards in industrial facilities in various sectors of the economy, there is a lack of a comprehensive indicator for fire hazard assessment of enterprises, which would take into account their technical and economic characteristics and industry affiliation. The aim of this study is to develop a dimensionless computing system describing the state of fire hazard of industrial facilities, taking into account their characteristic features. The developed complex was used in the formation of approaches to substantiate the number and technical equipment of facility-based fire protection units.

Materials and Methods. The analysis of statistical data on the number of fires, number of deaths and injuries, as well as the material damage caused by fires at production facilities in various economic sectors, was carried out using information from the Federal State Information System "Federal Database 'Fires'". To determine technical, economic and operational characteristics of enterprises with facility-based fire protection units, a survey was conducted using a questionnaire that collected information from 726 production facilities. Technical and economic characteristics of these facilities were studied, including: the area of land and buildings, number of employees, the mass of fire-hazardous, fire-explosive and explosive technological environments, the area of buildings and structures classified into certain categories of explosion and fire hazard, the number of fires at the enterprise, etc.

Results. A dimensionless $U_{по}$ computing system has been developed that characterizes the fire hazard level of industrial facilities. The distribution of values of the $U_{по}$ complex for production facilities where fire protection units have been established has been constructed, and the parameters of the resulting distribution have been determined. The criteria for classifying a production facility according to its fire hazard level have been established. The values of the fire hazard indicator for economic sectors have been calculated. Ferrous metallurgy ($U_{по} = 0.77$), mechanical engineering and metalworking (0.73), non-ferrous metallurgy (0.70), and fuel industry (0.68) fell into the category of high fire hazard. The paper provides an example of calculating the fire hazard level for an electric power company.

Discussion. When determining the number and location of fire protection units, as well as the number of personnel and technical equipment, it is important to consider the level of fire risk at the production facility. An analysis of the distribution of values of the U_{no} complex showed that it followed a normal distribution with an average value of $m = 0.47$ and a standard deviation of $\sigma = 0.19$. This meant that industries such as ferrous metallurgy and mechanical engineering had a higher level of fire risk compared to the electric power industry, which was classified as medium. The proposed method allows for an effective assessment of fire risk across different sectors of the economy.

Conclusion. The results obtained were used to develop a new version of the Methodology for calculating the number and technical equipment of fire protection units, created to extinguish fires and carry out emergency rescue operations in organizations. This methodology was approved by Order No. 700 of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated October 15, 2021. The use of the developed complex will allow for a more accurate consideration of the specific characteristics of the production facility when determining fire protection resources.

Keywords: fire hazard, production facility, branch of the economy, fire department facility, complex indicator

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and reviewers for their attentive attitude to the article and the comments indicated, which allowed us to improve its quality.

For Citation. Kondashov AA. Development of a Computational Complex for Fire Hazard Assessment of Production Facilities, Taking into Account Their Characteristics. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(3):185–195. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-185-195>

Введение. Каждый год прямой материальный ущерб от пожаров на производственных объектах достигает нескольких миллиардов рублей, что подчеркивает актуальность этой проблемы. Пожары на производственных площадках могут быстро распространяться на большую площадь, что связано с наличием легковоспламеняющихся и горючих веществ и материалов. Это приводит не только к значительным финансовым потерям для предприятий, но и к тяжелым социальным последствиям — потере рабочих мест, нарушению технологических процессов, а также необходимости эвакуации персонала. Более того, такие пожары могут иметь серьезные экологические последствия, вызывая задымление и загрязнение нижних слоев атмосферы.

Изучение пожарной опасности различных производственных объектов стало объектом множества исследований, однако остается не до конца изученной проблема недостаточной осведомленности о специфических рисках для разных отраслей. Это подчеркивает необходимость системного подхода к оценке пожарной опасности. Причиной повышенной опасности на предприятиях химической промышленности является наличие пожаровзрывоопасных веществ, и пожар на таких объектах способен привести к катастрофическим социальным и экономическим последствиям [1].

Пожаровзрывоопасность предприятий металлургии также вызывает обоснованные опасения, поскольку в процессе их деятельности образуется много горючей пыли [2], что происходит в результате различных технологических процессов [3]. На таких предприятиях нарушения требований техники безопасности могут стать непосредственной причиной возникновения пожаров и взрывов [4]. В работе [5] подчеркивается, что предприятия в лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности являются одними из наиболее пожароопасных. Главными факторами, способствующими возникновению пожаров, выступают нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования (30,5 %) и неосторожное обращение с огнем (20,2 %) [6].

Пожарная опасность электростанций обуславливается обращением горючих материалов, таких как масла и изоляционные материалы, а также возникновением источников зажигания, связанных с электрическим током. Это может привести к пожарным инцидентам при нарушении установленного порядка эксплуатации электрооборудования [7]. На предприятиях нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности к пожарам часто приводят износ производственного оборудования, нарушение технологического регламента [8], несоблюдение требований пожарной безопасности [9], а также недостатки в процессе монтажных работ [10]. Усложнение производственных технологических процессов в данной отрасли влечет за собой рост количества горючих газов и летучих легковоспламеняющихся жидкостей, что создает реальную угрозу возникновения крупномасштабных пожаров [11]. Таким образом, оценка пожарной безопасности веществ, используемых на объектах нефтегазового комплекса, становится ключевым элементом в системе обеспечения пожарной безопасности [12].

Возникновение пожаров на предприятиях горнодобывающей промышленности часто связано с нарушениями правил техники безопасности, неисправностями оборудования и объектов инфраструктуры, а также неблагоприятными условиями окружающей среды [13]. На предприятиях машиностроения и металлообработки повышенная пожарная опасность связана с наличием большого количества легковоспламеняющихся материалов и изделий [14].

Невзирая на обширный спектр исследований, посвященных пожарной опасности в различных отраслях, до сих пор не существует единого подхода, позволяющего адекватно оценить пожарную опасность в произвольных производственных условиях, принимая во внимание их специфические особенности. Настоящее исследование нацелено на разработку комплексного показателя, который будет описывать состояние пожарной опасности конкретного производственного объекта. Этот показатель призван служить основой для обоснования количества и размещения объектов подразделений пожарной охраны, их численности и технической оснащенности.

Цель представленного исследования заключается в создании методологии для определения пожарной опасности, что в свою очередь должно улучшить практику управления рисками и повысить уровень безопасности на производственных объектах. Для достижения этой цели были поставлены конкретные задачи: анализ существующих методик оценки пожарной опасности, выявление недостатков в текущих подходах, а также предложение новых решений, способствующих повышению общего уровня безопасности. Таким образом, актуальность исследования не только заключается в его научном и практическом значении, но и в его способности создать основу для дальнейших улучшений в области пожарной безопасности.

Материалы и методы. Для вычисления значений показателей пожарной опасности по отраслям производства был проведен анализ статистических данных по пожарам на производственных объектах за 2020–2022 гг. с использованием информации из федеральной государственной информационной системы «Федеральный банк данных «Пожары»². Количество предприятий в отраслях экономики определено на основе данных Федеральной службы государственной статистики Федерации³.

Для определения технико-экономических характеристик предприятий, на которых функционируют объектовые подразделения пожарной охраны, был проведен анкетный опрос. В результате собрано 726 сведений о производственных объектах [15]. Проведен анализ полученных данных, определены средние значения каждого показателя для всего массива, а также для отдельных отраслей экономики.

При разработке безразмерного вычислительного комплекса $U_{по}$, характеризующего пожарную опасность предприятия, технико-экономические показатели предприятия нормировались на соответствующие средние значения и умножались на весовые множители, определяющие вклад конкретного показателя. Значения показателей обстановки с пожарами для отраслей экономики нормировались на средние значения по всей экономике.

Вычислены значения безразмерного вычислительного комплекса $U_{по}$ для всех производственных объектов с объектовыми подразделениями пожарной охраны и построено распределение значений $U_{по}$. Определены среднее значение m и среднеквадратичное отклонение σ полученного распределения, на основе которых были рассчитаны границы интервалов значений $U_{по}$, соответствующих различным уровням пожарной опасности производственного объекта.

Анализ статистических данных о пожарах в различных отраслях экономики показал следующую картину. Среднее значение количества пожаров на 100 предприятий по всем отраслям экономики составляет 0,75 пожаров на 100 предприятий. Максимальное значение данный показатель достигает на предприятиях угольной промышленности — 9,38 пожаров на 100 предприятий. Меньше всего происходит пожаров в строительной отрасли — 0,14 пожаров на 100 предприятий (рис. 1).

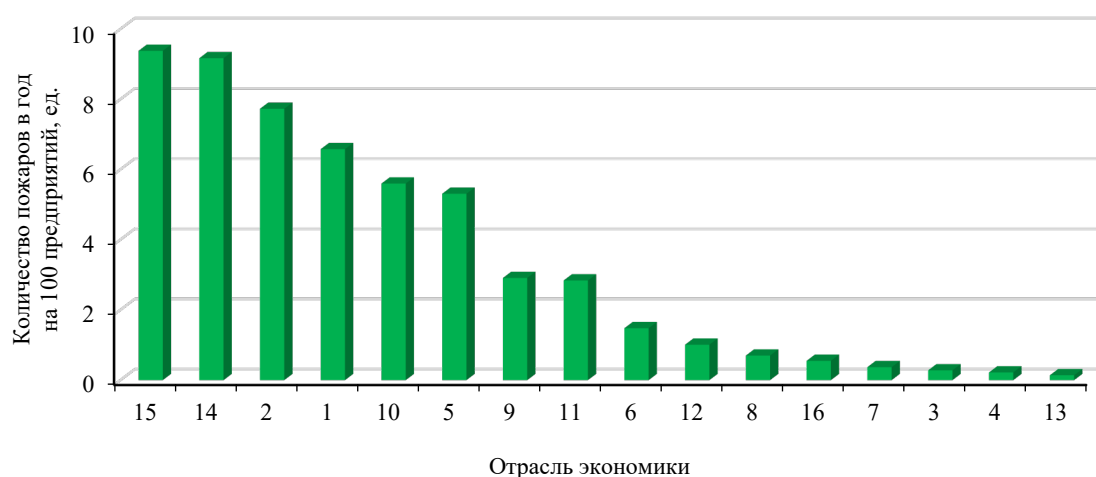


Рис. 1. Количество пожаров на 100 предприятий по отраслям экономики: 1 — электроэнергетика; 2 — черная металлургия; 3 — химическая и нефтехимическая промышленность; 4 — машиностроение и металлообработка; 5 — лесная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность; 6 — промышленность строительных материалов; 7 — легкая промышленность; 8 — пищевая промышленность; 9 — сельское хозяйство; 10 — топливная промышленность; 11 — цветная металлургия; 12 — транспорт; 13 — строительство; 14 — судостроения и судоремонт; 15 — угольная промышленность; 16 — иные отрасли

² О формировании электронных баз данных учета пожаров и их последствий: Приказ МЧС России № 625 от 24 декабря 2018 г. ГАРАНТ. URL: <https://base.garant.ru/72138544/> (дата обращения: 11.05.2025).

³ Российский статистический ежегодник. 2022. Федеральная служба государственной статистики: Москва: 2022. 696 с. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ejegodnik_2022.pdf (дата обращения: 11.05.2025)

В среднем на 1 тыс. пожаров на производственных объектах погибают и получают травмы 53 человека. Наименьшее количество пострадавших при пожарах зарегистрировано на предприятиях электроэнергетики — 12 человек на 1 000 пожаров. Наибольшее значение данный показатель достигает в топливной промышленности — 452 человека на 1 000 пожаров (рис. 2).

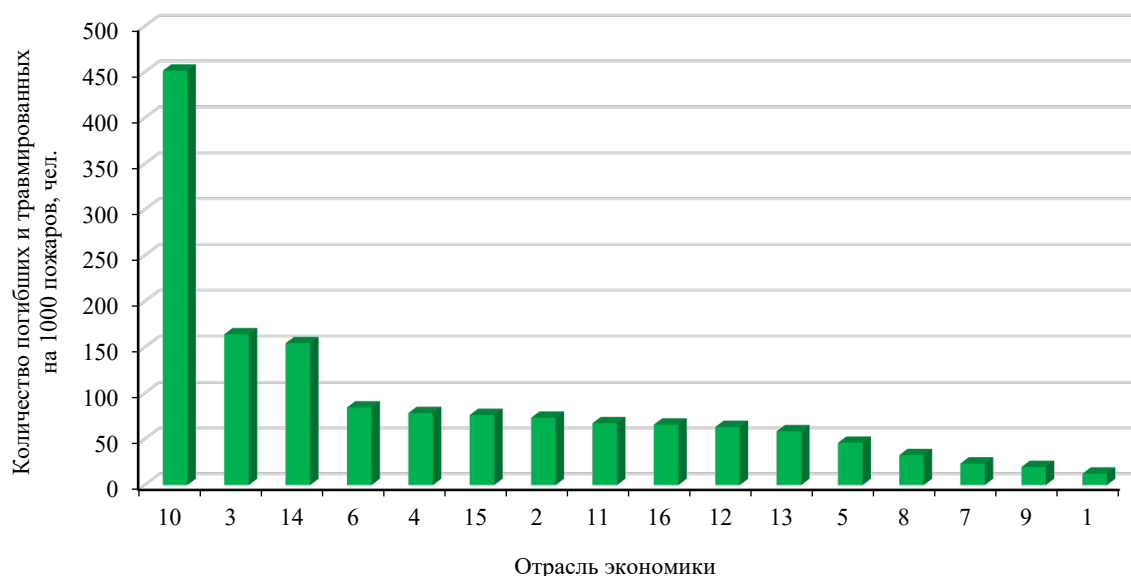


Рис. 2. Количество пострадавших (погибших и травмированных) при пожарах на 1 000 пожаров по отраслям экономики. Названия отраслей экономики приведены в подписи к рис. 1

Средняя величина ущерба от одного пожара колеблется от 16 млн. рублей для предприятий машиностроительной и металлообрабатывающей отраслей до 60 тыс. рублей для предприятий судостроительной и судоремонтной промышленности. В среднем по всей экономике ущерб от одного пожара составляет 904 тыс. рублей.

Анализ технико-экономических характеристик предприятий, на которых созданы объектовые подразделения пожарной охраны, выявил следующие закономерности. Среднее значение площади территории предприятий варьируется от 3,7 га для легкой промышленности до 1,81 тыс. га для транспортных предприятий. Среднее значение по всем предприятиям, на которых созданы объектовые подразделения пожарной охраны, составляет 238 га.



Рис. 3. Площадь застройки предприятий зданиями, сооружениями и технологическими установками по отраслям экономики. Названия отраслей экономики приведены в подписи к рис. 1

Распределение отраслей экономики по площади застройки зданиями, сооружениями и открытыми технологическими установками представлено на рис. 3. Наибольшая средняя площадь застройки на предприятиях машиностроения составляет 587,8 тыс. м² (здания и сооружения) и 413,6 тыс. м² (открытые технологические установки). Наименьшую площадь застройки зданиями и сооружениями имеют предприятия легкой промышленности — 21,1 тыс. м², а технологическими установками — на предприятиях транспорта — 18,7 тыс. м². Средние значения площади застройки по всем предприятиям составляют 155 тыс. м² (здания и сооружения) и 94 тыс. м² (технологические установки).

Численность персонала на предприятиях черной металлургии достигает наибольших значений — в среднем 14,4 тыс. человек, из которых в наиболее загруженную смену работает 5,7 тыс. человек. Меньше всего работающих на предприятиях легкой промышленности — в среднем 208 и 154 человека соответственно. Средние значения данных показателей по всем предприятиям составляют 1567 человек общей численности и 678 человек в наиболее загруженную смену.

Наибольшая масса пожароопасных, пожаровзрывоопасных и взрывоопасных веществ, обращающихся в наружных технологических установках, наблюдается на предприятиях электроэнергетики — в среднем 177 тыс. тонн, а наименьшая масса таких веществ — на предприятиях машиностроения и металлообработки — в среднем 90 тонн. Среднее значение данного показателя по всем предприятиям составляет 98 тыс. тонн.

Средняя площадь зданий и сооружений, отнесенных к V степени огнестойкости, по всем предприятиям составляет 5 тыс. м². Наибольшее значение этот показатель достигает на предприятиях электроэнергетики — в среднем 10,1 тыс. м², а на предприятиях цветной металлургии — 138 м².

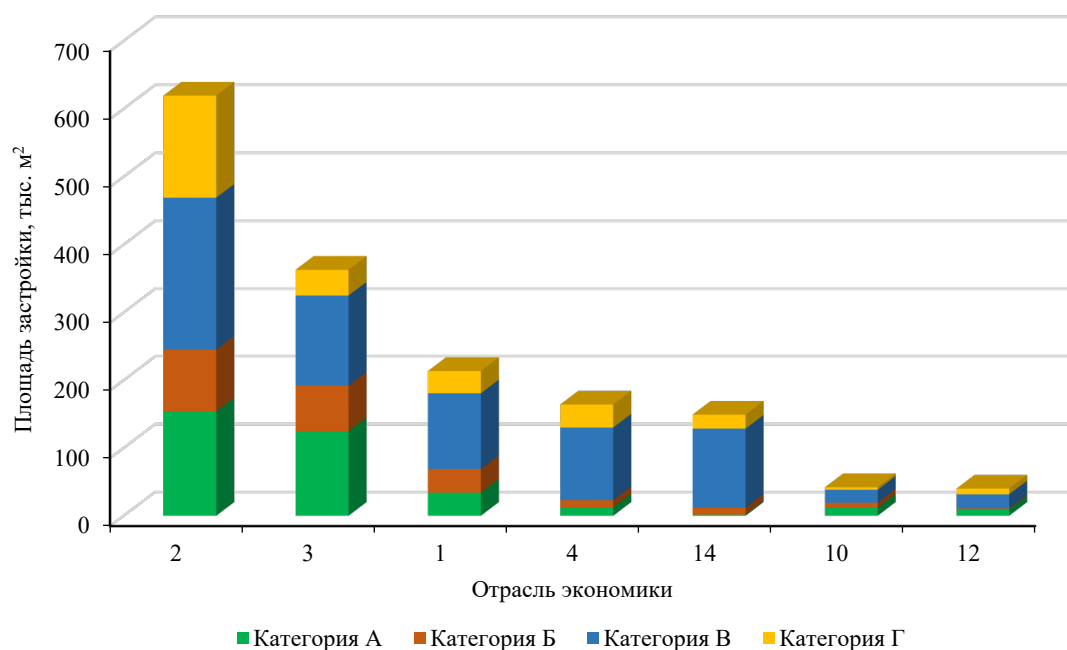


Рис. 4. Площадь застройки предприятий зданиями (сооружениями), отнесенным к определенным категориям по взрывопожароопасности, по отраслям экономики. Названия отраслей экономики приведены в подписи к рис. 1.

На рис. 4 представлено распределение отраслей экономики по площади застройки предприятий зданиями (сооружениями), отнесенными к определенным категориям по взрывопожароопасности. Наибольшая средняя площадь застройки наблюдается на предприятиях машиностроения и металлообработки — 154 тыс. м² для категории А, для категории Б — 91 тыс. м², для категории В — 224 тыс. м², для категории Г — 150 тыс. м². Средняя площадь застройки для всех предприятий в указанных категориях составляет 52, 63, 91 и 36 тыс. м² соответственно.

Среднее количество пожаров за 5 лет на предприятиях, где созданы объектовые подразделения пожарной охраны, составляет 1,2 пожара на одно предприятие. На предприятиях черной металлургии произошло наибольшее количество пожаров — в среднем 11,5 пожара за 5 лет, в то время как на предприятиях легкой промышленности зафиксировано наименьшее число — в среднем 0,07 пожара.

Среднее расстояние до территориального подразделения пожарной охраны, прибывающего на производственный объект в соответствии с расписанием выездов, составляет 12,6 км. Наибольшее расстояние зафиксировано для предприятий химической и нефтехимической промышленности — в среднем 28,7 км, тогда как наименьшее расстояние наблюдается на предприятиях машиностроения — в среднем 3,5 км.

Результаты исследования. Исходя из результатов проведенного анализа для оценки уровня пожарной опасности производственных объектов разработан безразмерный вычислительный комплекс $U_{\text{по}}$, который вычисляется по формуле:

$$U_{\text{по}} = \left(1 + (S_1 + S_2)^{-1}\right)^{-1}. \quad (1)$$

Безразмерный комплекс S_1 , входящий в (1), характеризует уровень пожарной опасности отрасли производства, к которой относится рассматриваемый производственный объект. Для вычисления S_2 используется формула:

$$S_1 = w_1 \frac{N_{\text{пож}}}{N_{\text{пож.ср}}} + w_2 \frac{N_{\text{гт}}}{N_{\text{гт.ср}}} + w_3 \frac{Y_{\text{м}}}{Y_{\text{м.ср}}}, \quad (2)$$

где w_i — безразмерные весовые множители, приняты равными 2/19; $N_{\text{пож}}$, $N_{\text{гт}}$, $Y_{\text{м}}$ — показатели, характеризующие пожарную опасность отрасли производства, приведены в таблице 1; $N_{\text{пож.ср}}$, $N_{\text{гт.ср}}$, $Y_{\text{м.ср}}$ — средние значения показателей пожарной опасности по всем отраслям производства.

Таблица 1

Показатели, характеризующие пожарную опасность отрасли производства

№ п/п	Обозначение	Наименование показателя	Единица измерения
1	$N_{\text{пож}}$	Количество пожаров в течение года в расчете на 100 предприятий	ед.
2	$N_{\text{гт}}$	Количество людей, пострадавших при пожарах, в расчете на 1 000 пожаров	чел.
3	$Y_{\text{м}}$	Средний ущерб от одного пожара	руб.

Безразмерный комплекс S_2 описывает технико-экономические и оперативные характеристики конкретного производственного объекта. Для вычисления S_2 используется формула:

$$S_2 = w_4 \frac{S_{\text{тер}}}{S_{\text{тер.ср}}} + w_5 \frac{S_{\text{зд}}}{S_{\text{зд.ср}}} + w_6 \frac{S_{\text{уст}}}{S_{\text{уст.ср}}} + w_7 \frac{N_{\text{перс}}}{N_{\text{перс.ср}}} + w_8 \frac{N_{\text{загр}}}{N_{\text{загр.ср}}} + w_9 \frac{M_{\text{сред}}}{M_{\text{сред.ср}}} + w_{10} \frac{S_{\text{огн}}}{S_{\text{огн.ср}}} + w_{11} \frac{S_{\text{А}}}{S_{\text{А.ср}}} + w_{12} \frac{S_{\text{Б}}}{S_{\text{Б.ср}}} + w_{13} \frac{S_{\text{В}}}{S_{\text{В.ср}}} + w_{14} \frac{S_{\text{Г}}}{S_{\text{Г.ср}}} + w_{15} \frac{N_{\text{пож}}}{N_{\text{пож.ср}}} + w_{16} \frac{L_{\text{ПО}}}{L_{\text{ПО.ср}}}, \quad (3)$$

где w_i — безразмерные весовые множители, приняты равными 1/19; $S_{\text{тер}}$, $S_{\text{зд}}$, $S_{\text{уст}}$, $N_{\text{перс}}$, $N_{\text{загр}}$, $M_{\text{сред}}$, $S_{\text{огн}}$, $S_{\text{А}}$, $S_{\text{Б}}$, $S_{\text{В}}$, $S_{\text{Г}}$, $N_{\text{пож}}$, $L_{\text{ПО}}$ — показатели, характеризующие технико-экономические и оперативные характеристики производственного объекта (таблица 2); $S_{\text{тер.ср}}$, $S_{\text{зд.ср}}$, $S_{\text{уст.ср}}$, $N_{\text{перс.ср}}$, $N_{\text{загр.ср}}$, $M_{\text{сред.ср}}$, $S_{\text{огн.ср}}$, $S_{\text{А.ср}}$, $S_{\text{Б.ср}}$, $S_{\text{В.ср}}$, $S_{\text{Г.ср}}$, $N_{\text{пож.ср}}$, $L_{\text{ПО.ср}}$ — средние значения показателей для производственных объектов, на которых созданы объектовые подразделения пожарной охраны.

Таблица 2

Показатели, характеризующие технико-экономические и оперативные характеристики производственного объекта

№ п/п	Обозначение	Наименование показателя	Единица измерения
1	$S_{\text{тер}}$	Площадь территории	га
2	$S_{\text{зд}}$	Площадь застройки зданиями и сооружениями	м ²
3	$S_{\text{уст}}$	Площадь застройки открытыми технологическими установками	м ²
4	$N_{\text{перс}}$	Общая численность персонала	чел.
5	$N_{\text{загр}}$	Численность персонала объекта, работающего на предприятии в самую загруженную смену	чел.
6	$M_{\text{сред}}$	Масса единовременно обращающихся в наружных технологических установках пожароопасных, пожаровзрывоопасных и взрывоопасных технологических сред	тонн
7	$S_{\text{огн}}$	Площадь зданий и сооружений, относящихся к I степени огнестойкости	м ²
8–11	$S_{\text{А}}$, $S_{\text{Б}}$, $S_{\text{В}}$, $S_{\text{Г}}$	Площадь застройки зданиями (сооружениями), отнесенными к категориям взрывопожароопасности А, Б, В, Г	м ²
12	$N_{\text{пож}}$	Количество пожаров на предприятии за 5 лет	ед.
13	$L_{\text{ПО}}$	Расстояние до территориального подразделения пожарной охраны, прибывающего на производственный объект в соответствии с расписанием выездов	км

Распределение значений комплекса $U_{по}$ для производственных объектов, на которых созданы подразделения пожарной охраны, описывается нормальным законом со средним значением $m = 0,47$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,19$. Критерии отнесения производственного объекта к определенной категории пожарной опасности приведены в таблице 3.

Таблица 3

Уровни пожарной опасности производственного объекта и соответствующие им значения комплекса $U_{по}$

Категория пожарной опасности	Критерий	Диапазон значений
Низкая	$0 \leq U_{по} < m$	$0 \leq U_{по} < 0,47$
Средняя	$m \leq U_{по} < m + \sigma$	$0,47 \leq U_{по} < 0,66$
Высокая	$m + \sigma \leq U_{по} < m + 2\sigma$	$0,66 \leq U_{по} < 0,85$
Крайне высокая	$m + 2\sigma \leq U_{по} < 1$	$0,85 \leq U_{по} < 1$

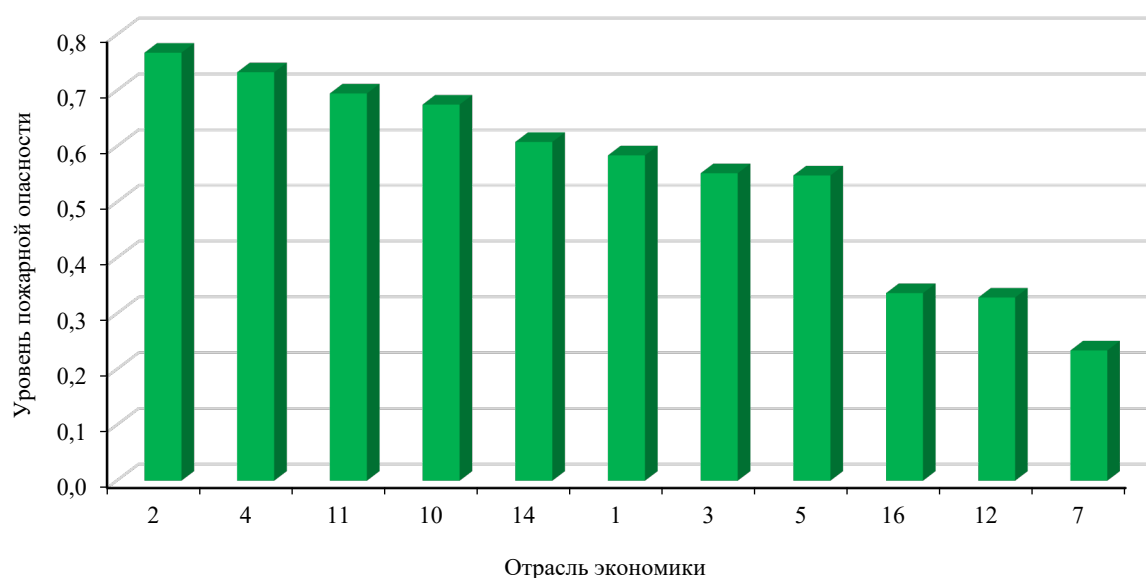


Рис. 5. Распределение отраслей экономики по уровню пожарной опасности.

Названия отраслей экономики приведены в подписи к рис. 1

Средние значения комплекса $U_{по}$ для отраслей экономики приведены на рис. 5. Как видно из рисунка, в категорию высокой пожарной опасности попадает черная металлургия, машиностроение и металлообработка, цветная металлургия и топливная промышленность. В категорию средней пожарной опасности входят следующие отрасли: судостроение и судоремонт, электроэнергетика, химическая и нефтехимическая промышленность, лесная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность. Остальные отрасли относятся к категории низкой пожарной опасности.

В качестве примера рассчитан уровень пожарной опасности для предприятий электроэнергетики. Значение технико-экономических и оперативных характеристик предприятия приведены в таблице 4.

Таблица 4

Значения показателей, характеризующих состояние пожарной опасности производственного объекта электроэнергетики

Показатель	Значение	Показатель	Значение
Y_1 , га	17,0	Y_8 , тыс. м ²	2,6
Y_2 , тыс. м ²	33,5	Y_9 , тыс. м ²	0,5
Y_3 , тыс. м ²	0,0	Y_{10} , тыс. м ²	8,0
Y_4 , чел.	236,0	Y_{11} , тыс. м ²	12,5
Y_5 , чел.	184,0	Y_{12} , ед.	0,0
Y_6 , тыс. тонн	2540,5	Y_{13} , км	13,0
Y_7 , тыс. м ²	0,0		

По формулам (2) и (3) вычислены значения комплексов $S_1 = 0,962$ и $S_2 = 1,424$. Значение вычислительного комплекса $U_{по}$ определено по формуле (1), $U_{по} = 0,705$. В соответствии с таблицей 3, предприятие следует отнести к категории высокой пожарной опасности, тогда как в целом отрасль электроэнергетики относится к категории средней пожарной опасности (рис. 5).

Обсуждение. В ходе исследования авторы поставили цель выявить уровень пожарной опасности на производственных объектах с учетом технико-экономических особенностей конкретных предприятий. Реализованная модель позволяет оценить риски с учетом специфики различных отраслей. Основные результаты показывают, что уровень пожарной опасности зависит от сферы деятельности, причем в некоторых отраслях, таких как черная и цветная металлургия, машиностроение и металлообработка, топливная промышленность, этот уровень значительно выше среднего.

Созданный безразмерный вычислительный комплекс — $U_{по}$ — дает возможность глубже анализировать пожарную опасность производственных объектов, учитывая различные факторы, включая расстояние до территориального подразделения пожарной охраны, массу обращающихся пожароопасных, пожаровзрывоопасных и взрывоопасных технологических сред, площадь зданий и сооружений, отнесенных к определенным категориям взрывопожароопасности, количество пожаров на предприятии и др. Данные факторы следует учитывать при определении ресурсной потребности объектовых подразделений пожарной охраны.

Таким образом, результаты работы не только подтверждают существующие опасности в сфере пожарной безопасности, но и подчеркивают необходимость адаптации системы к условиям конкретных производств для эффективного управления рисками. Это создает базу для дальнейших рекомендаций и действий, направленных на снижение количества и последствий пожаров.

Заключение. Полученные результаты были использованы для подготовки новой редакции Методики расчета численности и технической оснащенности подразделений пожарной охраны, создаваемых для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ в организациях, утвержденной приказом МЧС России от 15 октября 2021 г. № 700. В новой редакции Методики предложено рассчитывать радиус обслуживания объектового подразделения пожарной охраны в зависимости от уровня пожарной опасности производственного объекта, определяемого показателем $U_{по}$. Пожарная опасность объекта также учитывается для определения требуемого расхода огнетушащего средства на наружное пожаротушение при расчете состава сил и средств пожарной охраны. Кроме того, площадь участков контроля за противопожарным состоянием при осуществлении профилактики пожаров определяется в зависимости от значения комплексного показателя $U_{по}$.

Результаты исследований по вопросам нормирования ресурсов объектовой пожарной охраны будут детально рассмотрены в серии последующих публикаций.

Список литературы / References

1. Смирнов А.В. О структуре управления пожарной безопасностью на типовом объекте химической промышленности. *Проблемы техносферной безопасности: материалы международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов*. 2017;(6):426–430.
- Smirnov AV. On Fire Safety Management Structure at a Typical Chemical Industry Facility. In: *Problems of Technosphere Safety: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists*. 2017;(6):426–430. (In Russ.)
2. Федоров В.А. Оценка пожаровзрывобезопасности предприятий металлургической промышленности в части производств, связанных с обращением горючих пылей. *Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования*. 2021;3(10):456–460.
- Fedorov VA. Assessment of Fire and Explosion Safety of Metallurgical Industry Enterprises in Terms of Production Related to the Handling of Combustible Dust. *Fire and Technosphere Safety: Problems and Ways of Improvement*. 2021;3(10):456–460. (In Russ.)
3. Morón W, Ferens W. Analysis of Fire and Explosion Hazards Caused by Industrial Dusts with a High Content of Volatile Matter. *Fuel*. 2024;355:129363. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129363>
4. Полянин А.В. Повышение уровня безопасности участников тушения пожаров на предприятиях металлургической промышленности. В: *Труды III Международной научно-практической конференции «Научные исследования 2022», Пенза, 15 сентября 2022 года*. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.); 2022. С. 30–32.
- Polyanin AV. Increasing the Level of Safety for Participants of Fire Extinguishing at the Facilities of the Metallurgical Industry. In: *Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference “Scientific Research 2022”, Penza, September 15, 2022*. Penza: Science and Education (IP Gulyaev G.Yu.); 2022. P. 30–32. (In Russ.)
5. Корнюхин И.С., Ермилов А.В. Анализ статистических данных по пожарам на объектах деревообрабатывающей промышленности. В: *Труды «Актуальные вопросы пожаротушения», Иваново, 15 мая 2020 года*. 2020. Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»; С. 68–73.

Kornukhin IS, Ermilov AV. Analysis of Statistical Data on Fires in the Woodworking Industry. In: *Proceedings "Current Issues of Firefighting"*, Ivanovo, May 15, 2020. 2020. Ivanovo: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters"; P. 68–73. (In Russ.)

6. Кундышева М.В. Анализ источников опасности на деревообрабатывающем предприятии. В: *Труды Международной научно-практической конференции «Арктика: современные подходы к производственной и экологической безопасности в нефтегазовом секторе»* Тюмень, 29 ноября 2023 года. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2024. С. 109–112.

Kundysheva MV. Analysis of Sources of Danger in a Woodworking Enterprise. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "The Arctic: Modern Approaches to Industrial and Environmental Safety in the Oil and Gas Sector"* Tyumen, November 29, 2023. Tyumen: Tyumen Industrial University; 2024. P. 109–112. (In Russ.)

7. Алешков М.В., Пушкин Д.С., Колбасин А.А. Особенности развития и тушения пожаров на объектах электроэнергетики. *Технологии техносферной безопасности*. 2010;(3(31));9.

Aleshkov MV, Pushkin DS, Kolbasin AA. Features of Development and Suppression of Fires on Objects of Power. *Technosphere Security Technologies*. 2010;(3(31));9. (In Russ.)

8. Мальцев А.В. Анализ причин возникновения пожаров на объектах нефтеперерабатывающей промышленности. *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*. 2017;1(8):278–280.

Maltsev AV. Analysis of the Causes of Fires at Oil Refining Facilities. *Fire Safety: Problems and Prospects*. 2017;1(8):278–280. (In Russ.)

9. Пшеничный Д.С. Анализ причин возникновения и методов ликвидации пожаров на объектах газовой промышленности. В: *Труды X Всероссийской научно-технической конференции молодых исследователей «Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности»*, Волгоград, 24–29 апреля 2023 года. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет; 2023. С. 260–262.

Pshenichnyi DS. Analysis of the causes and Methods of Extinguishing Fires at Gas Industry Facilities. In: *Proceedings of the X All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Researchers "Actual Problems of Construction, Housing and Communal Services and Technosphere Safety"*, Volgograd, April 24–29, 2023. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2023. P. 260–262. (In Russ.)

10. Федоров А.В., Оспанов К.К., Ломаев Е.Н., Алешков А.М., Минцаев М.Ш. Анализ статистики и причинно-следственных связей аварий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности России и Казахстана. *Технологии техносферной безопасности*. 2021;(2(92)):156–168. <https://doi.org/10.25257/TTS.2021.2.92.156-168>

Fedorov AV, Ospanov KK, Lomaev EN, Aleshkov AM, Mintsaeve MS. Statistical and Causal Factors Analysis of Accidents at Oil Refining and Petrochemical Industry of Russia and Kazakhstan. *Technosphere Security Technologies*. 2021;(2(92)):156–168. (In Russ.) <https://doi.org/10.25257/TTS.2021.2.92.156-168>

11. Kalach AV, Cherepakhin AM, Sushko EA, Kalach EV, Sysoeva TP. The Dangerous Fire Factors Formation the on an Oil and Gas Complex Objects When Using the Combustible Environment on the Tetrachlormethane Basis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;459:042046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/4/042046>

12. Gvozdev E. Development of an Integrated Safety Sistem for Production Facilities: the Problem Statement and the Proposed Solution. *Reliability: Theory & Applications*. 2024;19(1(77)):474–487. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2024-177-474-487>

13. Aldiyansyah Aldiyansyah, Al Amin Siharis, Abriansyah Abriansyah, Fitrani Amin, Aqsal Ramadhan. Kegiatan Sosialisasi Keselamatan Dan Kesehatan Kerja Pada Tambang Batu Gamping di PT. Diamond Alfa Propertindo Kabupaten Buton Tengah. *Anoa: Jurnal Pengabdian Masyarakat Fakultas Teknik*. 2023;2(1):58–62. <https://doi.org/10.51454/anoa.v2i01.453>

14. Savelyev AP, Glotov SV, Chugunov MN, Enaleeva SA. Fire Safety at Medium-Size Machine-Building Facilities. *Russian Engineering Research*. 2022;42(4):373–375. <https://doi.org/10.3103/S1068798X22040268>

15. Марахов П.А., Порошин А.А., Стрельцов О.В., Кондашов А.А., Бобринев Е.В., Удавцова Е.Ю. Формирование информационной базы для расчета ресурсного обеспечения пожарной охраны по защите организаций от пожаров. *Современные проблемы гражданской защиты*. 2024;(3(52)):22–29. URL: https://ntp.edufire37.ru/uploads/2024/09/%D0%A1%D0%9F%D0%93%D0%97_352_2024.pdf (дата обращения: 11.05.2025).

Marakhov PA, Poroshin AA, Streltsov OV, Kondashov AA, Bobrinev EV, Udavtsova EY. Formation of an Information Base for Calculating the Resource Provision of Fire Protection to Protect Organizations from Fires. *Modern Problems of Civil Protection*. 2024;(3(52)):22–29. (In Russ.) URL: https://ntp.edufire37.ru/uploads/2024/09/%D0%A1%D0%9F%D0%93%D0%97_352_2024.pdf (accessed: 11.05.2025).

Об авторе:

Андрей Александрович Кондашов, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского ордена «Знак почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России» (143903, Российская Федерация, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), akond2008@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Andrey A. Kondashov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher of the All-Russian Research Institute of Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (12, VNIPO, Balashikha, mkr., 143903, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), akond2008@mail.ru

Conflict of Interest Statement: the author declares no conflict of interest.

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 02.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 24.06.2025

Принята к публикации / Accepted 10.07.2025

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 504.054, 504.53

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-196-207>

Исследование сорбции тяжелых металлов наземными экосистемами на участках города Чита с различной антропогенной нагрузкой

Т.В. Турушева  , В.Е. Есипов

Забайкальский государственный университет, г. Чита, Российская Федерация

 turusheva_tanya@mail.ru

EDN: YKMQQT

Аннотация

Введение. Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами представляет собой одну из наиболее актуальных экологических проблем, поскольку эти вещества негативно влияют на экосистемы и здоровье живых организмов. В литературе активно исследуется вопрос о накоплении тяжелых металлов растениями в урбоэкосистемах, однако многие аспекты данной проблемы остаются недостаточно раскрытыми. Например, существующие исследования не всегда учитывают влияние различных факторов окружающей среды на процесс сорбции металлов. Это создает пробелы в понимании механизмов взаимодействия растений и загрязняющих веществ. Настоящее исследование нацелено на детальное изучение зависимости сорбции тяжелых металлов сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris*) от уровня загрязнения среды. Авторы ставят задачу определить, как изменяются показатели накопления металлов в зависимости от условий произрастания, что позволит более точно оценить роль данного растения в экологии городских территорий.

Материалы и методы. Исследования проводились на территории города Чита Забайкальского края. Сосна обыкновенная является широко распространенным видом рода сосна в Забайкальском крае, поэтому материалом для исследования послужила кора сосны обыкновенной, а также почвенные образцы, взятые на участках города Чита, отличающихся интенсивностью антропогенной нагрузки. Выбор участков для отбора материала осуществлялся, в том числе, по показателю комплексного загрязнения атмосферного воздуха (ИЗА5) на территории города Чита. После отбора пробы подвергались квартованию, сушке и измельчению до мелкозернистого состояния, после чего кора и почва подвергались термической обработке в муфельной печи при 600 °С. Обожженную почву и золу коры сосны исследовали по методикам, общепринятым в химии древесины, с использованием спектрометрического метода на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu AA–6200. Кислотность определяли потенциометрическим методом в хлоридной вытяжке. Для этого использовали 1М раствор KCl (pH = 6,0), а также стандартные буферные растворы (pH 4,01; 6,86; 9,18) для калибровки прибора. Суспензии готовили, добавляя к 30 г почвы 75 мл экстрагента, перемешивали в течение одной минуты и измеряли pH после стабилизации показаний. Параллельно выполняли контрольный эксперимент без образца почвы.

Результаты исследования. Проведенный анализ полученных данных по сезонному изменению зольности и влажности коры сосны обыкновенной показал, что они незначительно возрастают в летне-осенний период. В ходе работы была получена динамика распределения тяжелых металлов в почве и коре сосны обыкновенной в зависимости от сезона года. Выяснено, что наибольшее содержание меди в почве и в коре сосны обыкновенной наблюдается на участке Батарейной сопки, превышая ПДК в 11 раз, далее ул. Гранитная, где ПДК превышен в 5 раз. Высокое содержание цинка в почве сосны обыкновенной наблюдается сразу в трех точках: Сосновый бор, Парк Памяти и Батарейная сопка, с превышением ПДК в 1,77; 1,74 и 1,5 раза соответственно. Содержание свинца в почве на всех семи точках находится в пределах ПДК. Сезонных изменений содержания тяжелых металлов в почве и коре не наблюдается. Таким образом, в ходе исследования была выявлена зависимость содержания тяжелых металлов в почве и коре сосны обыкновенной от степени антропогенной загруженности районов города Чита Забайкальского края.

Обсуждение. Результаты исследования показали зависимость содержания тяжелых металлов в исследованных образцах почвы и коры сосны обыкновенной от степени интенсивности антропогенной нагрузки. Таким образом, сосна обыкновенная представляет собой ценный объект для мониторинга загрязнения тяжелыми металлами, так как сочетает в себе высокую чувствительность к техногенному воздействию, устойчивость к неблагоприятным условиям и долговременную способность накапливать токсиканты. Полученные данные обосновывают целесообразность включения этого вида в системы экологического контроля, особенно в регионах с развитой промышленностью и транспортной инфраструктурой. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку стандартизированных методик использования сосны в биоиндикации, а также на изучение её фиторемедиационного потенциала в условиях хронического загрязнения.

Заключение. Проведенное исследование расширяет понимание механизмов миграции и аккумуляции тяжелых металлов в урбанизированных экосистемах, особенно в условиях резко-континентального климата. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации городского планирования, минимизации негативного воздействия на здоровье населения и разработки стратегий устойчивого развития территорий с высокой антропогенной нагрузкой.

Ключевые слова: тяжелые металлы, загрязнение почвы, сосна обыкновенная, мониторинг, негативное воздействие

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников лаборатории физико-химических исследований природных объектов и синтезированных веществ Финансово-хозяйственного института проблем освоения Сибири и Востока Забайкальского государственного университета за помощь в получении и обсуждении результатов.

Для цитирования. Турушева Т.В., Есипов В.Е. Исследование сорбции тяжелых металлов наземными экосистемами на участках города Чита с различной антропогенной нагрузкой. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(3):196–207. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-196-207>

Original Empirical Research

Investigation of the Sorption of Heavy Metals by Terrestrial Ecosystems in Areas of the City of Chita with Various Anthropogenic Loads

Tatyana V. Turusheva , Vyacheslav E. Esipov

Transbaikal State University, Chita, Russian Federation

✉ turusheva_tanya@mail.ru

Abstract

Introduction. Environmental pollution with heavy metals is one of the most pressing environmental problems, as these substances can have a negative impact on ecosystems and living organisms. In particular, the accumulation of heavy metals in plants in urban ecosystems is an issue that has been widely studied, but many aspects of the problem remain unintelligible. For example, existing research does not always consider the influence of different environmental factors on metal sorption processes. This creates gaps in understanding the mechanisms of interaction between plants and pollutants. The current study aims to investigate the dependence of heavy metal sorption by the Scots pine (*Pinus sylvestris*) on the level of environmental pollution. The goal is to determine how metal accumulation indicators change depending on the growing conditions, allowing for a more accurate assessment of this plant's role in urban ecology.

Materials and Methods. The research was conducted in the city of Chita in the Trans-Baikal Territory. Scots pine is a widespread species of pine in this region, therefore, the bark of the Scots pine, as well as soil samples from sites in Chita that were exposed to high levels of human activity served as the basis for the study. Selection of sites was based, among other factors, on complex air pollution index (API5) in Chita. After collecting samples, they were quartered, dried, and ground into a fine powder. Then, the bark and soil were heated in a muffle furnace at 600°C. The burnt soil and pine bark ash were analyzed using methods commonly used in wood chemistry, including a spectrometric analysis on a Shimadzu AA-6200 atomic absorption spectrometer. The acidity was determined by the potentiometric method in a chloride extract. For this purpose, a 1M KCl solution (pH = 6.0) was used, as well as standard buffer solutions (pH 4.01; 6.86; 9.18) for instrument calibration. Suspensions were prepared by adding 75 ml of extractant to 30 g of soil, stirring for one minute. The pH was then measured after the readings stabilized. In parallel, a control experiment was conducted without a soil sample.

Results. Analysis of the data on seasonal changes in the ash and moisture content of Scots pine bark showed that they slightly increased in the summer and autumn months. During the study, we also obtained data on the distribution of heavy metals in the soil and bark of Scots pine depending on the season of the year. It was found that the highest levels of copper in the soil and bark of Scots pine were observed in Batareinaya Sopka, exceeding the maximum permissible concentration by 11 times, followed by Granitnaya Street, where the maximum permissible concentration was exceeded

by 5 times. Zinc levels in the soil were high at three locations: Sosnovy Bor, Memory Park, and Batareinaya Sopka, exceeding the maximum permissible concentration by 1.77, 1.74 and 1.5 times, respectively. Lead levels were within the MPC at all seven locations. There were no seasonal changes in the content of heavy metals in the soil and bark. Thus, the study revealed the dependence of the content of heavy metals in the soil and bark of the Scots pine on the degree of anthropogenic load in the districts of Chita in the Trans-Baikal Territory.

Discussion. The results of the study demonstrated the correlation between the concentration of heavy metals in soil and bark samples of Scots pine and the degree of anthropogenic load. Therefore, the Scots pine can be considered a valuable object for monitoring heavy metal pollution, as it combines high sensitivity to man-made effects, resistance to adverse conditions and long-term ability to accumulate toxic substances. The data obtained support the idea of including the Scots pine in environmental monitoring systems, particularly in areas with developed industrial and transportation infrastructure. Future research could focus on developing standardized methods for using pine in bioindication, as well as studying its phytoremediation potential in conditions of chronic pollution.

Conclusion. The study expands our understanding of the mechanisms behind the migration and accumulation of heavy metals in urban ecosystems, especially in areas with a harsh continental climate. The findings can be used to improve urban planning, reduce the negative impact on public health, and develop sustainable strategies for areas with high levels of anthropogenic load.

Keywords: heavy metals, soil pollution, scots pine, monitoring, negative impact

Acknowledgements. The authors would like to thank the staff of the Laboratory of Physical-Chemical Research of Natural Objects and Synthesized Substances of the Financial and Economic Institute for the Development of Siberia and the East of Transbaikal State University for their help in obtaining and discussing the results.

For Citation. Turusheva TV, Esipov VE. Investigation of the Sorption of Heavy Metals by Terrestrial Ecosystems in Areas of the City of Chita with Various Anthropogenic Loads. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(3):196–207. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-196-207>

Введение. Одной из актуальных проблем современной экологии является загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами. Эти вещества [1] относятся к первому и второму классам опасности, так как оказывают серьезное негативное воздействие на биологические процессы в экосистемах [2]. Кроме того, тяжелые металлы способны накапливаться в живых организмах, почве и водоемах [3]. Попадая в организм человека через желудочно-кишечный тракт, дыхательные пути или кожу в малых дозах эти вещества незаметны, так как лишены вкуса, запаха и цвета. Однако их способность накапливаться [4] годами в костях, печени или мозге человека может вызывать тяжелые заболевания, такие как неврологические расстройства и онкологию. В последнее время в научной литературе наблюдается возрастание интереса к теме аккумуляции тяжелых металлов [5] растениями урбоэкосистем [6]. Автор [7] в своей работе проводит сравнительный анализ накопления тяжелых металлов в листьях, корне и коре караганы древовидной (*Caragana arborescens*) в условиях антропогенного воздействия на территории Забайкальского края. Исследования другого автора показывают [8], что в урбанизированных ландшафтах, особенно вблизи автомагистралей, кора сосны аккумулирует значительные концентрации свинца, кадмия, цинка и меди, выполняя роль своеобразного «депо» для этих загрязнителей. Поскольку город Чита характеризуется горно-котловинным расположением и высоким уровнем загрязнения воздуха, а сосна обыкновенная круглогодично выполняет функцию аккумуляции загрязнителей, оседающих на её хвое и коре, исследование накопления тяжелых металлов в хвойных деревьях для климатических условий Забайкальского края остается недостаточно изученным, что делает данную работу особенно актуальной.

Установлено [9], что место произрастания в значительной степени влияет на количественное содержание тяжелых металлов в растениях. Основными источниками попадания тяжелых металлов в окружающую среду в Забайкальском крае являются промышленность, автотранспортные выбросы, а также частный сектор, использующий уголь для печного отопления. Проблема загрязнения атмосферного воздуха в Забайкальском крае стоит особенно остро, так как город Чита уже несколько лет подряд входит в число городов с наиболее высоким уровнем загрязнения воздушной среды. Эта проблема усугубляется природно-климатическими условиями и горно-котловинным расположением города. Зимой над территорией Забайкальского края господствует сибирский антициклон, для которого характерны низкая температура и отсутствие переноса воздушных масс. В результате над городом Чита возникает температурная инверсия, препятствующая нормальному рассеиванию выбросов. Поэтому мониторинг состояния атмосферного воздуха по приоритетным загрязняющим веществам является необходимым во многих городах [10].

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) представляет значительный интерес в контексте фиторемедиации городских территорий, загрязненных тяжелыми металлами, благодаря ряду уникальных адаптационных механизмов и высокой устойчивости к неблагоприятным экологическим условиям. Будучи вечнозеленым хвойным видом, она круглогодично выполняет функцию аккумуляции загрязнителей [11], особенно эффективно улавливая металлосодержащие аэрозоли и пылевые частицы, оседающие на поверхности хвои.

Кора сосны обыкновенной выступает уникальным биологическим фильтром, играющим значительную роль в накоплении тяжелых металлов в условиях городской среды. В отличие от других тканей дерева, кора обладает выраженной сорбционной способностью благодаря своей пористой структуре, высокому содержанию лигнина и присутствию фенольных соединений, которые активно связывают ионы металлов. Механизм накопления металлов в коре имеет комплексный характер. Первичное осаждение происходит благодаря прямому контакту с атмосферными выбросами — частицами износа шин, тормозных колодок и дорожного покрытия, которые оседают на шероховатой поверхности коры. Вторичное накопление связано с процессами коровой диффузии, когда растворимые формы металлов проникают в наружные слои коры вместе с дождевой влагой или конденсатом, фиксируясь в клеточных стенках благодаря хелатированию органическими кислотами и дубильными веществами.

Таким образом, целью данной работы является установление характера зависимости сорбции тяжелых металлов сосной обыкновенной от степени загрязнения среды произрастания в условиях резко континентального климата и горно-котловинного расположения города Чита Забайкальского края.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования была использована кора сосны обыкновенной и образцы почвы, взятые на семи участках города Читы, которые различаются уровнем антропогенной нагрузки (рис. 1): участок № 1 — парк Пионеров (ул. Журавлёва); участок № 2 — парк Памяти (ул. Петровско-Заводская); участок № 3 — стадион СибВО (ул. Кайдаловская); участок № 4 — Батарейная сопка; участок № 5 — Сосновый бор; участок № 6 — Объездное шоссе; участок № 7 — ул. Гранитная.



Рис. 1. Карта отбора проб

Отбор материала осуществлялся в течение сезонов с весны 2024 года по зиму 2025 года. Пробы коры отбирались с 10–12 деревьев на каждой точке отбора. Верхний сухой слой отбрасывался, после чего находившийся под ним свежий слой аккуратно срезался ножом. Образцы почвы отбирали на расстоянии 1,5 метра от деревьев на глубине 10 см под поверхность.

Пробы подвергались квартованию, сушке и измельчению до мелкозернистого состояния, после чего кора и почва обрабатывались термически в муфельной печи при 600 °С. Обожжённую почву и золу коры сосны обыкновенной исследовали по методикам, принятым в химии древесины [12], используя спектрометрический метод на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu AA–6200. Подготовка проб для анализа на атомно-абсорбционном спектрометре включала взятие навески 5,00 г, её помещение в коническую колбу, смачивание водой и добавление 15 мл соляной химически чистой кислоты. Затем смесь кипятили в течение 2–3 минут, добавляли 5 мл 2М азотной химически чистой кислоты и доводили содержимое колбы до состояния сухих солей. После этого колбы снимали с плиты, добавляли 30 мл 5М соляной кислоты 1:1 и снова кипятили до получения сухих солей, затем снова добавляли HCl 1:1 и кипятили в течение 3 минут. Колбы оставляли остывать до комнатной температуры, затем доводили объем раствора до 200 мл и фильтровали через фильтры синяя лента. Получившийся фильтрат анализировали на приборах Shimadzu AA-6200 и Agilent 240 FS AA. Данные обрабатывались и заносились в таблицы, затем строились диаграммы с указанием ПДК в почве (ГН 2.1.7.2041–06). Кислотность определяли потенциометрическим методом в хлоридной вытяжке, используя 1М раствор KCl (pH = 6,0), а также стандартные буферные растворы (pH 4,01; 6,86; 9,18) для калировки прибора. Суспензию готовили, добавляя к 30 г почвы 75 мл экстрагента, перемешивали в течение минуты и измеряли pH после стабилизации показаний. Параллельно проводили контрольный эксперимент без образца почвы.

Результаты исследования. В ходе работы была проведена оценка влажности и зольности коры сосны обыкновенной, а также влажности почвы. Повышение уровня влажности приводит к увеличению подвижности тяжелых металлов в почве и, как следствие, увеличивает их биологическую доступность для растений (таблицы 1–3).

Таблица 1

Сезонная динамика изменения влажности коры сосны обыкновенной в 2024 г., %

Участок отбора проб	Сезон года			Стандартное отклонение
	Весна	Лето	Осень	
Парк Пионеров	6,4	7,6	8,1	0,8737
Парк Памяти	5,9	7,3	7,9	1,0263
Стадион СибВО	8,3	9,1	10,1	0,9018
Батарейная сопка	10,2	11,3	12,6	1,2014
Сосновый бор	7,3	8,7	9,8	1,2530
Объездное шоссе	6,1	7,5	8,2	1,0693
Ул. Гранитная	8,5	9,2	10,3	0,9074

Таблица 2

Сезонная динамика изменения зольности коры сосны обыкновенной в 2024 г., %

Участок отбора проб	Сезон года			Стандартное отклонение
	Весна	Лето	Осень	
Парк Пионеров	6,7	7,1	6,9	0,2000
Парк Памяти	4,9	5,3	5,5	0,3055
Стадион СибВО	4,8	5,1	5,4	0,3000
Батарейная сопка	5,2	4,5	4,7	0,3606
Сосновый бор	4,9	4,7	5,2	0,2517
Объездное шоссе	3,9	4,2	4,3	0,2082
Ул. Гранитная	4,8	5,0	5,4	0,3055

Анализ полученных данных о влажности и зольности коры сосны показал, что в среднем она характеризуется низкой влажностью на всех участках, за исключением Батарейной сопки и ул. Гранитная. Это может быть обусловлено тем, что указанные участки расположены на некотором удалении от города, что позволяет им получать больше влаги и в меньшей степени терять её под воздействием солнечных лучей. Влажность немного увеличивается в течение года от зимы к осени, в то время как зольность находится примерно на одном уровне на протяжении всего года. Хотя зольность коры непосредственно не способна оказывать влияние на накопление тяжелых металлов, она может воздействовать на этот процесс косвенно, например, через соотношение органических и неорганических веществ в коре, что, в свою очередь, влияет на накопление тяжелых металлов растением [13].

Таблица 3

Сезонная динамика изменения влажности почвы в 2024 г., %

Участок отбора проб	Сезон года			Стандартное отклонение
	Весна	Лето	Осень	
Парк Пионеров	3,0	3,1	3,6	0,3215
Парк Памяти	2,1	2,3	2,5	0,2000
Стадион СибВО	1,7	1,8	2,1	0,2082
Батарейная сопка	2,4	2,5	3,0	0,3215
Сосновый бор	3,0	3,2	3,8	0,4163
Объездное шоссе	3,7	3,9	4,2	0,2517
Ул. Гранитная	2,6	2,7	3,1	0,2646

Согласно полученным данным, влажность почвы на данных участках имеет низкие показатели и совсем немного возрастает в летне-осенний период.

Также важным фактором сорбции тяжелых металлов из почвы является её кислотность. В исследуемом регионе наиболее распространены подзолистые почвы. Их тип предварительно оценивался по морфологическим признакам, таким как цвет и структура, что позволило выделить генетические горизонты. Анализируемые образцы отличались серо-коричневым цветом и наличием мелких агрегатов, что характерно для дерново-подзолистых почв с диапазоном pH 4–7.

Полученные данные представлены в таблице 4.

Таблица 4

Значения pH почвенных вытяжек

Места отбора проб	Значение pH
Парк Пионеров	6,3
Парк Памяти	5,5
Стадион СибВО	6,3
Батарейная сопка	4,9
Сосновый бор	5,3
Объездное шоссе	6,6
Ул. Гранитная	5,6

Проведённые исследования почвенного покрова Читы позволили выявить ряд интересных закономерностей. Особую озабоченность вызывают данные по следующим территориям — Батарейной сопке и Сосновому бору. Здесь зафиксированы аномально низкие значения pH, что для хвойных массивов выглядит особенно неожиданно. Анализ розы ветров и расположения промышленных объектов свидетельствует о том, что эти, казалось бы, естественные экосистемы фактически стали аккумуляторами техногенных загрязнений, поступающих от ТЭЦ, котельных и оживлённых автомагистралей. Стадион СибВО и Объездное шоссе показывают благополучные показатели. Для этих территорий характерны показатели кислотности в диапазоне 6,3–6,6 единиц pH, что согласуется с результатами морфологических исследований почвенного покрова и свидетельствует о его соответствии дерново-подзолистому типу. Улица Гранитная с её умеренно кислыми почвами представляет собой типичный пример урбанизированной территории с преобладанием транспортной нагрузки. Такие результаты требуют дополнительного изучения, особенно с учётом долговременной динамики и возможных последствий для городских экосистем.

При исследовании почвы [14] и коры сосны обыкновенной особое внимание уделялось следующим тяжёлым металлам: Cu, Zn, Pb. Каждому элементу соответствует своя лампа, излучающая свет с определенной длиной волны: медь — 324,7 нм, свинец — 283,3 нм, цинк — 213,9 нм. Полученные лабораторные данные отображены на рис. 2–7.

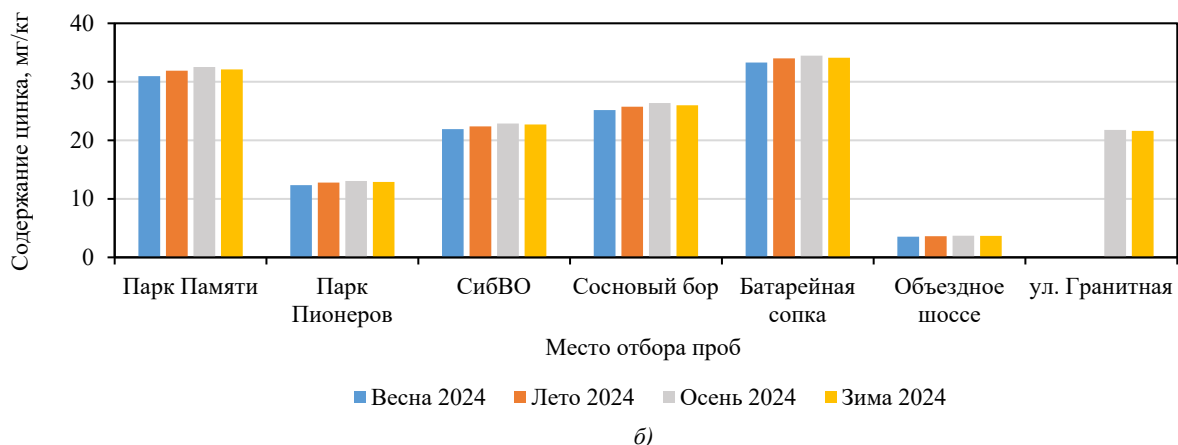
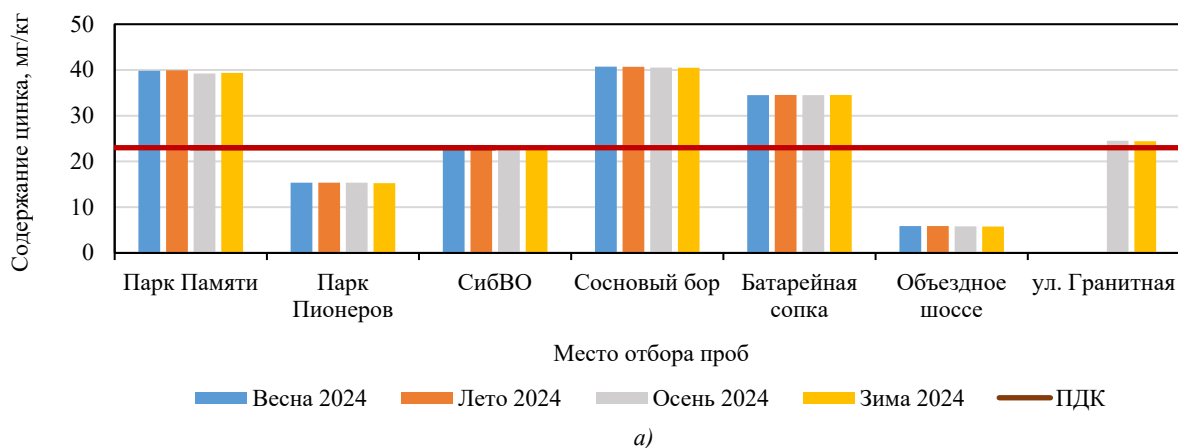


Рис. 2. Содержание цинка: а — в почве; б — в коре

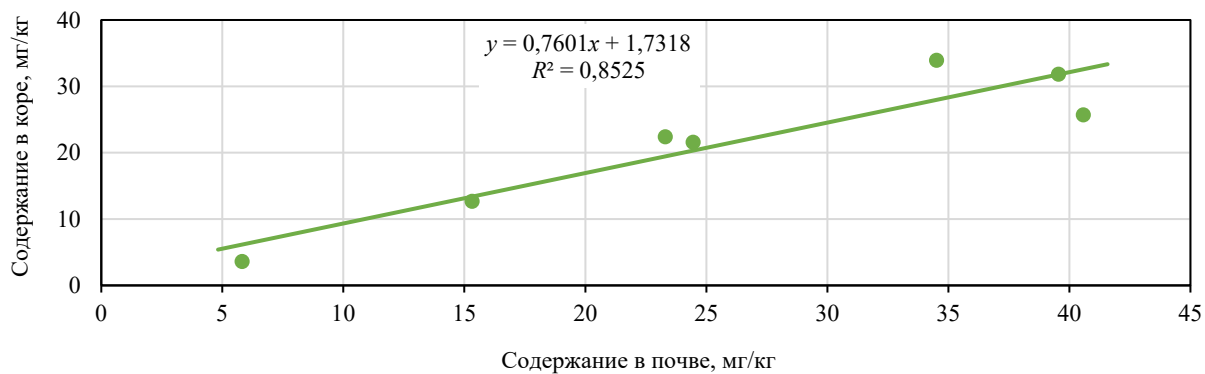
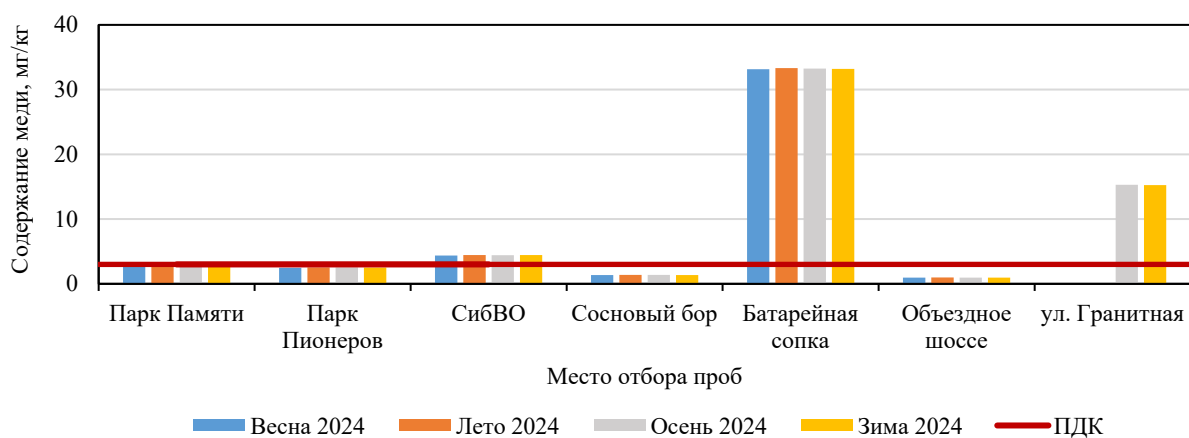
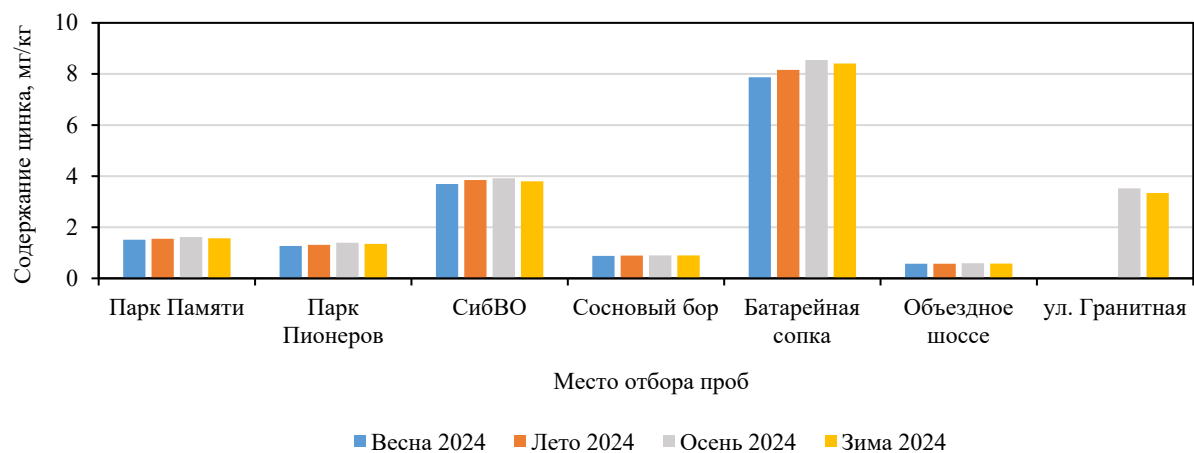


Рис. 3. Зависимость содержания цинка в почве и коре



а)



б)

Рис. 4. Содержание меди: а — в почве; б — в коре

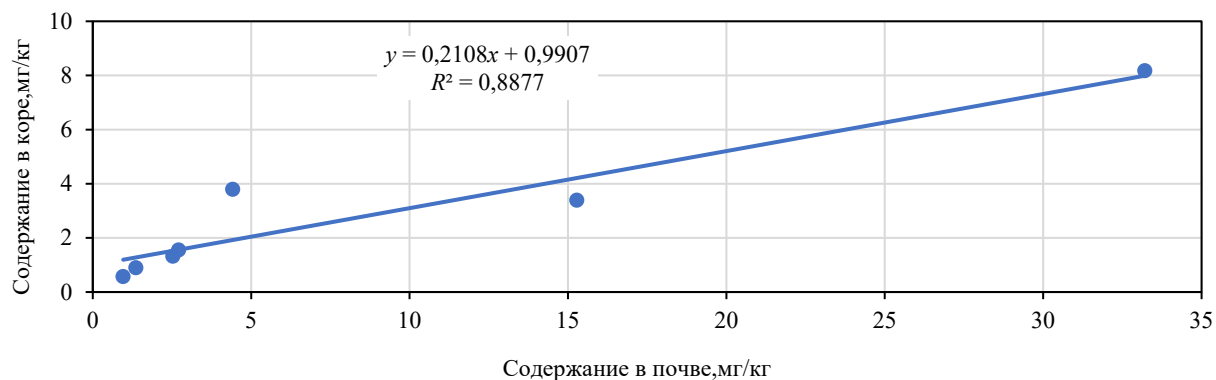
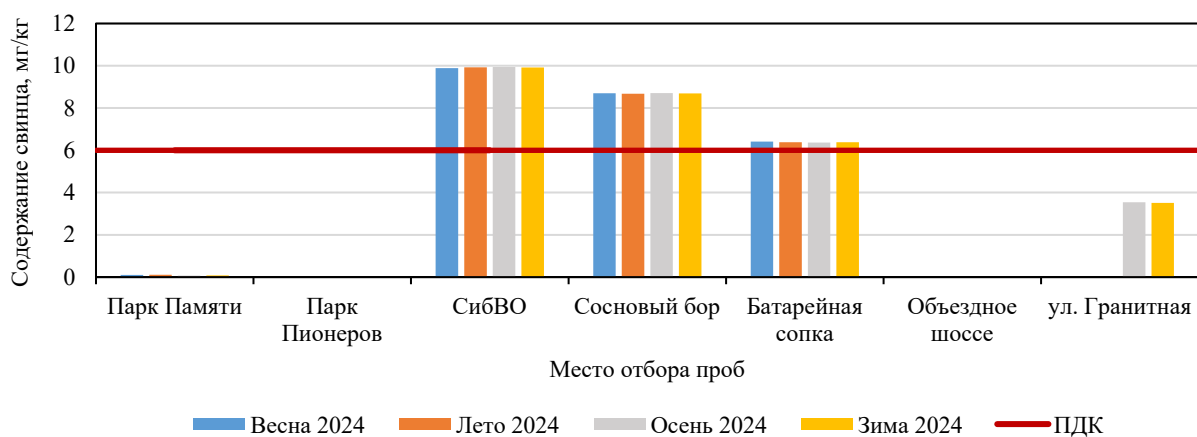
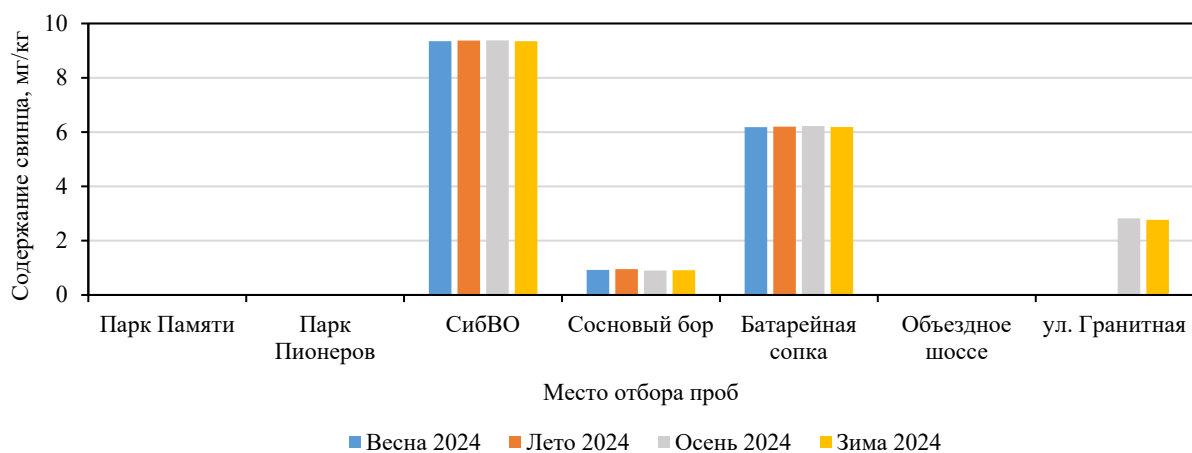


Рис. 5. Зависимость содержания меди в коре от содержания в почве



а)



б)

Рис. 6. Содержание свинца: а — в почве; б — в коре

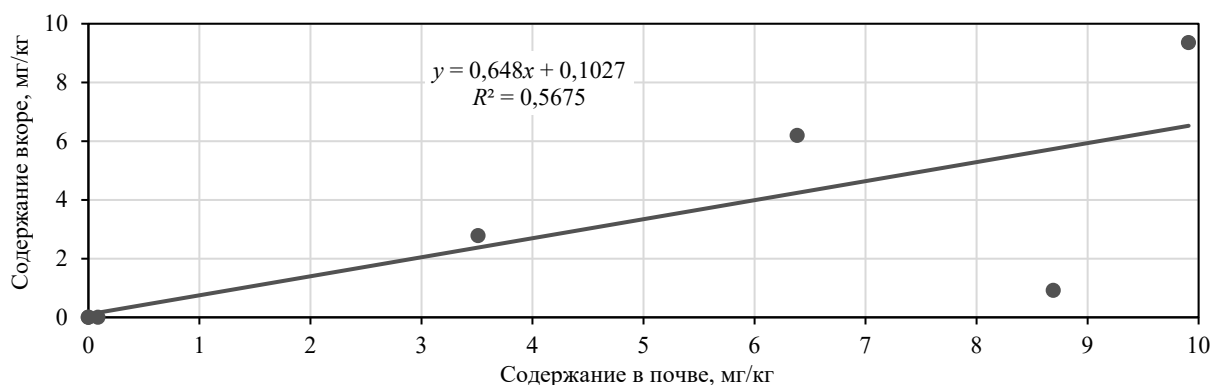


Рис. 7. Зависимость содержания свинца в коре от содержания в почве

Проанализировав полученные результаты, можно заметить, что содержание тяжелых металлов в коре сосны обыкновенной незначительно изменяется от весны к осени в сторону увеличения, тогда как в почве практически остается неизменным. Самое высокое загрязнение почвы наблюдается на участках Батарейной сопки, Соснового Бора, Парка Памяти, ул. Гранитной и СибВО. Анализ позволил выявить зависимость содержания тяжелых металлов в почве и коре сосны обыкновенной от уровня антропогенной нагрузки на соответствующих участках.

В ходе исследований было установлено высокое содержание меди в почве на участке Батарейной сопки, превышающее ПДК в 11 раз. Это может быть обусловлено близким расположением автомастерских и автомобильных дорог, сточные воды с которых могут содержать повышенное количество тяжелых металлов. Участок № 4 характеризуется высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха, так как расположен на подветренной стороне относительно Читинской ТЭЦ-2. В пробах, отобранных в районе ул. Гранитной и стадиона СибВО, содержание меди в почве превышает ПДК в 5 и 1,5 раза соответственно. На остальных участках содержание меди находится в пределах санитарных норм.

Высокое содержание цинка в почве наблюдается сразу в трех точках: Сосновый Бор, Парк Памяти и Батарейная сопка с превышением ПДК в 1,77; 1,74 и 1,5 раза соответственно. Далее выявлено небольшое превышение ПДК в зоне СибВО и ул. Гранитной, на остальных участках показатели находятся в пределах норм. Содержание свинца в почве превышает ПДК в точках СибВО — в 1,6 раз, Сосновый Бор — в 1,45 раз и на Батарейной сопке. В районах Парка Памяти, Парка Пионеров и Обьездного шоссе содержание свинца не обнаружено.

Превышение ПДК по свинцу объясняется негативным воздействием предприятий энергетики и автотранспорта. Так, в зольных уносах на ТЭЦ-2 после сжигания углей содержание свинца на 50–60 % выше порога токсичности. Ветер разносит токсичную пыль с золошлакоотвалов по всем прилегающим участкам [15]. Высокие значения содержания свинца в почве также обусловлены тем, что свинец медленно выводится из почвы — скорость вымывания в разных видах колеблется между значениями 4 и 30 г/га в год — что приводит к повышению его концентрации, особенно в местах с близким расположением автомобильных трасс.

Сезонных изменений содержания тяжелых металлов в почве не наблюдается. В коре было замечено небольшое колебание содержания ТМ, а именно постепенное увеличение от весны к осени и незначительное снижение зимой и весной, что может быть связано с периодом вегетации.

На участке Сосновый Бор содержание свинца в коре почти не обнаружено. Такое несоответствие общей картине может быть объяснено тем, что свинец в почвах с высоким содержанием гумуса прочно связывается [16] с органическим веществом, а также образует фосфаты и карбонаты, становясь практически недоступным для растений. Наряду с этим, на усвоение тяжелых металлов растениями влияет ионный состав почвы. Например, присутствие конкурирующих ионов Ca^{2+} и Al^{3+} может подавлять поглощение свинца корнями [17]. В почвах с повышенным содержанием этих элементов поступление Pb^{2+} в растения снижается, в то время как цинк и медь [18], благодаря специализированным транспортным механизмам, продолжают активно накапливаться.

Самым чистым участком в этом исследовании оказалось Обьездное шоссе, поскольку место отбора проб в данном случае было удалено от источников загрязнения.

Обсуждение. Результаты исследования выявили значительное загрязнение почв тяжелыми металлами (Pb, Zn, Cu) на ряде участков города. Наибольшие превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) зафиксированы на Батарейной сопке (медь — в 11 раз, цинк — в 1,5 раза), улице Гранитной (медь — в 5 раз) и в районе стадиона СибВО (свинец — в 1,6 раза). Эти данные свидетельствуют о высокой антропогенной нагрузке, обусловленной близостью промышленных предприятий, транспортных магистралей и исторически сложившимися источниками загрязнения, такими как свалки и котельные. При этом сезонные колебания содержания тяжелых металлов в почве оказались незначительными, что указывает на хронический характер загрязнения.

Особое внимание в работе уделено влиянию котловинного расположения города Чита на экологическую ситуацию. Горно-котловинный рельеф способствует накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы и почве, ограничивая их естественное рассредоточение. Это усугубляется преобладающими природно-климатическими условиями, такими как резко-континентальный климат с низким уровнем осадков, что усиливает концентрацию поллютантов. Результаты исследования подтвердили, что данные факторы создают неблагоприятные условия для естественного самоочищения экосистем, особенно в зонах с высокой антропогенной нагрузкой.

Важным аспектом исследования стало изучение влияния кислотности почвы на подвижность и аккумуляцию тяжелых металлов. Установлено, что в кислых почвах (pH 4,9–5,6), таких как участки Батарейной сопки и Соснового бора, повышается доступность металлов для растений, что способствует их накоплению в коре сосны. В то же время нейтральные и слабощелочные почвы (pH 6,3–6,6) демонстрировали меньшую подвижность тяжелых металлов, что снижало их биологическую доступность. Эти данные подчеркивают необходимость учета pH при оценке рисков загрязнения и разработке ремедиационных мероприятий.

Таким образом, сосна обыкновенная представляет собой ценный объект для мониторинга загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами в условиях резко-континентального климата и котловинного расположения города Чита, сочетая в себе высокую чувствительность к техногенному воздействию, устойчивость к неблагоприятным условиям и долговременную способность накапливать токсины, тем самым выводя их из круговорота веществ. Полученные данные обосновывают целесообразность включения этого вида в системы экологического контроля, особенно в регионах с развитой промышленностью и транспортной инфраструктурой. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку стандартизированных методик использования сосны в биоиндикации, а также на изучение её фиторемедиационного потенциала в условиях хронического загрязнения.

Заключение. Результаты проведенного исследования показали, что в городе Чита наблюдается высокий уровень загрязнения почв тяжелыми металлами. Они, в свою очередь, аккумулируются растениями, что позволяет временно выводить вредные соединения из круговорота веществ и снижать их негативное влияние на природу. Анализ полученных результатов подтверждает выводы других исследователей [19] о том, что сорбция тяжелых металлов в компонентах окружающей природной среды напрямую зависит от близости расположения и степени интенсивности вредного воздействия источника негативного влияния на окружающую природную среду [20].

Кора сосны, будучи пассивным, но эффективным накопителем тяжёлых металлов, заслуживает особого внимания в стратегиях фиторемедиации городских территорий. Её способность длительно удерживать загрязнители без существенного ущерба для жизнедеятельности дерева делает этот вид ценным компонентом защитных посадок вдоль транспортных артерий. Однако для максимальной эффективности необходимо учитывать динамику накопления, пространственное распределение металлов и разрабатывать методы безопасного удаления и переработки загрязнённой коры, чтобы исключить её возврат в биогеохимический цикл.

Проведённое исследование расширяет понимание механизмов миграции и аккумуляции тяжёлых металлов в урбанизированных экосистемах, особенно в условиях резко-континентального климата. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации городского планирования, минимизации негативного воздействия на здоровье населения и разработки стратегий устойчивого развития территорий с высокой антропогенной нагрузкой.

Список литературы / References

1. Дубровина О.А., Зубкова Т.В., Масина Т.А., Виноградов Д.В., Гогмачадзе Г.Д. Аккумуляция свинца и кадмия в вегетативных органах *Betula Pendula*, *Tilia Cordata* L., *Populus Pyramidalis* в городских парках г. Ельца, г. Задонска, г. Лебедяни Липецкой области. *АгроЭкоИнфо*. 2024;4(64):1–13. <https://doi.org/10.51419/202144416>

Dubrovina O, Zubkova T, Masina T, Vinogradov D, Gogmachadze G. Accumulation of Lead and Cadmium in Vegetative Organs of *Betula Pendula*, *Tilia Cordata* L., *Populus Pyramidalis* in Urban Parks of Yelets, Zadonsk, Lebedyan, Lipetsk Region. *AgroEcoInfo*. 2024;4(64):1–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.51419/202144416>

2. Зубаиров Р.Р., Мустафин Р.Ф., Одинцов Г.Е. Содержание элементов первого класса опасности в почвах и древесине на водосборе реки Большая Балыклы. В: *Сборнике статей III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, приуроченной к 80-летию агрономического факультета Алтайского государственного аграрного университета «Перспективы внедрения инновационных технологий в АПК»*, Барнаул, 22 ноября 2023 года. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет; 2023. С. 203–207.

Zubairov RR, Mustafin RF, Odintsov GE. The Content of Elements of the First Hazard Class in Soils and Wood in the Catchment Area of the Bolshaya Balykly River. In: *Prospects for the Introduction of Innovative Technologies in Agriculture: Proceedings of the III All-Russian (National) Scientific and Practical Conference with International Participation, Dedicated to the 80th Anniversary of the Faculty of Agronomy of Altai State Agrarian University, Barnaul, November 22, 2023*. Barnaul: Altai State Agrarian University; 2023. P. 203–207. (In Russ.)

3. Гюльбяков Н.Р., Давыдова С.А., Гюльбякова Х.Н. Изменение числовых показателей и содержания дубильных веществ в коре липы мелколистной в зависимости от места произрастания. В: *Сборнике научных трудов «Разработка, исследование и маркетинг новой фармацевтической продукции»*. Том Выпуск 76. Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на Кавминводах; 2021. С. 24–29.

Gyul'byakov NR, Davydova SA, Gyul'byakova KhN. Changes in the Numerical Parameters and Content of Tannins in the Bark of Small-Leaved Linden Depending on the Place of Growth. In: *Collection of Scientific Papers "Development, Research and Marketing of New Pharmaceutical Products"*. Pyatigorsk: Advertising and Information Agency on Kavminvody; 2021. P. 24–29. (In Russ.)

4. Ветчинникова Л.В., Кузнецова Т.Ю., Титов А.Ф. Особенности накопления тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях в условиях Севера. *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2013;(3):68–73.

Vetchinnikova LV, Kuznetsova TYu, Titov AF. Patterns of Heavy Metal Accumulation in Leaves of Trees in Urban Areas in the North. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2013;(3):68–73. (In Russ.)

5. Чураков Б.П., Зырянова У.П., Загидуллин Р.А., Парамонова Т.А., Митрофанова Н.А., Михеева А.В. Динамика накопления тяжелых металлов в трофических цепях лесных экосистем. *Ульяновский медико-биологический журнал*. 2024;(1):105–114. <https://doi.org/10.34014/2227-1848-2024-1-105-114>

Churakov BP, Zyryanova UP, Zagidullin RA, Paramonova TA, Mitrofanova NA, Mikheeva AV. Dynamics of Heavy Metal Accumulation in Trophic Levels of Forest Ecosystems. *Ulyanovsk Medico-Biological Journal*. 2024;(1):105–114. (In Russ.) <https://doi.org/10.34014/2227-1848-2024-1-105-114>

6. Петухов А.С., Кремлева Г.А., Петухова Г.А., Хритохин Н.А. Аккумуляция и миграция тяжелых металлов в почвах и растениях в условиях антропогенного загрязнения городской среды. *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2022;(3):53–66. <https://doi.org/10.17076/eco1342>

Petukhov AS, Kremleva GA, Petukhova GA, Khritokhin NA. Heavy Metal Accumulation and Migration in Soils and Plants under Contamination in Urban Environments. *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022;(3):53–66. <https://doi.org/10.17076/eco1342>

7. Кравцов В.Н. Содержание тяжёлых металлов в листьях и хвое древесных растений, произрастающих на территории Дальневосточного высшего общевойскового командного училища. В: *Труды XXIII региональной научно-практической конференции «Молодёжь XXI века: шаг в будущее», Благовещенск, 24 мая 2022 года.* Том 4. Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет; 2022. С. 253–255.

Kravtsov VN. The Content of Heavy Metals in the Leaves and Conifers of Woody Plants Growing on the Territory of the Far Eastern Higher Combined Arms Command School. In: *Proceedings of the 23d Regional Scientific and Practical Conference “Youth of the 21st Century: A Step into the Future”, Blagoveshchensk, May 24, 2022.* Vol. 4, Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University; 2022. P. 253–255. (In Russ.)

8. Копылова Л.В. Накопление тяжёлых металлов *Caragana arborescens* Lam. в условиях антропогенного воздействия (Забайкальский край). *Ученые записки Забайкальского государственного университета.* 2017;12(1):20–25.

Kopylova LV. Accumulation of Heavy Metals *Caragana Arborescens* Lam. In the Conditions of Anthropogenic Influence (Zabaikalsky Krai). *Scholarly Notes of Transbaikals State University.* 2017;12(1):20–25. (In Russ.)

9. Сайдышева Г.В., Захаров С.А. Результаты мониторинга содержания тяжелых металлов в почве, растениях и снежном покрове вблизи автомобильных трасс на различном удалении от города Ульяновска. *Вестник Казанского государственного аграрного университета.* 2023;17(4):45–49. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-45-49>

Saidyasheva GV, Zakharov SA. The Results of Monitoring the Content of Heavy Metals in Soil, Plants and Snow Cover near Highways Selected Can Be Removed at Various Distances from the City of Ulyanovsk. *Vestnik of Kazan State Agrarian University.* 2023;17(4):45–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-45-49>

10. Гаврилова А.А., Макарова Е.И., Ахтямов Р.Г. Аккумуляция тяжелых металлов в почвах и фитомассе на урбанизированных территориях. *Известия Петербургского университета путей сообщения.* 2023;20(3):706–714. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-3-706-714>

Gavrilova AA, Makarova EI, Akhtyamov RG. Accumulation of Heavy Metals in Soils and Phytomass in Urbanized Areas. *Proceedings of Petersburg Transport University.* 2023;20(3):706–714. (In Russ.) <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2023-3-706-714>

11. Соболева С.В., Ченцова Л.И., Почекутов И.С. Исследование накопления тяжелых металлов в почве и коре тополя на территории Красноярск. *Вестник КрасГАУ.* 2013;9(84):122–126. <https://kgau.editorum.ru/ru/storage/viewWindow/146397> (дата обращения: 11.04.2025).

Soboleva SV, Chentsova LI, Pochekutov IS. The Research of the Heavy Metal Accumulation in the Soil and Poplar Bark in the Krasnoyarsk City Territory. *Bulletin of KSAU.* 2013;9(84):122–126. (In Russ.) <https://kgau.editorum.ru/ru/storage/viewWindow/146397> (accessed: 11.04.2025).

12. Кашина Е.М., Малков А.В., Боголицын К.Г. Определение содержания тяжелых металлов в древесине методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал.* 2011;(6):140–143.

Kashina EM, Malkov AV, Bogolitsyn KG. Determination of Heavy Metal Content in Wood by X-Ray Fluorescence Spectroscopy. *Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal.* 2011;(6):140–143. (In Russ.)

13. Chichigina Y, Shigabaeva G, Emelyanova E, Galunin E, Yakimov A, Isaev A, Bekker M. Heavy Metal Contents in the Tyumen City Residential Area Soils. *Journal of Advanced Materials and Technologies.* 2023;8(2):141–156. <https://doi.org/10.17277/jamt.2023.02.pp.141-156>

14. Vedernikov K, Zagrebina E, Bukharina I. Specific Nature of the Biochemical Composition of Spruce Wood from the Forest Stands Exposed to Drying out in European Russia. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty.* 2020;20(3):208–219. <https://doi.org/10.17475/kastorman.849461>

15. Menahem Edelstein, Meni Ben-Hur. Heavy Metals and Metalloids: Sources, Risks and Strategies to Reduce Their Accumulation in Horticultural Crops. *Scientia Horticulturae.* 2018;234:431–444. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.039>

16. Kočevlar Glavač N, Mračević SD, Ražić SS, Kreft S, Veber M. Accumulation of Heavy Metals from Soil in Medicinal Plants. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology.* 2017;68(3):236–244. <https://doi.org/10.1515/aiht-2017-68-2990>

17. Konstantinova E, Minkina T, Konstantinov A, Sushkova S, Antonenko E, Kurasova A, et al. Pollution Status and Human Health Risk Assessment of Potentially Toxic Elements and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Street Dust of Tyumen City, Russia. *Environmental Geochemistry and Health.* 2020;44:409–432. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00692-2>

18. Stepanova NV, Fomina SF, Valeeva ER, Ziyatdinova AI. Heavy Metals as Criteria of Health and Ecological Well-Being of the Urban Environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology;* 2018;50:646–651. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.05.015>

19. Dyomina EB, Savchenkova VA. The Content of Heavy Metals in Soils and Leaves of Silver Birch Plantations (Moscow). *Russian Forestry Journal;* 2024;4(400):37–48. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-37-48>

20. Tsegay MK, Sukhenko LT. Pilot Survey of Three Soil Heavy Metals at Abandoned Industrial Farmland, and Determination of Its Potential Health Risk. *International Journal of Humanities and Natural Sciences;* 2023;10–1(85):23–30. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2023-10-1-23-30>

Об авторах:

Татьяна Викторовна Турушева, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Техносферная безопасность» Забайкальского государственного университета (672039, Российская Федерация, г. Чита, ул. Александровская, д. 30), [SPIN-код](#), [ORCID](#), turusheva_tanya@mail.ru

Вячеслав Евгеньевич Есипов, магистрант, кафедра «Техносферная безопасность» Забайкальского государственного университета (672039, Российская Федерация, г. Чита, ул. Александровская, д. 30), slavel.chapp@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Т.В. Турушева: научное руководство, разработка концепции.

В.Е. Есипов: проведение исследования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Tatyana V. Turusheva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technosphere Safety, Transbaikal State University (30, Aleksandro-Zavodskaya Str., Chita, 672039, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), turusheva_tanya@mail.ru

Vyacheslav E. Esipov, Master's Degree Student of the Department of Technosphere Safety, Transbaikal State University (30, Aleksandro-Zavodskaya Str., Chita, 672039, Russian Federation), slavel.chapp@gmail.com

Claimed Contributorship:

TV Turusheva: supervision, conceptualization.

VE Esipov: investigation.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 28.05.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 14.06.2025

Принята к публикации / Accepted 02.07.2025

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 621.433: 547.211

Статья-перспектива

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-208-220>

Применение шахтного метана в качестве газомоторного топлива для коммерческого автомобильного транспорта городов Донбасса

Н.В. Савенков , Е.Л. Головатенко

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка,

Донецкая Народная Республика

✉ e.l.golovatenko@donnasa.ru

EDN: HTLYBN

Аннотация

Введение. Шахтный метан, выделяющийся в процессе подземной добычи угля, с одной стороны рассматривается в качестве причины глобального изменения климата (парниковый газ), а с другой стороны является ценным энергетическим ресурсом. В настоящее время доля его утилизации в мировом масштабе невысока, количество метана, поступающее в атмосферу, ежегодно увеличивается. С целью ограничения выбросов парниковых газов принят ряд законодательных инициатив: Киотский протокол, Парижское соглашение, Федеральный закон № 296–ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов»¹.

В условиях Донбасса задача утилизации шахтного метана является актуальной в связи с плотным размещением источников выбросов и необходимостью повышения безопасности горных работ, а также обеспечивает реализацию принципа комплексного освоения месторождения. Кроме того, боевые действия обусловили повышение стоимости топлива в регионе и увеличение грузооборота автомобильным транспортом ввиду практически не функционирующих ж/д, морского и авиасообщения. Цель исследования — выполнить расчетную оценку энергетической эффективности применения шахтного метана угольных месторождений Донбасса в качестве моторного топлива автомобильных двигателей внутреннего сгорания коммерческого транспорта.

Материалы и методы. В качестве примера для выполнения исследований выбраны распространённые на городских маршрутах г. Макеевки (ДНР) автотранспортные средства БАЗ-2215 на шасси «Газель Бизнес», ГАЗель Next «Citiline» и ПАЗ 3203, оснащённые искровыми и дизельными двигателями марок УМЗ, ЗМЗ и Cummins. Полный состав проб метановоздушной смеси ряда шахт («Шахта им. Чайкино», г. Макеевка, «Шахта Комсомолец Донбасса», г. Кировское), отобранных из дегазационных систем, определён в лабораториях ГУ «МАКНИИ» и ГП «Донецкавтогаз» с помощью газового хроматографа «Кристаллюкс 4000М». Энергетические показатели автомобильных двигателей при работе на различных видах топлива, в том числе на шахтном метане, а также эксплуатационные свойства выбранных автобусов (путевой расход топлива, запасы хода и выбросы диоксида углерода) в условиях городских ездовых циклов по ГОСТ Р 54810–2011² определены в результате выполненной серии расчётов по известным методикам.

Результаты исследования. Выполнена расчётная оценка энергетической эффективности применения шахтного метана в качестве газомоторного топлива. В диапазоне концентраций исследованных образцов газозвуш-ных смесей максимальная расчётная потеря развиваемой эффективной мощности искровых двигателей ЗМЗ и УМЗ составляет до 15 %, а для газодизелей на примере Cummins мощность может быть увеличена до 29 %. Это не препятствует движению выбранных автобусов в условиях ездовых циклов по ГОСТ Р 54810–2011³. В этих условиях путевой расход топлива и запасы хода на одной заправке существенно зависят от компонентного состава шахтного метана и для исследуемых образцов ухудшаются в 1,8–3,5 раза по отношению к показателям на природном газе, используемом для заправки автомобилей, а эмиссия диоксида углерода сокращается на 62–73 % от эмиссии на бензине.

¹ Об ограничении выбросов парниковых газов. Федеральный закон № 296–ФЗ от 02.07.2021. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/607142402> (дата обращения: 21.05.2025).

² ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

³ Там же

Обсуждение. В связи с особенностями дегазационных процессов и горно-геологических условий разных шахт рассматриваемое в статье альтернативное топливо обладает непостоянным компонентным составом. В связи с этим перевод подвижного состава марок ПАЗ и ГАЗ на побочный продукт угледобычи — шахтный метан — сопряжён со следующими сопутствующими сложностями: необходимость применения топливных систем повышенной производительности (в 3 и более раз по отношению к системам питания ДВС сопоставимой мощности, работающим на сжатом газе), ухудшение топливно-экономических и тягово-скоростных свойств автотранспортных средств, а также их запаса хода. В исследовании получена количественная оценка данных изменений. Положительный эффект предлагаемых мероприятий обусловлен снижением негативного воздействия на окружающую среду путём утилизации шахтного метана его применением в качестве газомоторного топлива, уменьшением углеродного следа от автомобильного транспорта, сокращением потребления жидкого углеводородного топлива.

Заключение. В результате исследования установлено, что шахтный метан угольных месторождений Донбасса может быть применён в качестве моторного топлива автомобильных двигателей внутреннего сгорания коммерческого транспорта на примере городских автобусов. Определены соответствующие параметры энергетической эффективности (развиваемая ДВС эффективная мощность, удельные расходы топлива, запасы хода автомобилей в условиях ездовых циклов и т.д.), а также степень их снижения относительно применения традиционных видов топлива. Установлено, что это не препятствует выполнению транспортной работы (в условиях ГОСТ Р 54810–2011⁴) и является оправданным с позиции экономии невозобновляемых ресурсов и повышения экологической безопасности региона.

Ключевые слова: утилизация метана, газомоторное топливо, двигатели внутреннего сгорания, автотранспортные средства

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам лабораторий (ГП «Донецкавтогаз», ГУ «МакНИИ» и ГП «Донбасстрансгаз»), на базе которых исследован компонентный состав метановоздушных смесей, угледобывающих предприятий (ГП «Макеевуголь» «Шахта им. Чайкино», ГУП ДНР «Шахта Комсомолец Донбасса»), предоставившим возможность выполнить отбор проб, а также рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их усовершенствованию способствовали повышению качества настоящей работы.

Финансирование. Исследование является составной частью госбюджетной научной темы «Повышение эксплуатационной эффективности автотранспортных средств совершенствованием их технологических, конструкционных и режимных параметров» (Государственное задание № 075-01620-23-00 от 12.05.2023 г.).

Для цитирования. Савенков Н.В., Головатенко Е.Л. Применение шахтного метана в качестве газомоторного топлива для коммерческого автомобильного транспорта городов Донбасса. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(3):208–220. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-208-220>

Perspective Article

The Use of Coal Mine Methane as a Natural Gas Motor Fuel for Commercial Motor Transport in Donbass Cities

Nikita V. Savenkov^{ID}, Ekaterina L. Golovatenko^{ID}✉

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, Donetsk People's Republic

✉ e.l.golovatenko@donnasa.ru

Abstract

Introduction. Coal mine methane, a greenhouse gas released during underground coal mining, is considered to be a cause of global climate change. However it is also a valuable energy resource. Currently, the global utilization rate of coal mine methane is low, and the amount of methane released into the atmosphere is increasing every year. To limit greenhouse gas emissions, several legislative initiatives have been implemented, including the Kyoto Protocol, the Paris Agreement, and Federal Law No. 296-FZ “On Limiting Greenhouse Gas Emissions”. In the conditions of Donbass, the task of mine methane utilization is relevant due to the dense location of emission sources and the need to improve the safety of mining operations, as well as to ensure the implementation of the principle of integrated field development. In addition, the ongoing hostilities have led to an increase in fuel prices in the region and an increase in road transport due to the limited availability of rail, sea, and air transportation. The aim of the research is to conduct a calculated assessment of the energy efficiency of using mine methane from Donbass coal deposits as motor fuel for commercial vehicles with internal combustion engines.

⁴ ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

Materials and Methods. As an example, the studies were conducted on BAZ-2215 vehicles on the GAZelle Business chassis, GAZelle Next Citiline, and PAZ 3203, which were commonly used on urban routes in Makeyevka (DPR). These vehicles were equipped with UMZ, ZMZ, and Cummins spark and diesel engines. The full composition of methane-air mixture samples from several mines (Chaykino Mine, Makeyevka, Komsomolets Donbassa Mine, Kirovskoye), taken from degassing systems, was determined in the laboratories of Makeyevka Research Institute for Mining Safety and Donetskavtogaz using a Kristallyuks 4000M gas chromatograph. The energy efficiency of engines operating on various types of fuel, including mine methane, as well as the performance characteristics of selected buses (fuel consumption, distance-to-empty, and carbon dioxide emissions) under urban driving cycles according to GOST R 54810–2011, were determined through a series of calculations using well-established methods.

Results. An estimation of the energy efficiency of mine methane as a gas engine fuel has been performed. In the range of concentrations of the studied samples of gas-air mixtures, the calculated maximum loss of effective power for ZMZ and UMZ spark engines was up to 15%. For gas-diesel engines, such as Cummins, power could be increased by up to 29%. These findings did not prevent selected buses from operating under driving cycles in accordance with GOST R 54810–2011. Under these conditions, fuel consumption and range per refueling depended significantly on the component composition of mine methane. For the samples studied, it was 1.8–3.5 times worse than for natural gas used for refueling. Emissions of carbon dioxide were reduced by 62–73% compared to gasoline.

Discussion. Due to the specific features of degassing processes and the mining and geological conditions of different mines, the alternative fuel discussed in this article has a variable component composition. In this regard, the transfer of PAZ and GAZ bus rolling stock to a byproduct of coal mining — mine methane — is associated with several challenges. These include the need for more powerful fuel systems (three times or more than the power supply systems of internal combustion engines of comparable power, operating on compressed gas) and deterioration in fuel-economic and traction-speed properties of vehicles, as well as reduced range. A quantitative assessment of these changes has been obtained through research. The positive impact of the proposed measures stems from the reduction in negative environmental impact by using mine methane as a fuel for vehicles, which reduces the carbon footprint of road transport and decreases the consumption of liquid hydrocarbon fuel.

Conclusion. As a result of the study, it has been found that the methane from the Donbass coal mines can be used as motor fuel for commercial vehicles such as city buses. The study has determined the corresponding energy efficiency parameters (the effective power generated by internal combustion engines, the specific fuel consumption, the range of vehicles under driving cycles, etc.), as well as the degree of their reduction compared to traditional fuels. It has been established that this does not affect the performance of transportation work (in compliance with GOST R 54810–2011) and is beneficial from the perspective of saving non-renewable resources and improving environmental safety in the region.

Keywords: methane utilization, gas engine fuels, internal combustion engines, motor vehicles

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the staff of the laboratories (SE Donetskavtogaz, SE Makeyevka Research Institute for Mining Safety, and SE Donbasstransgaz), on the basis of which the component composition of methane-air mixtures was studied, coal mining enterprises (SE Makeyevugol Chaykino Mine, SUE DNR Komsomolets Donbassa Mine), for the opportunity to perform sampling, as well as to the reviewers for their critical assessment of the submitted materials and their suggestions for improvement the quality of this work.

Financing. This research is an integral part of the scientific research topic “Improving the operational efficiency of motor vehicles by improving their technological, structural and operational parameters” (State Task No. 075-01620-23-00 dated May 12, 2023).

For citation. Savenkov NV, Golovatenko EL. The Use of Coal Mine Methane as a Natural Gas Motor Fuel for Commercial Motor Transport in Donbass Cities. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(3):208–220. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-208-220>

Введение. Шахтный метан является ценным топливно-энергетическим ресурсом, который образуется при добыче угля [1] и при дегазации угольных пластов [2]. Его эффективная утилизация может снизить выбросы парниковых газов [3], повысить экономическую эффективность добычи угля и обеспечить дополнительные источники энергии для автомобильного транспорта [4]. В условиях ограниченных мировых запасов нефти и растущих энергозатрат использование шахтного метана в качестве моторного топлива представляет собой перспективное направление [5], позволяющее снизить зависимость от ископаемого топлива и уменьшить экологическую нагрузку [6]. В рамках Российской Федерации доля метана в выбросах парниковых газов занимает второе место после диоксида углерода и составляет 14 %, практически половина из которых — вклад угольных шахт (400 млн тонн CO₂-эквивалента в год) [7]. Увеличение угледобычи приводит к росту объёмов образования шахтного метана [8], что требует интенсификации дегазации⁵.

⁵ *Global Methane Tracker*. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/b5f6bb13-76ce-48ea-8fdb-3d4f8b58c838/GlobalMethaneTracker_documentation.pdf (дата обращения 27.05.2025).

В ряде стран доля дегазированного метана, используемого в энергетике, достигает 50–80 % [7]; однако в России значительная его часть (более 1 млрд. м³ в год [7]) выбрасывается в атмосферу [9].

В мировой практике утилизация шахтного метана охватывает сжигание, когенерацию [10], химическую переработку и закачку в угольные пласты [11]. Рациональный выбор технологии зависит от компонентного состава газа [12] и характеристик месторождения (рис. 1) [13].

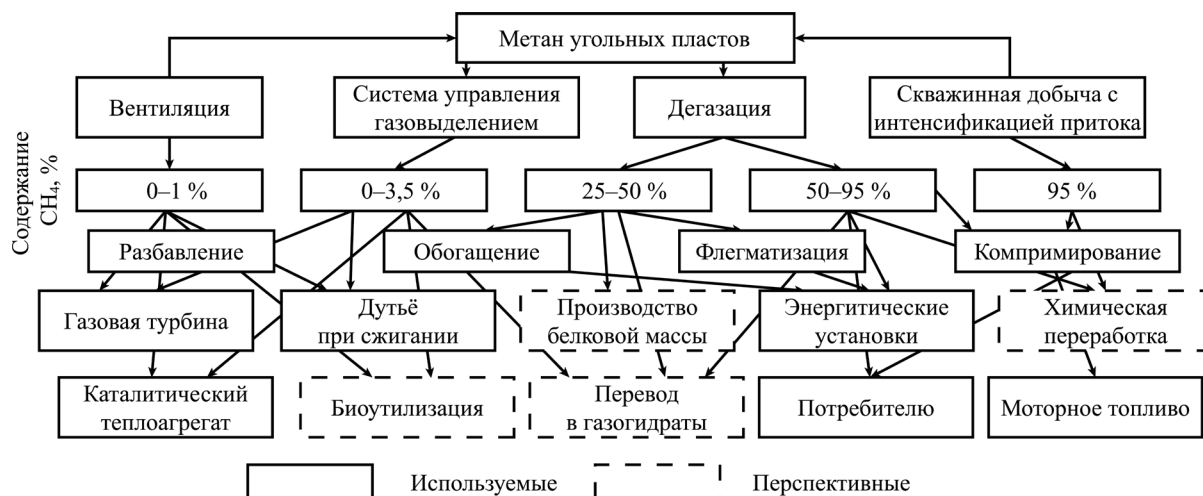


Рис. 1. Основные направления использования шахтного метана [13]

Однако существующие технологии утилизации охватывают ограниченные концентрации метана [14] и при его использовании в качестве моторного топлива требуют дальнейших исследований влияния состава газовой смеси на энергетическую эффективность двигателей и на эксплуатационные свойства автомобилей [5]. Эти факторы создают потребность в системном анализе возможностей применения шахтного метана как альтернативного топлива и в разработке методик оценки его энергетической эффективности для коммерческого транспорта.

Существующие исследования преимущественно фокусируются на стационарных газопоршневых установках [15] и отдельный анализ относится к автомобильным двигателям [16]. Ключевой пробел состоит в нехватке данных о влиянии вариаций состава смеси шахтного метана на энергетические показатели двигателей внутреннего сгорания в условиях реальных циклов движения, а также в отсутствии оценки экономической и экологической эффективности таких решений на масштабе крупных регионов. Таким образом, требуется комплексное теоретическое обоснование использования шахтного метана на транспорте, а также методика расчета энергетической эффективности, учитывающая состав газа, режимы двигателей и циклы движения автомобилей.

Целью работы является выполнение расчетной оценки энергетической эффективности применения шахтного метана угольных месторождений Донбасса в качестве моторного топлива для автомобильных двигателей внутреннего сгорания коммерческого транспорта. Задачи включают: обзор особенностей дегазации шахтного метана на отечественных и зарубежных месторождениях; анализ его состава на угольных предприятиях Донбасса; моделирование рабочего процесса автомобильных ДВС на различных режимах при использовании в качестве топлива шахтного газа; количественную оценку энергетической эффективности (включая КПД и развиваемые эффективные показатели) для автомобильных силовых установок на шахтном газе в сравнении с традиционными топливами; определение условий и ограничений, обеспечивающих безопасную и экологически выгодную эксплуатацию транспортных средств на шахтном газе; формулирование рекомендаций по технологиям дегазации и подготовки газа для широкого применения в коммерческом транспорте.

Материалы и методы. В работе применены лабораторные методы исследования состава шахтного метана из ГП «Макеевуголь» «Шахта им. Чайкино» (г. Макеевка), ГУП ДНР «Шахта Комсомолец Донбасса» (г. Кировское). Для подготовки лабораторных газов использовался комплексный технологический процесс. Дегазационные системы указанных шахт оборудованы двумя типами вакуум-насосных станций — водокольцевые вакуум-насосы ВН-50 (производство КНР), в которых в качестве рабочего тела применяется вода, отбор проб газа осуществлялся перед вакуум-насосными станциями, для удаления влаги использовался силикагель; ротационные насосы, обладающие средствами обеспыливания и удаления влаги, отбор проб газа осуществлялся на выходе в баллоны емкостью 2 литра. Процессы разубоживания лабораторного газа до требуемой концентрации, а также дополнительного обогащения природным газом не применялись. Определение полного состава отобранного газа осуществлялось в двух лабораториях: газоаналитической лаборатории ГУ «МАКНИИ» (Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности) и химической лаборатории ГП «Донецкавтогаз». Для анализа состава газов использовался газовый хроматограф «Кристаллюкс 4000М».

В качестве примера для выполнения исследований выбраны распространенные на городских маршрутах г. Магеевки (ДНР) автотранспортные средства БАЗ-2215 на шасси «Газель Бизнес», ГАЗель Next «Citiline» и ПАЗ 3203. По данным Муниципального унитарного предприятия администрации г. Магеевки «Диспетчерская служба», на 52-х городских и 28-и пригородных маршрутах города привлечена 231 единица подвижного состава указанных марок, из которых 122 единицы средней вместимости (М3), 109 единиц малой вместимости (М2). Превалирующее количество автобусов оснащено двигателями марок ЗМЗ, УМЗ и Cummins. Основные технические характеристики выбранных автотранспортных средств и их двигателей приведены в таблице 1. Показатели выбранных в качестве примера двигателей при их работе на шахтном метане различного состава, а также на традиционном жидком топливе (развиваемая эффективная мощность, эффективный удельный и часовой расход топлива и т. д.), определены по результатам выполненной серии тепловых расчетов по методике [17].

Эксплуатационные свойства автотранспортных средств (путевой расход топлива, запас хода и выбросы углекислого газа) в условиях ездовых циклов (ЕЦ) по ГОСТ Р 54810–2011⁶ при работе их двигателей на рассматриваемых в исследовании топливах получены путем численного моделирования процесса движения в соответствии с методикой [18].

Таблица 1

Характеристики рассматриваемых автомобилей и их ДВС

Модель автомобиля	ГАЗель Next «Citiline»	БАЗ-2215	ПАЗ 3203
Категория по ТР ТС 018/2011	М ₂	М ₂	М ₃
Класс по ГОСТ Р 54810-2011 ⁷	II	II	II
Пассажировместимость, человек	17	15	48
Полная масса, кг	4 950	3 980	8 500
Энерговооруженность, Вт/кг	17,84	19,72	11,30
Модель двигателя	CUMMINS ISF2.8S4R129	EVOTECH A274	ЗМЗ-5234
Тип	Дизельный, с турбонаддувом и охладителем наддувочного воздуха	Бензиновый, 4-тактный, впрысковый	Бензиновый, 4-тактный, карбюраторный
Количество цилиндров и их расположение	4, рядное	4, рядное	8, V-образное
Диаметр цилиндров и ход поршня, мм	94×100	96,5×92	92×88
Рабочий объем цилиндров, л	2,80	2,69	4,67
Степень сжатия	16,9	10,0	7,6
Номинальная мощность, нетто кВт (л.с.) при частоте вращения коленчатого вала, об/мин	88,3 (120) 3 600	78,5 (106,8) 4 000	96 (130) 3 200–3 400
Максимальный крутящий момент, нетто, Нм (кгс·м) при частоте вращения коленчатого вала, об/мин	295 (30,0) 1 600–2 700	220,5 (22,5) 2 350±150	314(32) 2 250–2 500

Для этого в программной среде системы компьютерной алгебры Mathcad в каждой точке ЕЦ решено уравнение мощностного баланса автомобиля [18]. На рис. 2 приведены выбранные ЕЦ, представляющие зависимости скорости движения V от пройденного пути S .

⁶ ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

⁷ Там же

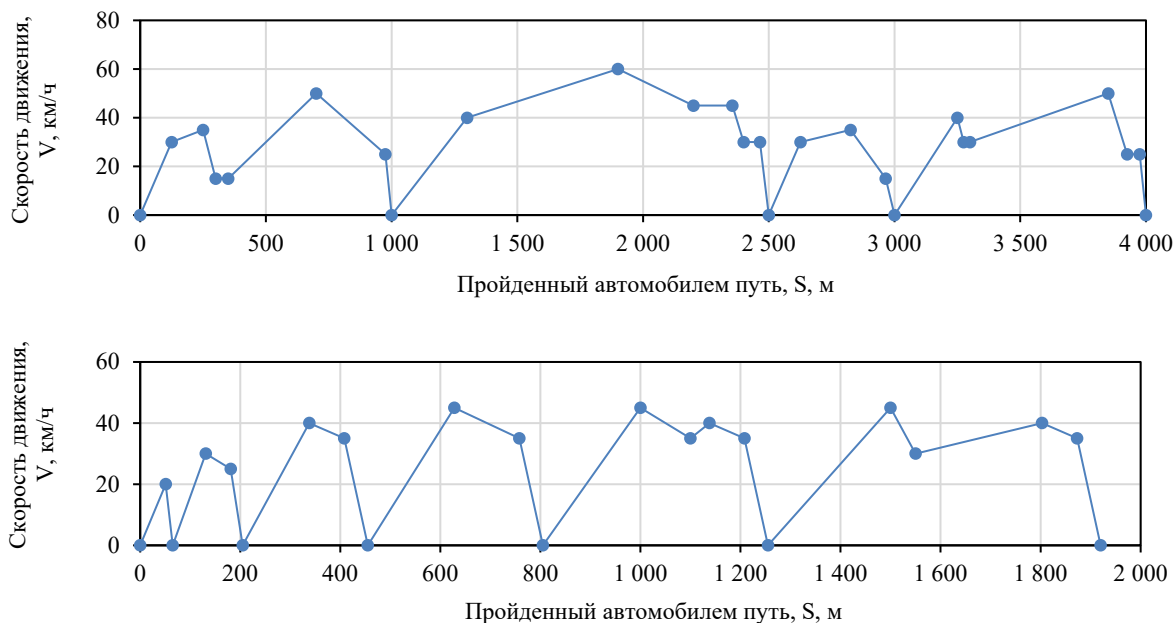


Рис. 2. Выбранные для выполнения исследования ездовые циклы: а — городской цикл на дороге для автомобилей категории М2 класса II; б — городской цикл на дороге для автомобилей категории М3 класса II

Данные варианты циклов характеризуются минимальными ускорениями, что обусловлено невысокими показателями энерговооруженности автомобилей (таблица 1) и ожидаемой потерей максимальной мощности, развиваемой их двигателями при работе на шахтном метане.

Путевой расход топлива определялся следующим образом:

$$m = \frac{1}{S_{\text{ЕЦ}}} \left(\frac{1}{3600} \int_0^{t_{\text{Ц}}} G(t) dt + t_0 \cdot G_{\text{ХХ}} \right), \text{ м}^3/\text{км} \text{ (кг/км)}, \quad (1)$$

где $S_{\text{ЕЦ}}$ — дистанция ЕЦ (4 км для категории М₂ и 1,92 км для категории М₃); $t_{\text{Ц}}$ — продолжительность ЕЦ (497 с для категории М₂ и 288 с для категории М₃ без учета остановок); $G(t)$ — функция часового расхода топлива от времени движения в цикле, м³/ч (кг/ч); t_0 — суммарная продолжительность остановок, с; $G_{\text{ХХ}}$ — часовой расход топлива двигателя в режиме минимально устойчивой чистоты вращения на холостом ходу, м³/с (кг/с), $G_{\text{ХХ}} = 0,0007$ м³/с для газовых ДВС и $G_{\text{ХХ}} = 0,005$ кг/с для ДВС на жидком топливе [17]).

Запас хода автобуса в условиях ЕЦ вычислялся по формуле (2) для газообразных топлив и по формуле (3) для жидких топлив:

$$S_A = \frac{V_3}{m} = \frac{n_B \cdot V_B}{m} = \frac{m_3}{m \cdot \rho_{\text{ГГ}}} = \frac{m_3}{m} \cdot \frac{R_{\text{Г}} \cdot T_0}{P_0}, \text{ км}, \quad (2)$$

$$S_A = \frac{V_{\text{БТ}} \cdot \rho_{\text{Г}}}{m}, \text{ км}, \quad (3)$$

где V_3 — объем газа при нормальных условиях (НУ), находящийся на борту автомобиля; n_B — количество баллонов на борту автомобиля; V_B — максимальный объем газа при НУ, которым может быть заправлен один баллон; m_3 — заправочная масса газа; $\rho_{\text{ГГ}}$ — плотность газа при НУ; $R_{\text{Г}}$ — газовая постоянная (таблица 2); T_0 и P_0 — температура и атмосферное давление при НУ соответственно; $V_{\text{БТ}}$ — объем топливного бака; $\rho_{\text{ГГ}}$ — плотность жидкого топлива при НУ.

Эмиссия CO₂ в условиях ЕЦ определялась следующим образом:

— для ДВС, работающих на газе (в т.ч. для газодизелей):

$$q = n_{\text{CO}_2} \cdot \mu_{\text{CO}_2} = n_{\text{Г}} \cdot M_{\text{CO}_2} \cdot \mu_{\text{CO}_2} = 10^3 \cdot m \cdot \rho_{\text{ГГ}} \cdot M_{\text{CO}_2} \cdot \frac{\mu_{\text{CO}_2}}{\mu_{\text{Г}}}, \text{ г/км}, \quad (4)$$

где n_{CO_2} — количество вещества (CO₂) в отработавших газах (ОГ), отнесенное к одному километру пути, моль/км; μ_{CO_2} — молекулярная масса CO₂, г/моль; $n_{\text{Г}}$ — количество молей топлива, израсходованного за один километр пути, моль/км; M_{CO_2} — количество CO₂, образующееся при сгорании газообразного топлива, моль/моль, (6); $\mu_{\text{Г}}$ — молекулярная масса газа, г/моль (таблица 2);

— для двигателей, работающих на жидком топливе:

$$q = 10^3 \cdot m \cdot M_{\text{CO}_2} \cdot \mu_{\text{CO}_2}, \text{ г/км}, \quad (5)$$

где M_{CO_2} — количество CO₂, образующееся при сгорании жидкого топлива, кмоль/кг, (7).

Для газодизеля M_{CO_2} определялось по формуле:

$$M_{CO_2} = \sum n(C_n H_m O_r), \quad (6)$$

$$M_{CO_2} = C / 12, \quad (7)$$

$$M_{CO_2} = \sum n(C_n H_m O_r) + g_T \cdot C / 12, \quad (8)$$

где n, m, r — соответственно количество атомов углерода, водорода и кислорода в молекулах газов газовой смеси; $C_n H_m O_r$ — объемная доля газа в газовой смеси, таблица 2; C — массовая доля углерода в топливе (таблица 2); g_T — масса жидкого топлива, приходящаяся на 1 кмоль газового топлива, $g_T = 0,0084$ кг/кмоль.

Результаты исследования. В исследовании получены следующие результаты:

– определен компонентный состав лабораторных газов, отобранных из угольных предприятий Донбасса (таблица 2);

– для моделей автобусов, распространенных на городских маршрутах г. Макеевка, выполнен тепловой расчёт двигателей внутреннего сгорания при их работе на шахтном метане различного компонентного состава (таблицы 3–5);

– для условий городских ЕЦ по ГОСТ Р 54810–2011⁸ выполнено численное моделирование движения автобусов и определены показатели эффективности применения шахтного метана в качестве моторного топлива (таблица 6).

В таблицах 2–6 для образцов лабораторного газа приняты следующие обозначения: газ № 1 — шахта им. Чайкина; газ № 2 — природный газ, используемый для заправки автомобилей (отобран на автомобильной газонаполнительной компрессорной станции); газ № 3 — эталонная газовая смесь по ГОСТ 31371.3–2008; газ № 4 — шахта «Комсомолец Донбасса», первая ВНС; газ № 5 — шахта «Комсомолец Донбасса», вторая ВНС.

Таблица 2

Компонентный состав лабораторных газов (топлив)

Компонентный состав топлива	Объемные доли					Массовые доли	
	Газ № 1	Газ № 2	Газ № 3	Газ № 4	Газ № 5	Бензин	Дизель
CO	0	0	0	0	0	–	–
H ₂	0	0	0	0	0,0000417	–	–
CH ₄	0,485	0,959	0,805	0,2745	0,445	–	–
C ₂ H ₆	0,00359	0,02253	0,04	0	0	–	–
C ₃ H ₈	0,00113	0,00694	0,005	0	0	–	–
C ₄ H ₁₀	0,005045	0,00201	0,005	0	0	–	–
C ₅ H ₁₂	0,000058	0,00031	0	0	0	–	–
O ₂	0,0158	0,00008	0	0,1686	0,11683	–	–
CO ₂	0,00137	0,00204	0,09	0,003	0,002583	–	–
N ₂	0,4878	0,00696	0,06	0,5538	0,435417	–	–
C ₆ H ₁₄	0	0,00012	0	0	0	–	–
He	–	–	0	0,0001	0,000075	–	–
C	–	–	–	–	–	0,855	0,860
H	–	–	–	–	–	0,145	0,126
O	–	–	–	–	–	0	0,014
Результаты теплового расчета по методике [17]							
Удельная газовая постоянная, R_g , Дж/(кг·К)	370,5	496	411	327	359	–	
Молекулярная масса, μ , г/моль	22,4	16,76	20,23	25,43	23,16		
Низшая теплота сгорания топлива, газ (бензин/дизель) МДж/м ³ , (МДж/кг)	18,256	18,257	33,5	32,3	9,8	(43,9)	(41,99)
Теоретическое необходимое количество воздуха для сгорания, кмоль/кг, (кг/кг)	4,835	9,842	8,690	1,829	3,717	(14,95)	(14,3)
Теплота сгорания горючей смеси, (бензин/дизель) кДж/м ³ , (кДж/кг)	70086	70087	75011	74722	77598	(83555)	(52911)

⁸ ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

С целью оценки изменения эффективных показателей (развиваемой мощности и расхода топлива) выбранных моделей ДВС при их работе на шахтном метане относительно традиционных жидких углеводородных и газомоторных топлив, в соответствии с методикой [17], выполнена соответствующая серия тепловых расчётов. Результаты представлены в таблицах 3–5.

Таблица 3

Результаты теплового расчета двигателя UM3-A27460 EvoTech

Показатель/параметр	Ед. изм.	Газ № 1	Газ № 2	Газ № 3	Газ № 4	Газ № 5	Бензин
Коэффициент избытка воздуха	–	1	1	1	1	1	1
Температура остаточных газов	К	918	945	938	956	946	954
Давление в конце сжатия	МПа	1,787	1,787	1,787	1,787	1,787	1,787
Давление в конце сгорания	МПа	6,135	6,342	6,342	6,432	6,360	6,962
Температура в конце сгорания	°С	2197	2303	2278	2342	2303	2505
Среднее индикаторное давление	МПа	0,91	0,96	0,95	0,98	0,96	1,10
Индикаторный КПД	–	0,36	0,35	0,35	0,35	0,35	0,34
Механический КПД	–	0,811	0,821	0,818	0,824	0,820	0,834
Эффективный КПД	–	0,296	0,294	0,293	0,293	0,294	0,287
Среднее эффективное давление	МПа	0,739	0,791	0,779	0,807	0,788	0,869
Эффективный крутящий момент	Нм	158	169	167	172	169	186
Эффективная мощность двигателя (номинальная)	кВт	66,3	71	70	72,4	70,7	78,5
Часовой расход газа, G , (бензина)	м³/ч (кг/ч)	44,1	23,7	26,5	90,9	54,5	(22,2)

Таблица 4

Результаты теплового расчета двигателя 3МЗ-5234

Показатель/параметр	Ед. изм.	Газ № 1	Газ № 2	Газ № 3	Газ № 4	Газ № 5	Бензин
Коэффициент избытка воздуха	–	1	1	1	1	1	1
Температура остаточных газов	К	896,6	923,4	915,6	932,9	923,4	932,3
Давление в конце сжатия	МПа	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420
Давление в конце сгорания	МПа	4,875	5,039	5,039	5,110	5,054	5,740
Температура в конце сгорания	°С	2183,6	2287,5	2263,2	2325,3	2288,3	2384,1
Среднее индикаторное давление	МПа	0,762	0,807	0,796	0,821	0,806	0,874
Индикаторный КПД	–	0,322	0,317	0,316	0,314	0,316	0,305
Механический КПД	–	0,807	0,818	0,816	0,821	0,817	0,832
Эффективный КПД	–	0,261	0,259	0,258	0,258	0,258	0,253
Среднее эффективное давление	МПа	0,615	0,660	0,649	0,674	0,657	0,727
Эффективный крутящий момент	Нм	229,1	245,7	241,6	250,9	244,6	270,7
Эффективная мощность двигателя (номинальная)	кВт	81,5	87,5	86,1	89,3	87,1	96,1
Часовой расход газа, G , (бензина)	м³/ч (кг/ч)	61,8	33,2	37,2	127,4	76,4	31,2

Таблица 5

Результаты теплового расчета двигателя CUMMINS ISF2.8S4R129

Показатель/параметр	Ед. изм.	Газ № 1	Газ № 2	Газ № 3	Газ № 4	Газ № 5	Дизель
Коэффициент избытка воздуха по газу (по жидкому топливу)	–	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	(1,6)
Температура остаточных газов	К	850,4	874,1	867,5	879,6	882,8	792,4
Давление в конце сжатия	МПа	6,735	6,735	6,735	6,735	6,735	6,720
Давление в конце сгорания	МПа	12,123	12,123	12,123	12,123	12,123	12,096
Температура в конце сгорания	°С	2239,5	2323,2	2301,1	2342,5	2359,5	1956,7
Среднее индикаторное давление	МПа	1,453	1,531	1,516	1,545	1,587	1,292
Индикаторный КПД	–	0,432	0,423	0,423	0,412	0,414	0,491
Механический КПД	–	0,848	0,856	0,854	0,857	0,861	0,822

Эффективный КПД	–	0,366	0,362	0,362	0,353	0,356	0,404
Среднее эффективное давление	МПа	1,232	1,310	1,295	1,324	1,367	1,062
Эффективный крутящий момент	Нм	272,3	289,4	285,9	292,5	301,8	234,6
Эффективная мощность двигателя	кВт	102,7	109,1	107,8	110,3	113,8	88,4
Часовой расход газа, G , (дизельного топлива)	м³/ч (кг/ч)	55,2	29,6	33,2	114,7	72,2	(18,8)

Из данных, приведенных в таблицах 3–4, следует, что для рассматриваемых в исследовании искровых газомоторных двигателей:

– максимальная номинальная мощность развивается при использовании в качестве моторного топлива газа № 4, и составляет соответственно: 72,4 кВт для УМЗ–А27460 EvoTech при часовом расходе топлива на номинальном режиме 90,9 м³/ч и 89,3 кВт для ЗМЗ–5234 при расходе 127,4 м³/ч;

– минимальный расход газа имеет место при использовании газа № 2: 23,7 м³/ч для УМЗ–А27460 EvoTech и 33,2 м³/ч для ЗМЗ–5234; однако при этом номинальная мощность двигателя УМЗ будет снижена до 71 кВт, что почти на 8 кВт меньше, чем его номинальная мощность на бензине (78,5 кВт), а двигателя ЗМЗ до 87,5 кВт при 96 кВт на бензине.

В соответствии с таблицей 5, максимальная эффективная мощность дизельного двигателя с турбонаддувом CUMMINS ISF2.8S4R129, конвертированного в газодизель, составляет 113,8 кВт на номинальном режиме и развивается на образце газа № 5, что превышает на 28,7 % соответствующий показатель на дизельном топливе, часовой расход при этом составляет 72,2 м³/ч.

От величин максимальной эффективной мощности двигателей ключевым образом зависят тягово-скоростные свойства автомобилей.

Выполненные расчёты позволили при помощи зависимостей (1)–(8) определить эксплуатационные свойства автобусов в условиях ЕЦ при работе их двигателей на рассматриваемых топливах. Результаты сведены в таблицу 6.

Таблица 6

Результаты численного моделирования процесса движения автобусов в условиях городских ездовых циклов по ГОСТ Р 54810–2011⁹

Автомобиль и условия движения	Эксплуатационные свойства	Применяемое топливо					
		Газ № 1	Газ № 2	Газ № 3	Газ № 4	Газ № 5	ЖТ ¹
БАЗ–2215 на шасси «Газель Бизнес» с двигателем УМЗ–А27460 EvoTech; городской ездовой цикл для автомобилей категории М2 по ГОСТ Р 54810–2011 (рис 2 а)	Путевой расход топлива, m , м³/км (кг/км)	0,232	0,128	0,142	0,43	0,27	(0,11)
	Запас хода в условиях ЕЦ, S_A , км	172,4	312,5	281,7	93	148,1	438,3
	Выбросы CO ₂ с ОГ, q , г/км	213,2	235,8	254,7	211,9	214,6	343,3
ГАЗель Next «Citiline» с двигателем CUMMINS ISF2,8S4R129; городской ездовой цикл для автомобилей категории М2 по ГОСТ Р 54810–2011 (рис 2 а)	Путевой расход топлива, m , м³/км (кг/км)	0,251	0,14	0,156	0,486	0,309	(0,099)
	Запас хода в условиях ЕЦ, S_A , км	159,4	285,7	256,4	82,3	129,4	553,9
	Выбросы CO ₂ с ОГ, q , г/км	230,9	258	280	240	245,9	313,4
ПАЗ 3203 с двигателем ЗМЗ–5234; городской ездовой цикл для автомобилей категории М3 по ГОСТ Р 54810–2011 (рис 2 б)	Путевой расход, m , м³/км (кг/км)	0,544	0,291	0,326	0,994	0,624	(0,256)
	Запас хода в условиях ЕЦ, S_A , км	110,3	206,2	184,0 1	60,4	96,2	278,3
	Выбросы CO ₂ с ОГ, q , г/км	499,9	536	584,7	489,9	496	802,5
¹ Жидкое топливо (бензин для ДВС УМЗ–А27460 EvoTech, ЗМЗ–5234 и дизельное топливо для ДВС CUMMINS ISF2,8S4R129).							

⁹ ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

Минимальный путевой расход топлива m (1) в условиях различных ЕЦ достигается на образце газа №2, а максимальный — на образце №4. Для БА3–2215 соответствующий диапазон изменения составляет 3,36 при наименьшем значении 0,128 м³/км, для ГАЗель Next «Citiline» 3,47 при 0,14 м³/км, а для ПА3 3203 — 3,42 при 0,291 м³/км.

Запас хода S_A (2) обратно пропорционален путевому расходу топлива m и составляет от запаса хода на бензине: 21–71 % для БА3–2215, 15–91 % для ГАЗель Next «Citiline» и 22–74 % для ПА3 3203. При расчётах запаса хода газомоторных автомобилей категории М₂ количество баллонов класса КПП–1 объёмом $V_B=0,05$ м³ и максимально допустимым внутренним давлением 200 бар принято $n_B=4$, а для категории М₃ $n_B=6$. Ёмкость топливного бака для категории М₂ составляет $V_{BT}=0,064$ м³, а для М₃ $V_{BT}=0,095$ м³.

Эмиссия диоксида углерода при эксплуатации автобусов на газомоторном топливе по отношению к жидким топливам существенно уменьшается: от 211,9 г/км на образце №4 до 254,7 г/км для БА3–2215, что составляет 62 % и 74 % от удельного выброса CO₂ при движении на бензине; от 230,9 г/км на образце №1 до 280 г/км для ГАЗель Next «Citiline» — это 74 % и 89 % от удельного выброса при движении на дизельном топливе и от 496 г/км на образце №5 до 584,7 г/км для ПА3 3203, что составляет 62 %–73 % от эмиссии на бензине.

Обсуждение. Полученные данные лабораторных исследований отобранных образцов шахтного метана (таблица 2) подтверждают непостоянство его компонентного состава. В частности, объёмная доля CH₄ варьируется от 0,275 на шахте «Комсомолец Донбасса» до 0,485 на шахте им. Чайкина, что составляет 27 % и 50 % соответственно от природного газа, используемого для заправки автомобилей, а также 34 % и 60 % от эталонной газовой смеси по ГОСТ 31371.3–2008¹⁰. Объёмная доля метановых примесей составила до 0,0098 в образце с шахты им. Чайкина. В отобранном газе шахты «Комсомолец Донбасса» значительную часть составляет воздух — по объёму 55 % для ВНС № 2 и 77 % для ВНС № 1, что делает эти источники менее предпочтительными для отбора газомоторного топлива.

В результате анализа данных, полученных в ходе расчётов и приведённых в таблицах 3–5, установлено, что максимальная расчётная потеря мощности автомобильных ДВС при их работе на рассмотренных образцах топлива для искровых двигателей УМЗ–А274–60 EvoTech и ЗМЗ–5234 составила 15 %. При этом для дизельного двигателя CUMMINS ISF2.8S4R129, переоборудованного в газодизель, этот показатель может быть значительно увеличен, что обусловлено снижением коэффициента избытка воздуха (таблица 5) и наличием наддува. Однако без дополнительных исследований детонационной устойчивости этого двигателя, а также прочности его кривошипно-шатунного механизма, подача газа должна ограничиваться.

Установлено, что рассмотренные автомобили в газомоторном исполнении при работе на всех отобранных образцах шахтного метана обладают достаточными тягово-скоростными свойствами для возможности движения в условиях, выбранных ЕЦ по ГОСТ Р 54810–2011¹¹. При этом утилизация шахтного метана путём его использования в качестве топлива позволяет не только сократить поступление этих вредных газов в атмосферу, что, в частности, усиливает парниковый эффект, но и сократить эмиссию CO₂ от автомобильного транспорта, уменьшая его углеродный след.

Общей проблемой при использовании шахтного метана является непостоянство его состава, а также наличие дополнительных примесей в виде воздуха и инертных газов, которые могут составлять значительную объёмную долю. Такое моторное топливо без предварительного обогащения природным газом приводит к необходимости оснащения ДВС системами питания, которые будут обладать увеличенной производительностью (практически втрое) и обратной связью по коэффициенту избытка воздуха с целью поддержания стехиометрического соотношения топливно-воздушной смеси. Ожидается, что стоимость такого оборудования будет превышать стоимость традиционной автомобильной системы хранения и подачи КПП на 50 %. Приведённые в таблице 6 показатели запаса хода могут быть увеличены пропорционально количеству установленных на автомобиль дополнительных баллонов. Однако при массе каждого ≈ 65 кг в заправленном состоянии (на примере КПП–1) настолько же снижается грузоподъёмность (и пассажироместимость) автомобиля. Соответственно, полученные в работе результаты (таблицы 3–6) позволили оценить принципиальную возможность и энергетическую эффективность применения шахтного метана в качестве газомоторного топлива для коммерческого автомобильного транспорта городов Донбасса. Экономическая целесообразность при этом определяется комплексом факторов: стоимостью дегазации, полной стоимостью переоборудования автомобилей, а также принятыми на предприятиях стратегиями осуществления транспортного процесса.

¹⁰ ГОСТ 31371.3–2008. Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределённости. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200068109> (дата обращения: 21.05.2025).

¹¹ ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

Заключение. Таким образом, в результате теоретического анализа, выполненного на основе данных лабораторных исследований, установлено, что шахтный метан угольных месторождений Донбасса возможно использовать в качестве газомоторного топлива для питания двигателей внутреннего сгорания моделей УМЗ–А274–60 EvoTech, ЗМЗ–5234, CUMMINS ISF2.8S4R129, применяемых на коммерческих автотранспортных средствах моделей БАЗ–2215, ПАЗ 3203 и ГАЗель Next «Citiline». Имеющее место при этом снижение максимальной эффективной мощности не препятствует движению автомобилей в условиях городских ЕЦ по ГОСТ Р 54810–2011¹², однако требует оснащения модернизированной системой приготовления топливно-воздушной смеси.

Настоящая работа является частью выполняемого авторами научного исследования. В рамках дальнейшей работы планируется реализация следующих направлений исследования:

1. Уточнение эффективных показателей автомобильных ДВС при работе на шахтном метане. Для этого запланированы моторные испытания в лаборатории специализированного научно-технического центра «Механизация транспортных, строительных и коммунальных работ» ФГБОУ ВО «ДОННАСА» на модернизированном стенде КИ–5543 ГОСНИТИ. Испытания будут проводиться как на установившихся, так и на неустойчивых режимах с применением разработанного авторами устройства для отбора проб отработанных газов (патент РФ RU 227257 U1).
2. Разработка математических моделей скоростных характеристик ДВС и их экологических показателей для последующей оценки эксплуатационных свойств автотранспортных средств.
3. Проведение комплексной оценки экономической эффективности перевода коммерческого автомобильного транспорта Донбасса на газомоторное топливо.
4. Определение величины предотвращенного экологического ущерба окружающей среде.

Список литературы / References

1. Qingdong Qu, Hua Guo, Rao Balusu, Methane Emissions and Dynamics from Adjacent Coal Seams in a High Permeability Multi-Seam Mining Environment. *International Journal of Coal Geology*. 2022;253:103969. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.103969>
2. Songling Jin, Wei Gao, Zichao Huang, Mingshu Bi, Haipeng Jiang, Rongjun Si, et al. Suppression Characteristics of Methane/Coal Dust Explosions by Active Explosion Suppression System in the Large Mining Tunnel. *Fire Safety Journal*. 2024;150(A):104251. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104251>
3. Pengfei Ji, Haifei Lin, Shugang Li, Xiangguo Kong, Xu Wang, Jingfei Zhang, et al. Technical System and Prospects for Precise Methane Extraction in the Entire Life Cycle of Coal Mining under the Goal of “Carbon Peak and Carbon Neutrality”. *Geoenergy Science and Engineering*. 2024;238:212855. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212855>
4. Кузнецов А.Н., Коляда Д.А. Применение газового топлива для автомобилей. В: *Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 110-летию ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» «Инновационные технологии и технические средства для АПК», Воронеж, 10–11 ноября 2022 г.* Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I; 2022. С. 265–269.
5. Kuznetsov AN, Kolyada DA. The Use of Gas Fuel for Cars. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists Dedicated to the 110th Anniversary of Voronezh State Agrarian University Named after Emperor Peter I “Innovative Technologies and Technical Means for Agriculture”, Voronezh, November 10–11, 2022.* Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great; 2022. P. 265–269. (In Russ.)
6. Ander Ruiz Zardoya, Inaki Lorono Lucena, Inigo Oregui Bengoetxea, Jose A Orosa, Research on the New Combustion Chamber Design to Operate with Low Methane Number Fuels in an Internal Combustion Engine with Pre-Chamber. *Energy*. 2023;275:127458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127458>
7. Славина Ю.А., Возов Д.А. Применение природного газа в качестве топлива на автомобильном транспорте. В: *Труды XIV Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок, безопасности движения и эксплуатации транспортных средств» Саратов, 18 апреля 2019 года.* Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.; 2019. С. 359–363.
8. Slavina YuA, Vozov DA. Application of Natural Gas as Fuel in Road Transport. In: *Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference “Topical Issues of Organization of Road Transportation, Traffic Safety and Operation of Vehicles” Saratov, April 18, 2019.* Saratov: Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin; 2019. P. 359–363. (In Russ.)

¹² ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

7. Пазюченко М.А. Экономическая и экологическая эффективность добычи метана из угольных пластов. *Экономические системы*. 2023;16(2):173–181. <https://doi.org/10.29030/2309-2076-2023-16-2-173-181>
- Pazyuchenko MA. Economic and Environmental Efficiency of Methane Extraction from Coal Seams. *Ekonomicheskie Sistemy*. 2023;16(2):173–181. (In Russ.) <https://doi.org/10.29030/2309-2076-2023-16-2-173-181>
8. Vigil DA, Johnson JrRL, Tauchnitz J. Improved Estimation Methods for Surface Coal Mine Methane Emissions for Reporting, Beneficial Use, and Emission Reduction Purposes and Relative to Australia's Safeguard Mechanisms. *Journal of Environmental Management*. 2025;376:124366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124366>
9. Brodny J, Felka D, Tutak M. The Use of the Neuro–Fuzzy Model to Predict the Methane Hazard during the Underground Coal Mining Production Process. *Journal of Cleaner Production*. 2022;368:133258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133258>
10. Шилов А.А., Храмова А.М. Утилизация и использование шахтного метана для получения тепла и электроэнергии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(S4):85–89.
- Shilov AA, Khrantsova AM. Utilization and Use of Mine Methane for Heat and Electricity Generation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008;(S4):85–89. (In Russ.)
11. Нагайцев И., Петрова Т. Сравнительный анализ перспективных технологий снижения выбросов метана на угольных шахтах. *Энергетическая политика*. 2024;(1(192)):38–57. URL: <https://energypolicy.ru/wp-content/uploads/2024/02/ep-%E2%84%961192-1.pdf> (дата обращения: 27.06.2025).
- Nagaytsev I, Petrova T. Comparative Analysis of Promising Abatement Technologies Greenhouse Gas Emissions from Coal Mines. *Energy Policy*. 2024;(1(192)):38–57. (In Russ.) URL: <https://energypolicy.ru/wp-content/uploads/2024/02/ep-%E2%84%961192-1.pdf> (accessed: 27.06.2025).
12. Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Уткаев Е.А., Соколов С.В., Кормин А.Н., Смыслов А.И. Направления утилизации шахтного метана. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015;(6(112)):62–67. URL: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=2977> (дата обращения: 27.06.2025).
- Tailakov OV, Zastrelov DN, Utkaev EA, Sokolov SV, Kormin AN, Smyslov AI. Prospects of the Coal Mine Methane Utilization. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2015;(6(112)):62–67. (In Russ.) URL: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=2977> (accessed: 27.06.2025).
13. Константинова М.С. Пути извлечения и способы промышленного использования шахтного метана для энергетических целей. *Вестник современных исследований*. 2019;(1.8(28)):95–99.
- Konstantinova MS. Ways of Extraction and Industrial Use of Coal Mine Methane for Energy Purposes. *Vestnik Sovremennykh Issledovaniy*. 2019;(1.8(28)):95–99. (In Russ.)
14. Дурнин М.К. Выбор эффективных технологий утилизации шахтного метана для повышения промышленной безопасности угольных шахт. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007;(S13):415–429.
- Durnin MK. The Choice of Effective Technologies for the Utilization of Coal Mine Methane to Improve the Industrial Safety of Coal Mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;(S13):415–429. (In Russ.)
15. Белошицкий М.В., Троицкий А.А. Использование шахтного метана в качестве энергоносителя. *Турбины и дизели*. 2006;(6):2–9. URL: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/2108> (дата обращения: 27.06.2025).
- Beloshitskii MV, Troitskii AA. The Use of Coal Mine Methane as an Energy Carrier. *Turbines & Diesels*. 2006;(6):2–9. (In Russ.) URL: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/2108> (accessed: 27.06.2025).
16. Строков А.П., Левтеров А.М., Нечволод П.Ю. Утилизация шахтного метана в экологичной когенерационной установке с поршневым ДВС. Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2010;(48):89–93.
- Strokov AP, Levterov AM, Nechvolod PYu. Recycling of Mine Methane in Ecological Cogeneration Plant with Piston ICE. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2010;(48):89–93. (In Russ.)
17. Кулешов А.А. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС. Дис. докт. техн. наук. Москва; 2012. 235 с.
- Kuleshov AA. *Development of Calculation Methods and Optimization of Internal Combustion Engine Work Processes*. Dr. Sci. (Eng.) diss. Moscow; 2012. 235 p. (In Russ.)
18. Gorozhankin SA, Bumaga AD, Savenkov NV. Improving Car Fuel Efficiency by Optimising Transmission Parameters. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2019;16(3):7019–7033. <https://doi.org/10.15282/ijame.16.3.2019.14.0526>

Об авторах:

Никита Владимирович Савенков, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт, сервис и эксплуатация» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (286128, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2.), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), n.v.savenkov@donnasa.ru

Екатерина Леонидовна Головатенко, старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (286128, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2.), [SPIN-код](#), [ORCID](#), e.l.golovatenko@donnasa.ru

Заявленный вклад авторов:

Н.В. Савенков: разработка концепции, научное руководство.

Е.Л. Головатенко: формальный анализ, написание черновика рукописи, визуализация.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Nikita V. Savenkov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automobile Transport, Service and Operation, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (2, Derzhavina St., Makeyevka, Donetsk People's Republic, 286128, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), n.v.savenkov@donnasa.ru

Ekaterina L. Golovatenko, Senior Lecturer of the Technosphere Safety Department, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (2, Derzhavina St., Makeyevka, Donetsk People's Republic, 286128, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), e.l.golovatenko@donnasa.ru

Claimed Contributorship:

NV Savenkov: conceptualization, supervision.

EL Golovatenko: formal analysis, writing – original draft preparation, visualization.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

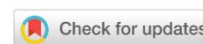
All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 16.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 11.07.2025

Принята к публикации / Accepted 24.07.2025

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 669.1

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-221-229>

Идентификация морфологии поверхности стального естественного феррито-мартенситного композита с использованием программного обеспечения ImageJ

В.В. Дука^{id}, Л.П. Арефьева^{id}✉

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ ludmilochka529@mail.ru

EDN: ZHEYTV

Аннотация

Введение. Современные материалы требуют глубокого понимания их структуры для прогнозирования эксплуатационных свойств. Применение различных методик и программ для визуализации, таких как оптическая и электронная микроскопия, ограничено двумерными изображениями, что затрудняет детальный анализ морфологии. Несмотря на наличие исследований в этой области, существует недостаток в понимании трехмерной организационной структуры материалов, что создает пробелы в знании о влиянии геометрии на физические свойства композитов. Программа ImageJ была выбрана для данного исследования благодаря своей многофункциональности и поддержке множества форматов, что значительно упрощает анализ. Она также предлагает мощные инструменты для автоматизации процессов и позволяет извлекать 3D-информацию из двумерных изображений, что критично для точной идентификации структурных компонентов. Настоящее исследование направлено на устранение недостающей информации, фокусируясь на анализе морфологии стального феррито-мартенситного композита. Цель работы — идентификация 3D-структуры поверхности композита, что позволит улучшить понимание его эксплуатационных характеристик и подтвердить значимость выбора подходящих методов визуализации.

Материалы и методы. В качестве исходного материала для анализа было выбрано изображение микроструктуры стального естественного феррито-мартенситного композита (ЕФМК), полученное на оптическом микроскопе Метам РВ–22. Рассматриваемая микроструктура состоит из 2-х фаз, где светлой фазой является феррит, а темной — мартенсит. Использовалась программа ImageJ, адаптированная под различные форматы электронно-микроскопических и металлографических изображений и позволяющая получить широкий набор геометрических характеристик поверхности.

Результаты исследования. Исследование с использованием программного обеспечения ImageJ микроструктуры стального феррито-мартенситного композита выявило характерную строчечную структуру, состоящую из светлой фазы (феррита) и темной фазы (мартенсита). Обработка изображений, включая масштабирование и сегментацию, привела к преобразованию в черно-белый формат, что позволило четко визуализировать границы между фазами и геометрические формы частиц. Четырехпараметрическая калибровочная функция Родбарда обеспечила дополнительные данные о площади, стандартном отклонении, асимметрии и эксцессе, что затрудняет анализ структуры. В результате отмечено 40,8 % площади, занятый ферритом, и 59,2 % — мартенситом. Профиль поверхности показывает чередование слоев из разориентированных кристаллов, а количественная информация позволила создать четкое 3D-изображение поверхности композита.

Обсуждение. Измеряемая в пикселях толщина границ зерен оказывается тоньше, чем в других графических редакторах, за счёт чего изменяется площадь и соответственно количество светлой фазы. Изменение количественного соотношения фаз «феррит-мартенсит» связано с тем, что в программе подавляется «шум» изображения и нераспознанная серая фаза прочитывается более чётко: часть её относится к светлой фазе, и часть — к тёмной.

В условиях современных технологий и высоких требований к прочности и износостойкости, понимание микро-структуры становится ключевым для оптимизации свойств материалов. Выбор подходящих методов визуализации, таких как применение программного обеспечения ImageJ, не только позволяет получить точные данные о распределении фаз, но также способствует более глубокому анализу механических свойств, таких как твердость и устойчивость к коррозии. Эти аспекты важны в контексте роста инновационных технологий, где надежность и долговечность материалов играют центральную роль.

Заключение. Применение программного комплекса ImageJ для визуализации в 2D и 3D графике и качественно-го и количественного анализа морфологии поверхности гетерогенных структурных состояний материалов является удобным, эффективным и информативным способом получения геометрических характеристик частиц структурных составляющих. Также возможно проведения картирования формы и размеров частиц. Автоматизация процесса приводит к экономии затрат времени и ресурсов, минимизирует влияние субъективных факторов на результат на разных этапах проведения анализа. Идентификация 3D-структуры поверхности композита помогает углубить знания о его эксплуатационных характеристиках, что крайне актуально в условиях современных технологических требований. Это понимание позволяет разрабатывать новые материалы, улучшать их характеристики, такие как прочность, износостойкость и устойчивость к коррозии, а также предсказывать, как материалы будут вести себя в реальных условиях.

Ключевые слова: ImageJ, композит, мартенсит, профиль поверхности, пиксель, микроструктура, масштаб

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Дука В.В., Арефьева Л.П. Идентификация морфологии поверхности стального естественного феррито-мартенситного композита с использованием программного обеспечения ImageJ. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(3):221–229. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-221-229>

Original Empirical Research

Surface Morphology Identification of Steel Natural Ferrite-Martensitic Composite Using ImageJ Software

Valentina V. Duka^{ID}, Lyudmila P. Arefeva^{ID}✉

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ ludmilochka529@mail.ru

Abstract

Introduction. Modern materials require a deep understanding of their structure in order to predict their performance properties. However, the use of various imaging techniques and programs, such as optical and electron microscopy, is limited to two-dimensional images, making it difficult to fully analyze the morphology of materials. Despite research in this field, there is still a lack of knowledge about the three-dimensional organization of materials, leading to gaps in our understanding of how geometry affects the physical properties of composite materials. ImageJ was chosen for this study due to its versatility and ability to support multiple formats, simplifying the process of analysis. It also offers powerful tools for automated processing and allows users to extract three-dimensional information from two-dimensional images. This is crucial for accurately identifying structural components. The current study aims to fill in the missing information by analyzing the morphology of a steel ferrite-martensite composite. The aim of the work is to determine the 3D surface structure of the composite, which will improve understanding of its performance characteristics and confirm the significance of selecting appropriate visualization techniques.

Materials and Methods. An image of the microstructure of a steel natural ferrite-martensitic composite (NFMFC), obtained using a Metam PB–22 optical microscope, was chosen as the starting material for analysis. The microstructure in question consists of two phases: the light phase being ferrite and the dark phase being martensite. The ImageJ program, which has been adapted to various formats of electron microscopic and metallographic images, was used to obtain a wide range of geometric characteristics of the surface.

Results. A study using ImageJ software on the microstructure of a steel ferrite-martensitic composite revealed a characteristic lineage structure consisting of a light phase (ferrite) and a dark phase (martensite). Image processing, including scaling and segmentation, led to the conversion to black and white format, allowing for clear visualization of the boundaries between the phases and the geometric shapes of the particles. The four-parameter Rodbard calibration function provided additional data on area, standard deviation, skewness, and kurtosis, making it difficult to analyze the structure. As a result, ferrite occupied 40.8% of the area, while martensite occupied 59.2%. The surface profile revealed an alternating pattern of misoriented crystals, and the quantitative information allowed for the creation of a clear 3D image of the composite surface.

Discussion. The thickness of grain boundaries in pixels was found to be thinner in this graphic editor than in others, which affected the area and, consequently, the amount of light phase. The change in the quantitative ratio of ferrite-martensite phases was due to the program's ability to suppress image “noise” and more clearly read the unrecognized gray phase, with some of it belonging to the light phase and some to the dark phase.

With the advancement of technology and the increasing demands for strength and wear resistance, understanding the microstructure of materials has become crucial for optimizing their properties. The selection of appropriate imaging techniques, such as the use of ImageJ software, not only allows for accurate data on phase distribution, but also contributes to a more in-depth analysis of mechanical properties such as hardness and corrosion resistance. These aspects are important in the context of the development of innovative technologies where reliability and durability are essential factors.

Conclusion. The use of the ImageJ software package for visualization in 2D and 3D graphics and qualitative and quantitative analysis of the surface morphology of heterogeneous structural states of materials is a convenient, effective and informative way to obtain geometric characteristics of particles of structural components. It is also possible to map the shape and size of particles. Automation of this process leads to time and resource savings, minimizing the influence of subjective factors on results at different stages of analysis. Identification of the 3D surface structure of composites helps to deepen our understanding of their operational characteristics, which is crucial in the context of modern technological demands. This knowledge allows us to develop new materials with improved properties such as strength, wear and corrosion resistance. Furthermore, it enables us to predict how materials will perform in actual conditions.

Keywords: ImageJ, composite, martensite, surface profile, pixel, microstructure, scale

Acknowledgments. The authors would like to thank the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and comments that allowed them to improve its quality.

For citation. Duka VV, Aref'eva LP. Surface Morphology Identification of Steel Natural Ferrite-Martensitic Composite Using ImageJ Software. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(3):221–229. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-221-229>

Введение. В настоящее время в области материаловедения активно используются множество методик и специализированных компьютерных программ, которые позволяют расширять возможности визуализации строения материалов за счет повышения разрешающей способности. Это, в свою очередь, увеличивает вероятность прогнозирования эксплуатационных свойств. Морфология поверхности, её химический состав и структурные компоненты являются ключевыми показателями при изучении структуры материалов, поскольку они напрямую влияют на их свойства, поведение и эксплуатационные характеристики. Традиционные методы определения морфологии поверхности материалов включают несколько ключевых техник, которые позволяют оценить топографию, шероховатость, структуру и дефекты поверхности. К ним относятся: оптическая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, трансмиссионная электронная микроскопия, профилометрия и другие. Однако все эти методы, несмотря на широкое применение, дают возможность получать только двумерные изображения, что ограничивает информацию о рельефе поверхности, формируемом фазовым составом материала, и, как правило, являются разрушающими методами контроля. Вместе с тем использование программных алгоритмов современных цифровых технологий позволяет извлекать 3D информацию из двумерного изображения структуры без потери разрешения, а также обеспечивает эффективное хранение и быструю интерпретацию 3D изображений как на микро-, так и на нано-уровнях. Электронные 3D структурные изображения повышают достоверность морфологической организации материала благодаря прецизионной детализации. Это позволяет осуществить точную оценку геометрических размеров структурных компонентов и локально определить их физические и механические свойства с минимальными погрешностями. При выборе программ для визуализации 3D изображений важно учитывать поставленные цели и задачи исследования, а также удобство работы с интерфейсом и его функциональные возможности. В настоящее время существует множество прикладных программ для обработки изображений с разнообразным набором возможностей. Среди доступных программных комплексов, таких как Adobe Photoshop [1], Gimp [2], CellProfiler [3], Huygen [4], Leica QWin [5], Gwyddion, ImageJ выделяется многофункциональностью, поддержкой множества форматов, гибкостью, производительностью и возможностями автоматизации. Эти качества делают её особенно востребованной при работе с изображениями [6]. Цифровой способ обработки изображений для анализа рельефа поверхности с использованием программы ImageJ позволяет извлекать 3D информацию из двумерных изображений, полученных методами оптической микроскопии, без потери разрешения [7]. Это особенно важно при идентификации морфологии структурных компонентов композита и последующей интерпретации его свойств в целом. В данной работе программный пакет ImageJ впервые применяется для исследования естественного феррито-мартенситного композита [8]. Цель работы — идентификация морфологии поверхности стального естественного феррито-мартенситного композита с использованием программного обеспечения ImageJ.

Материалы и методы. Объектом исследования являлось изображение микроструктуры естественного феррито-мартенситного композита, полученного с помощью оптического микроскопа Метам РВ–22 [9].

Для получения дополнительной информации о структурном состоянии ЕФМК в работе была использована программа ImageJ, адаптированная под различные форматы электронно-микроскопических и металлографических изображений [10]. Она позволяет рассчитать площадь, длину, объем, периметр, угловые размеры поверхности структурных составляющих, в том числе со статистическими показателями как в пиксельных значениях, так и в системе СИ [11]. При этом геометрические характеристики определяются в результате последовательного картирования структуры (рис. 1) с последующим интегрированием всей площади изображения [12].

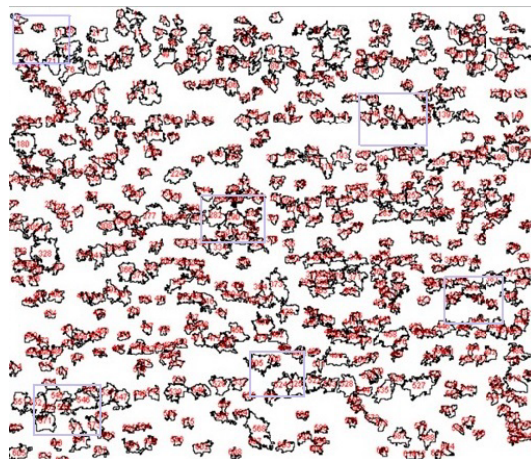


Рис. 1. Последовательное картирование структуры ЕФМК

Опция «Set Measurements» программы позволяет рассчитать как общую, так и относительную площади частиц структурных составляющих, а также их средний размер [9–12, 13]. Калибровочная четырехпараметрическая функция Родбарда, согласно уравнению 1, точно идентифицирует оттенки черного и белого благодаря анализу интенсивности пикселей вдоль линии внутри изображения и преобразует 2D-поверхность в 3D-изображение [13, 14].

$$y = d + \frac{a - b}{1 + \left(\frac{x}{c}\right)^b}, \quad (1)$$

где y — значение функции; x — независимая переменная; d — максимальное значение функции (верхняя асимптота); a — минимальное значение функции (нижняя асимптота); b — параметр, определяющий наклон (крутизну) кривой; c — значение, при котором функция принимает значение, равное средней точке между a и d .

ЕФМК — композит на основе горячекатаной доэвтектоидной строительной стали 14Г2 с исходной строчечной феррито-перлитной структурой. После закалки из межкритического интервала температур (МКИ) структура такого композита представляет собой чередующиеся слои феррита и мартенсита, выполняющего роль армирующей составляющей. Такая структура позволяет получать необычное соотношение высокой пластичности, вязкости и прочности.

Известно, что в ЕФМК основные показатели механических, физических и эксплуатационных свойств определяются химическим составом и количественным соотношением фаз. Соотношение объемных долей феррита и мартенсита, а также микротвердость упрочняющей фазы зависят от температуры закалки из МКИ. Установлено, что при закалке при температуре 730 °С объемная доля мартенситной составляющей не превышает 25–30 %, а ее микротвердость составляет 735–740 МПа. При закалке при более высокой температуре — 780 °С — формируется структура мартенсита с большей объемной долей — 55–60 %, но с более низкой микротвердостью — 450–455 МПа. Понижение микротвердости связано с тем, что при увеличении температуры закалки в МКИ количество углерода в мартенсите уменьшается [15].

Результаты исследования. На рис. 2 а, полученного с помощью оптического микроскопа Метам РВ–22, представлена характерная строчечная структура ЕФМК, состоящая из «слоев» светлой фазы — феррита и темной фазы — мартенсита. Однако детализация структурных составляющих затруднительна. После предварительной обработки изображения путем последовательного масштабирования, сегментации и извлечения геометрических характеристик программа ImageJ трансформировала изображение в черно-белый 8-битный формат (рис. 2 б), где каждый пиксель — это одно байтовое значение в диапазоне от 0 до 255, обозначающее яркость. Картина микроструктуры приобретает высокую контрастность, а на ней четко просматриваются геометрическая форма частиц, границы между фазовыми слоями, что существенно расширяет возможности структурного анализа 2D изображений морфологии гетерогенной структуры естественного феррито-мартенситного композита [16].

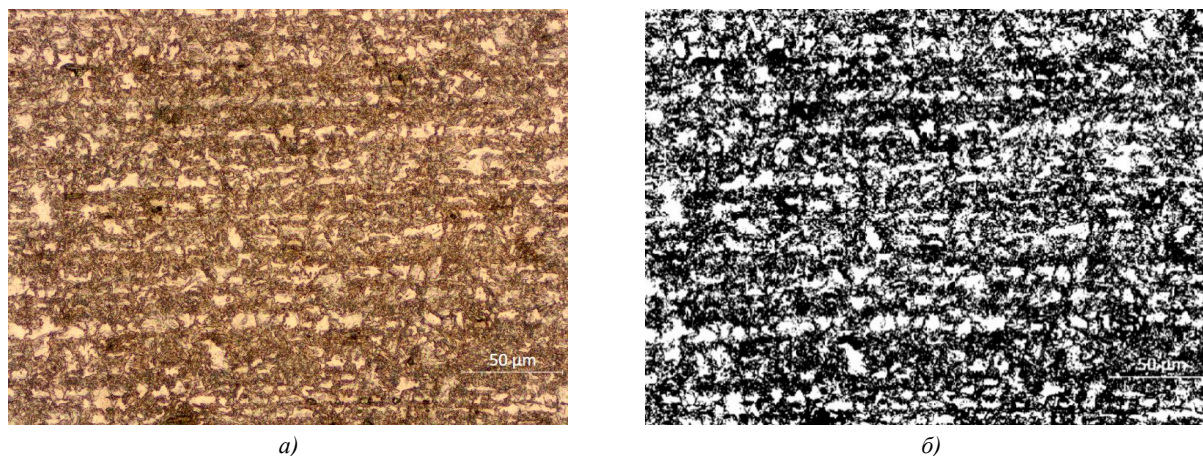


Рис. 2. Микроструктура ЕФМК после закалки из МКИ (светлая область-феррит, темная область-мартенсит):
 а — микроструктура ЕФМК до обработки в программе ImageJ; б — микроструктура ЕФМК после преобразования
 в черно-белую графику с помощью компьютерной программы ImageJ

Использование четырехпараметрической калибровочной функции Родбарда (рис. 3) позволило извлечь дополнительную информацию о заданных в опции «Set Measurements» параметрах структурных составляющих — общей площади исследования (область), стандартном отклонении, асимметрии и эксцессе пиксельного изображения, доле площади и периметре анализируемых фаз. Значения указанных параметров с учетом масштабирования приведены в таблице 1.

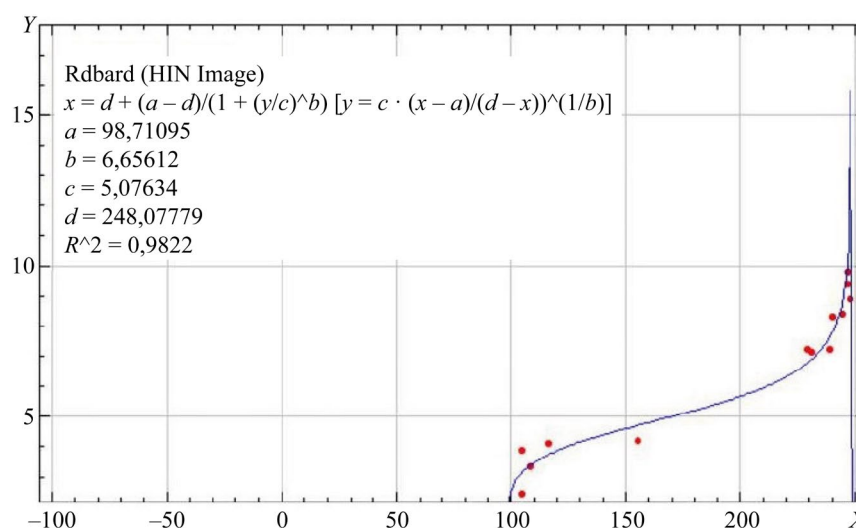


Рис. 3. Четырехпараметрическая калибровочная функция Родбарда,
 по оси X — расстояние вдоль линии, оси Y — интенсивность пикселей

Таблица 1

Результаты заданных измерений в диалоговом окне «Set Measurements»

Параметр	Значение
Область (пикс)/(мкм ²)	313908 / 66789
Стандартное отклонение	124,7
Асимметрия	0,4
Доля площади светлой фазы — феррита (%)	40,8
Доля площади темной фазы — мартенсита (%)	59,2
Среднее значение серого цвета	101,0
Периметр (пикс)/(мкм)	2248 / 478,3
Эксцесс	–1,8

По полученным данным был построен двумерный график профиля (рис. 4), из которого следует, что на поверхности ЕФМК сформирована строчечная структура, отличительной особенностью которой является наличие чередующихся слоев мартенсита и феррита, состоящих из разориентированных в пространстве кристаллов, на что указывают локальные максимумы и минимумы профиля.

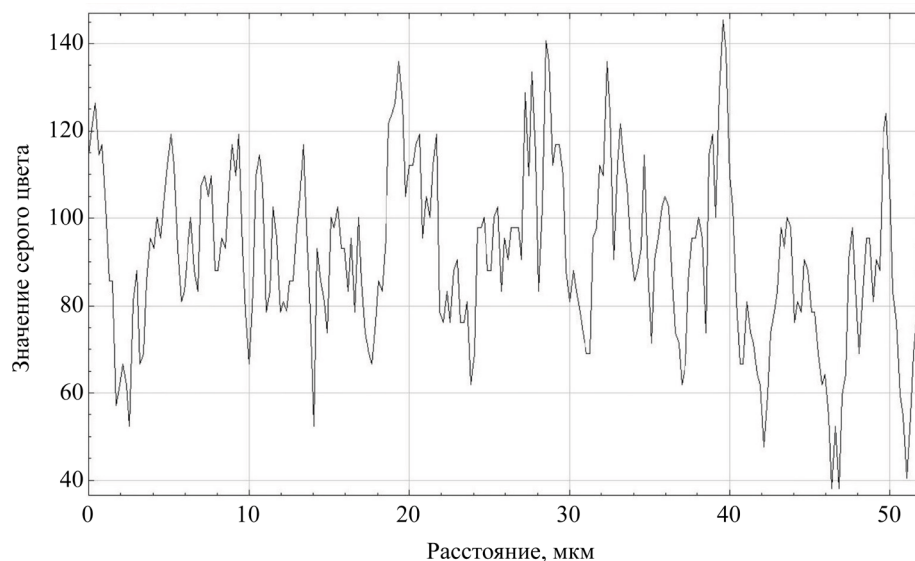


Рис. 4. Профиль поверхности ЕФМК

С помощью, встроенной в опцию «Set Measurements» дополнительной функции «Analyze Particles» была проведена фильтрация объектов по размерам и форме, что дало возможность определить общую и относительную площади рассматриваемых структурных составляющих, а также их средний размер. Таким образом, суммарное число частиц темной и светлой фазы по всей площади изображения составляет 1 088, среди которых 27 316 мкм² или 40,8 % от общей площади в 66 789 мкм² заняты светлой ферритной составляющей со средним размером 4,72 мкм, а оставшаяся доля 39 473 мкм² или 59,2 % — темной фазой мартенсита со средним размером 5,29 мкм. Количественная информация о расположении и интенсивности пикселей позволила получить четкое 3D-изображение профиля поверхности ЕФМК (рис. 5).

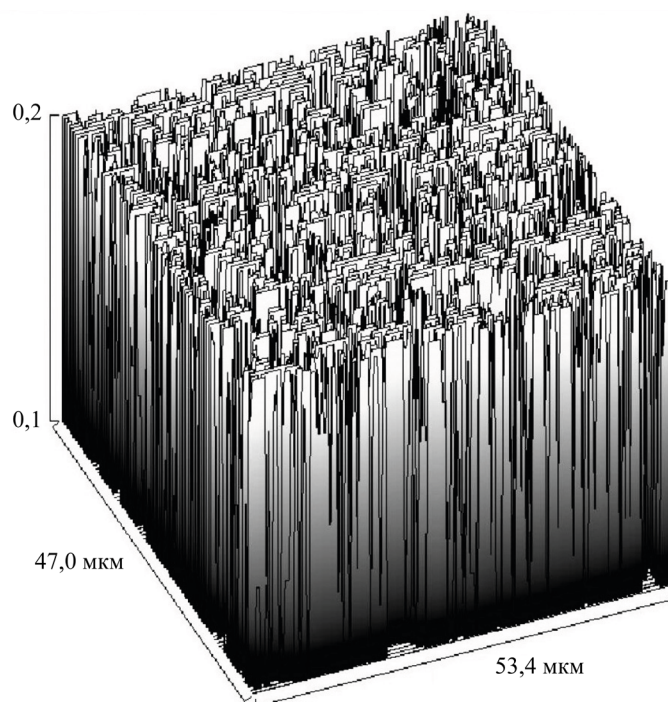


Рис. 5. 3D-изображение профиля поверхности ЕФМК

Обсуждение. Из работ [17, 18] известно, что процентное соотношение фаз феррита и мартенсита при температуре закалки 790–800 °С в среднем составляет 35/65–30/70. Количественное соотношение феррита и мартенсита на исследуемом в программе ImageJ изображении оказалось, соответственно, ~ 40/60. Отклонение полученных данных от результатов работ [17, 18] объясняется тем, что в программе ImageJ осуществляется обработка изображения по интенсивности пиков, что позволяет более точно просматривать границы зерен. Измеряемая в пикселях толщина границ зерен оказывается тоньше, чем в других графических редакторах, что, в свою очередь, изменяет площадь и соответствующее количество светлой фазы. Изменение количественного соотношения фаз «феррит-мартенсит» связано с тем, что в программе подавляется «шум» изображения, и нераспознанная серая фаза считывается более чётко: часть её относится к светлой фазе, а часть — к тёмной. Полученные результаты позволяют более точно количественно охарактеризовать степень неоднородности и расположение феррита и мартенсита на исследуемом изображении. Результаты хорошо согласуются с данными работ и в целом соответствуют полученным визуальным изображениям.

Заключение. Программа ImageJ предоставляет удобные инструменты для визуализации и документирования результатов исследований гетерогенных структурных состояний материалов различного функционального назначения, позволяя создавать отчеты с наглядными иллюстрациями формата 2D и 3D графики. Широкий функционал встроенных опций позволяет оценивать различные геометрические параметры морфологии частиц и, на этой основе, проводить анализ формы, размеров, расположения, количества и даже осуществлять картирование. Применение данного программного комплекса для изучения морфологии поверхности ЕФМК путем обработки фотографий микроструктуры существенно повышает эффективность, точность и объективность исследования. Автоматизация процесса значительно экономит время и человеческие ресурсы, а также минимизирует вариабельность данных, связанную с ручной обработкой. Использование таких инструментов особенно целесообразно в сочетании с традиционными методами получения данных, что позволяет получить более полное и надежное представление о свойствах и структуре материалов.

Список литературы / References

1. Tim Gräning, Lizhen Tan, Ishtiaque Robin, Yutai Katoh, Ying Yang. A Novel Design of Transitional Layer Structure between Reduced Activation Ferritic Martensitic Steels and Tungsten for Plasma Facing Materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24:4285–4299. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.019>
2. Garcia JuM, Accioly Monteiro AC, Barcelos Casanova AM, Checca Huaman NR, Monteiro SN, Brandao LP. Microstructural Analysis of Phase Precipitation during High Temperature Creep in AISI 310 Stainless Steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;23:5953–5966. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.175>
3. Karin P, Chammana P, Oungpakornkaew P, Rungsritanapaisan P, Amornprapa W, Charoenphonphanich C, et al. Impact of Soot Nanoparticle Size and Quantity on Four-Ball Steel Wear Characteristics Using EDS, XRD and Electron Microscopy Image Analysis. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;16:1781–1791. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.111>
4. Setareh Medghalchi, Ehsan Karimi, Sang-Hyeok Lee, Benjamin Berkels, Ulrich Kerzel, Sandra Korte-Kerzel. Three-Dimensional Characterisation of Deformation-Induced Damage in Dual Phase Steel Using Deep Learning *Journal Materials & Design*. 2023;232:112108. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112108>
5. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. *Цифровые изображения. От получения до обработки*. Минск: ОИПИ НАН Беларуси; 2014. 202 с.
Starovoitov VV, Golub YuI. *Digital Images. From Receipt to Processing*. Minsk: UIIP NAS of Belarus; 2014. 202 p. (In Russ.)
6. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Домбровский Ю.М., Дука В.В. Структурная организация и свойства естественного стального ферритно-мартенситного композита. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2020;(6(780)):15–21. URL: <https://mitom.folium.ru/index.php/mitom/article/view/251> (дата обращения: 01.06.2025).
Pustovoit VN, Dolgachev YuV, Dombrovskii YuM, Duka VV. The Structure and Properties of a Natural Steel Ferritic-Martensitic Composite. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2020;(6(780)):15–21. (In Russ.) URL: <https://mitom.folium.ru/index.php/mitom/article/view/251> (accessed: 01.06.2025).
7. Вернези Н.Л., Русаков В.А. О контроле прочности металла конструктивных элементов плавучих кранов. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2022;(3):50–51. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-48-53>
8. Vernezi NL, Rusakov VA. On the Control of Metal Strength of Structural Elements of Floating Cranes. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2022;(3):50–51. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-48-53>
9. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Домбровский Ю.М. Баллистическая стойкость стали со структурой естественного феррито-мартенситного композита. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2022;(3):54–59. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-54-59>

Pustovoi VN, Dolgachev YuV, Dombrovskii YuM. Ballistic Resistance of Steel with the Structure of a Natural Ferrite-Martensitic Composite. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2022;(3):54–59. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-54-59>

9. Зильбергейт М.А., Темрук В.И. Применение пакета ImageJ для обработки изображений, полученных электронной сканирующей микроскопией (на примере анализа бумаги). *Полимерные материалы и технологии*. 2017;3(1):71–74.

Zilbergleit MA, Temruk VI. Package ImageJ. Application for Image Processing Obtained Scanning Electronic Microscopy (Paper Analysis). *Polymer Materials and Technologies*. 2017;3(1):71–74. (In Russ.)

10. Иоффе А.И. Метод оценки неоднородности выделенной области. *Исследование земли из космоса*. 2013;(3):92–94. <https://doi.org/10.7868/S0205961413020048>

Ioffe AI. Method for Estimation of a Given Area Relief Roughness. *Earth Research from Space*. 2013;(3):92–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0205961413020048>

11. Burger W, Burge MJ. *Digital Image Processing. An Algorithmic Introduction Using Java. Second Edition*. London: Springer; 2016. 811 p.

12. Атрошенко С.А., Майер С.С., Смирнов В.И., Структурно-фазовое состояние металла рельса с внутренней трещиной после длительной эксплуатации. *Журнал технической физики*. 2021;91(9):1363–1368. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.09.51215.72-21>

Atroshenko SA, Maier SS, Smirnov VI. Structural Phase State of the Metal of a Rail with an Internal Crack after Long-Term Operation. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*. 2021;91(9):1363–1368. (In Russ.) <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.09.51215.72-21>

13. Torres AL, Bidarra SJ, Pinto MT, Aguiar PC, Silva EA, Barrias CC. Guiding Morphogenesis in Cell-Instructive Microgels for Therapeutic Angiogenesis. *Biomaterials*. 2018;154:34–47. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2017.10.051>

14. Rueden CT, Schindelin J, Hiner MC, DeZonia BE, Walter AE, Arena ET. ImageJ2: ImageJ for the Next Generation of Scientific Image Data. *BMC Bioinformatics*. 2017;18(1):529. <https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z>

15. Duka VV, Pustovoi VN, Ostapenko DA, Aref'eva LP, Dombrovskij YuM. The Use of the Atomic Force Microscopy to Investigate the Structure of Steel 14G2. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;680:012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/680/1/012023>

16. Дука В.В., Арефьева Л.П., Пустовойт В.Н., Киселева Д.А. Исследование строчечной структуры строительной стали методом атомно-силовой микроскопии. *Письма о материалах*. 2020;10(4(40)):445–450. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-4-445-450>

Duka VV, Aref'eva LP, Pustovoi VN, Kiseleva DA. Study of the Lineage Structure of Building Steel by Atomic Force Microscopy. *Letters on Materials*. 2020;10(4(40)):445–450. (In Russ.) <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-4-445-450>

17. Арефьева Л.П., Дука В.В., Забияка И.Ю. Взаимосвязь структурно-фазового состава с механизмом разрушения высокопрочной строительной стали. *Письма в журнал технической физики*. 2022;48(8):39–42. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.08.52366.19093>

Aref'eva LP, Duka VV, Zabyaka IY. Relationship between the Structural-Phase Composition and the Fracture Mechanism of High-Strength Construction Steel. *Technical Physics Letters*. 2022;48(8):39–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.08.52366.19093>

18. Duka VV, Aref'eva LP, Mitrin BI, Pustovoi VN. Investigation of the Fracture Structure of a Composite Material after Bending Test by Atomic Force Microscopy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1029:012059. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012059>

Об авторах

Валентина Владимировна Дука, старший преподаватель, кафедра «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), valentina.duka.92@mail.ru

Людмила Павловна Арефьева, доктор физико-математических наук, доцент, доцент, кафедра «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), ludmilochka529@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

В.В. Дука: разработка концепции, формальный анализ, проведение исследований, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

Л.П. Арефьева: разработка концепции, курирование данных, разработка методологии, предоставление ресурсов, научное руководство, написание рукописи — внесение замечаний и исправлений.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Valentina V. Duka, Senior Lecturer of the Department of Materials Science and Technology of Metals, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), valentina.duka.92@mail.ru

Lyudmila P. Aref'eva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Science and Technology of Metals, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), ludmilochka529@mail.ru

Claimed Contributorship:

VV Duka: conceptualization, formal analysis, investigation, validation, visualization, writing – original draft preparation.

LP Aref'eva: conceptualization, data curation, methodology, resources, supervision, writing – review & editing.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

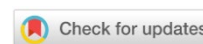
All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 10.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 30.06.2025

Принята к публикации / Accepted 14.07.2025

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.762: 621.7 016.2

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-230-241>

Влияние способа получения и структуры хромоникелевых коррозионностойких сталей на кинетику формирования наружной обоймы сферических шарниров



EDN: OHKNMX

Н.А. Конько^{ID}✉, Б.Г. Гасанов^{ID}Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация✉ konko2013@mail.ru

Аннотация

Введение. Исследуя вопросы износостойкости шарниров, авторы представленной работы ранее выяснили, как особенности хромоникелевых коррозионно-стойких сталей влияют на формирование наружной обоймы сферических шарниров. Прессовки из 12X18H10T, ВП 304.200.30 и 304L-AW-100 спекали 3 ч в вакууме при 1200 °С. Однако практика требует испытаний разных сталей при разных условиях. В данной статье описана катаная нержавеющая сталь 10X18H9. Порошковую ВП 304.200.30 спекали 2 ч при 1150 °С. Цель работы — показать, как способ получения и структура металла определяют кинетику формирования наружной обоймы сферических шарниров и в итоге — прочность изделия.

Материалы и методы. Образцы из 10X18H9¹ и ВП 304.200.30 радиально сжимали по ГОСТ 26529–85², растягивали³ на испытательной машине УММ-5⁴. Твердость измеряли на приборе Роквелла ТР 5006⁵, микротвердость — по Виккерсу на приборе HVS-1000⁶. Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре XRD-6100. Использовали микроскопы *Tescan VEGA II LMU* (для электронно-зондовых исследований), *Quanta 200* и *Altami MET-1M* (для изучения микроструктуры и металлографии). Холодную штамповку наружной обоймы с фланцем сферического шарнира моделировали в *QForm*.

Результаты исследования. Предел прочности и текучести ВП 304.200.30 соизмерим с показателями некоторых хромоникелевых аустенитных сталей, но уступает им по пластичности. Сопоставление 10X18H9 и ВП 304.200.30 выявило различия в механизмах деформации. Критическое ограничение для порошковой стали — не оксидная фаза, а локализация оксидов на границах частиц, что провоцирует хрупкое разрушение при растяжении. Из-за химической неоднородности частиц и остаточной пористости относительное удлинение порошковой стали в 6 раз меньше, чем катаной. Но в условиях сжатия спеченный материал упрочняется до 195 HV, то есть подходит для производства наружной обоймы сферических шарниров.

¹ ГОСТ 5632–2014. *Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200113778> (дата обращения: 21.06.2025).

² ГОСТ 26529–85. *Материалы порошковые. Метод испытания на радиальное сжатие*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200011117> (дата обращения: 21.06.2025).

³ ГОСТ 1497–84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004888> (дата обращения: 21.06.2025).

⁴ ГОСТ 28840–90. *Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023577> (дата обращения: 21.06.2025).

⁵ ГОСТ 9013–59. *Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004663> (дата обращения: 21.06.2025).

⁶ ГОСТ 9450–76. *Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012869> (дата обращения: 21.06.2025).

Обсуждение. Анализ особенностей деформаций спеченных и катаных сталей подтвердил адекватность предложенной методики оценки деформированного состояния образцов при холодной штамповке наружной обоймы сферических шарниров.

Заключение. Результаты исследования позволяют прогнозировать очаги зарождения макродефектов и оптимизировать производство сферических шарниров.

Ключевые слова: катаная сталь 10X18N9, порошковая сталь ВП 304.200.30, наружная обойма сферического шарнира, микротрещины хромоникелевой стали

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Конько Н.А., Гасанов Б.Г. Влияние способа получения и структуры хромоникелевых коррозионностойких сталей на кинетику формирования наружной обоймы сферических шарниров. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(3):230–241. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-230-241>

Original Empirical Research

Influence of the Production Method and the Structure of Chromium-Nickel Corrosion Resistant Steels on the Kinetics of the Formation of the Outer Cage of Spherical Joints

Nikolai A. Konko , Badrudin G. Gasanov 

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

✉ konko2013@mail.ru

Abstract

Introduction. Investigating the issues of wear resistance of joints, the authors of this paper have previously studied how the features of chromium-nickel corrosion resistant steels affect the shaping of the outer cage of spherical hinges. They sintered compacts made of 12Kh18N10T, VP 304.200.30 and 304L-AW-100 at 1,200°C in vacuum for 3 hours. However, in practice, it is necessary to test different steels in different conditions. This paper describes 10Kh18N9 rolled stainless steel. Powder VP 304.200.30 was sintered at 1,150°C for 2 hours. The aim of the research is to demonstrate how the production method and the metal structure affect the kinetics of the outer cage formation and, consequently, the strength of the product.

Materials and Methods. Samples made of 10Kh18N9 and VP 304.200.30 were radially compressed according to GOST 26529–85 and stretched on an UMM-5 testing machine. Hardness was measured using a Rockwell TP 5006 instrument, and microhardness was measured according to Vickers on an HVS-1000 instrument. X-ray phase analysis was performed on an XRD-6100 diffractometer. Microscopes *Tescan VEGA II LMU* (for electron probe studies), *Quanta 200* and *Altami MET-1M* (for studying microstructure and metallography) were used. Cold stamping of the outer cage with a spherical hinge flange was modeled in *QForm*.

Results. The strength and yield strength of VP 304.200.30 were comparable to those of some chromium-nickel austenitic steels, but were inferior in terms of ductility. A comparison between 10Kh18N9 and VP 304.200.30 revealed differences in their deformation mechanisms. The critical limitation for powder steel was not the oxide phase, but the localization of oxides at particle boundaries, which provoked brittle fracture under tension. Due to the chemical heterogeneity in the particles and residual porosity, powder steel had a 6-fold lower elongation compared to rolled steel. However, under compression conditions, sintered material could reach a hardness of 195 HV, making it suitable for use in the outer cage of spherical hinges.

Discussion. Analysis of the deformation characteristics of sintered and rolled steels confirmed the suitability of the proposed methodology for assessing the deformation state of samples during cold stamping of the outer cage of spherical hinges.

Conclusion. The findings from this study allow us to predict the locations of macrodefects and optimize the manufacturing process for spherical hinges.

Keywords: 10Kh18N9 rolled steel, VP 304.200.30 powder steel, outer race of spherical joint, microcracks in chromium-nickel steel

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Konko NA, Gasanov BG. Influence of the Production Method and the Structure of Chromium-Nickel Corrosion Resistant Steels on the Kinetics of the Formation of the Outer Cage of Spherical Joints. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(3):230–241. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-230-241>

Введение. В силу экономической и технической значимости задачи повышения эксплуатационного ресурса шарнирных узлов (элементов многих машин и механизмов) необходимо постоянно изучать материалы и технологии их изготовления. Отметим, например, что сферические шарнирные узлы, эффективно воспринимающие ударные нагрузки, широко применяются в подвесках транспортных средств [1]. При этом их делают из хромоникелевых коррозионно-стойких сталей, которые обладают низкой износостойкостью [2]. Критерий выбора этого металла для изготовления деталей сферических шарниров — эксплуатационные свойства при длительном контакте с агрессивными средами (солевые растворы, влага, продукты износа). Для повышения триботехнических свойств деталей узлов трения из хромоникелевых сталей [3] используются методы порошковой металлургии [4]. Однако технология производства зависит от химического состава материала [5], условий эксплуатации машин, конструкции узлов трения и других факторов [6]. Холодная штамповка — это один из вариантов формования деталей наружной обоймы сферических шарниров [7] из спеченных цилиндрических заготовок, внутренняя поверхность которых покрыта твердым смазочным материалом [8] (рис. 1).

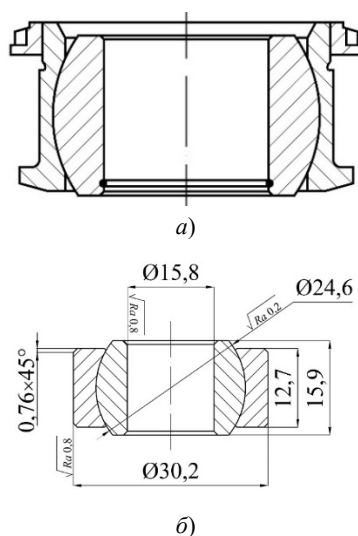


Рис. 1. Конструкция сферических шарнирных узлов: *а* — наружная обойма с фланцем; *б* — наружная обойма без фланца [1]

В открытом доступе нет информации о технологии изготовления наружной обоймы сферических шарниров из спеченных коррозионно-стойких сталей и об оценке их эксплуатационного ресурса. Это показал анализ современных отечественных научных публикаций и патентов. Таким образом, актуальны следующие задачи:

- обеспечение требуемых свойств и качества сферических шарниров [9];
- сокращение производственных затрат;
- повышение надежности инструментальной оснастки и средств технологического оснащения [10].

Коллектив авторов представленной статьи уже ведет научные изыскания в этом направлении. В [11] описаны эксперименты с порошковыми сталями 12X18H10T, 304L-AW-100 и ВП 304.200.30. Прессовки спекали 3 ч в вакууме при 1 200 °С. Однако этого недостаточно. Производственная и эксплуатационная практика существенно шире. А значит, нужны испытания разных коррозионно-стойких сталей в различных условиях. В данном случае рассматриваются:

- катаная коррозионно-стойкая хромоникелевая сталь 10X18H9;
- порошковая сталь ВП 304.200.30, которую спекали 2 ч при 1 150 °С.

Цель работы — выяснить, каким образом способ получения и структура 10X18H9 и ВП 304.200.30 влияет на кинетику формования наружной обоймы сферических шарниров. Развитие такого подхода в теоретическом и прикладном плане открывает возможность использовать данные о способе получения заготовок хромоникелевых сталей для прогнозирования их структурообразования, технологических, трибологических и механических свойств наружных обойм сферических шарниров.

Материалы и методы. Ранее проводились исследования с коррозионно-стойкими хромоникелевыми порошковыми сталями ВП 304.200.30, 304L-AW-100 и 12X18H10T [11]. В представленной работе основное внимание уделяется сравнительному анализу порошковой стали ВП 304.200.30 производства «Северсталь» (Россия) и его аналога — стали 10X18H9. Ожидается, что сравнение позволит установить корреляцию между технологией производства и физико-механическими, а также эксплуатационными свойствами образцов.

Кольцевые образцы изготавливались из катаной стали 10X18H9 (ГОСТ 5632–2014⁷) и порошковой коррозионно-стойкой хромоникелевой стали ВП 304.200.30 [11]. Геометрические размеры кольцевых образцов, мм:

- наружный диаметр втулки (D_n) — 25;
- внутренний диаметр втулки (d_v) — 19,5;
- высота втулки (H) — 15.

Образцы получили механической обработкой из круглого проката 10X18H9 и статическим холодным прессованием порошка ВП 304.200.30 на гидравлическом прессе НРМ-60L в цилиндрической пресс-форме [11]. Давление прессования варьировали в пределах 600–800 МПа. Порошковые формовки спекали в вакуумной электропечи ВСл-16-22-У при температуре 1150 °С в течение 2 ч. Пористость заготовок после спекания составляла 14–22 %. Перед холодной штамповкой на внутреннюю поверхность цилиндрической втулки наносили твердые смазочные материалы: дисульфид молибдена (MoS_2) (ТУ 48–19–133–90⁸), карандашный графит (ГОСТ 23463–79⁹) и политетрафторэтилен (PTFE, ГОСТ 10007–80¹⁰) [11].

Для оценки критических значений деформаций при холодной штамповке выточенные из прутка и спеченные кольцевые образцы испытывали на радиальное сжатие (рис. 2) по методике, описанной в ГОСТ 26529–85¹¹.

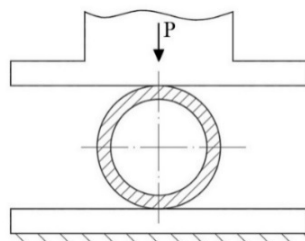


Рис. 2. Схема испытания кольцевого образца на радиальное сжатие

По методике, описанной в ГОСТ 1497–84¹², изготовили призматические образцы для экспериментов по растяжению на универсальной испытательной машине УММ-5 (ГОСТ 28840–90¹³).

Для определения твердости образцов использовали прибор Роквелла ТР 5006 (ГОСТ 9013–59¹⁴). Микротвердость измеряли по методу Виккерса (ГОСТ 9450–76¹⁵) на приборе HVS-1000.

Микроструктуру исследовали на металлографическом микроскопе *Altami MET-1M* и растровом электронном *Quanta 200*. Электронно-зондовые изыскания выполняли на растровом электронном микроскопе *Tescan VEGA II LMU*. Рентгенофазовый анализ проводили на рентгеновском дифрактометре *XRD-6100* с вертикальным гониометром θ –2 θ .

Зарождение и развитие трещин обусловлено превышением предельных значений деформации [12], поэтому ее величина при холодной штамповке порошковых заготовок критически важна и требует контроля на каждом этапе формообразования [13]. Для анализа деформированного состояния изделий применяли специализированное программное обеспечение [14], расчетные схемы, имитационное моделирование в программе *QForm*.

Результаты исследования. Деформированное состояние материала кольцевых образцов влияет на их твердость после радиальной деформации (ϵ_R). Для оценки относительной степени деформации измеряли твердость по методу Виккерса на разных участках кольцевых образцов (рис. 3 а).

⁷ ГОСТ 5632–2014. *Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200113778?ysclid=mdohk7rxu9621196527> (дата обращения: 21.06.2025).

⁸ ТУ 48–19–133–90. *Дисульфид молибдена. Технические условия*. URL: <https://gostrf.com/normadata/1/4293788/4293788422.pdf> (дата обращения: 21.06.2025).

⁹ ГОСТ 23463–79. *Графит порошковый особой чистоты*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200014916> (дата обращения: 21.06.2025).

¹⁰ ГОСТ 10007–80. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200020654> (дата обращения: 21.06.2025).

¹¹ ГОСТ 26529–85. *Материалы порошковые. Метод испытания на радиальное сжатие*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200011117?ysclid=mdoi2gfjlh811854453> (дата обращения: 21.06.2025).

¹² ГОСТ 1497–84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004888> (дата обращения: 21.06.2025).

¹³ ГОСТ 28840–90. *Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023577> (дата обращения: 21.06.2025).

¹⁴ ГОСТ 9013–59. *Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200004663?ysclid=mdpkjnihrw605168957> (дата обращения: 21.06.2025).

¹⁵ ГОСТ 9450–76. *Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012869?ysclid=mdpkn680t1373636400> (дата обращения: 21.06.2025).

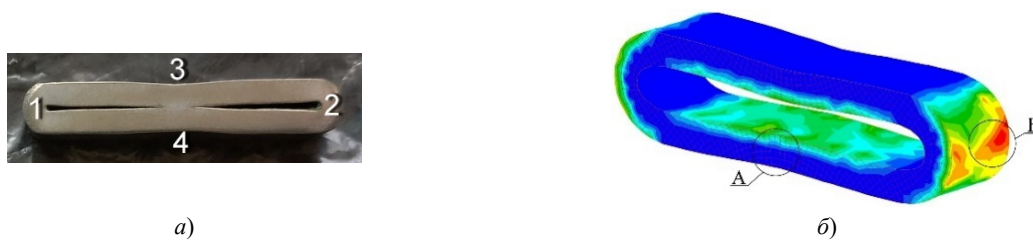


Рис. 3. Радиальная осадка кольцевых образцов: *a* — катаная сталь 10X18H9; *б* — имитационное моделирование радиальной осадки из распыленного порошка ВП 304.200.30

Твердость в разных зонах кольцевых образцов существенно отличается. Например, в зонах растяжения 1 и 2 для кольцевых образцов из стали 10X18H9 твердость варьируется от 190 HV до 205 HV. Показатель для спеченной стали ВП 304.200.30 — 130–140 HV. В зонах сжатия 3 и 4 твердость немного выше: 210–230 HV для 10X18H9 и 185–195 HV для ВП 304.200.30.

Это можно объяснить тем, что напряженно-деформированное состояние материала зависит от конфигурации заготовок до и после радиальной осадки. В зоне А (3 и 4) материал в результате пластической деформации (наклепа) упрочняется лучше, чем в зонах растяжения Б (1 и 2) (рис. 3 б).

Из [11] известно, что при осадке спеченных кольцевых образцов с аустенитной структурой и пористостью 18–20 % (рис. 4 а) трещины появляются на межчастичных границах с повышенной концентрацией Cr_2O_3 , CrO_2 (рис. 4 б). Анализ результатов картирования устья трещины показал, что микротрещины развиваются:

- по межчастичным границам с более высокой концентрацией О;
- на неоднородных по химическому составу участках (рис. 4 в).

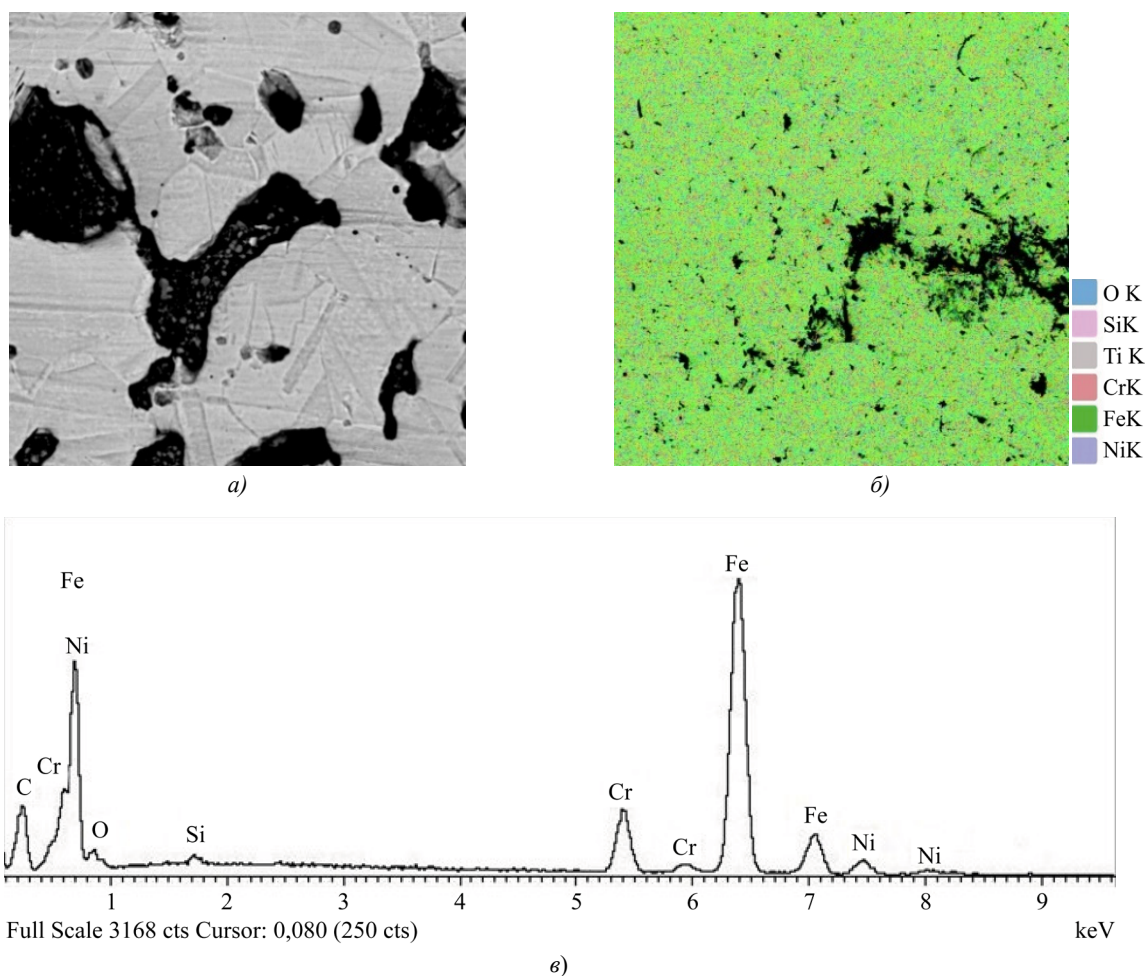


Рис. 4. Картирование спеченного кольцевого образца из порошка ВП 304.200.30 (Si — 0,7, Cr — 12,2, Fe — 75,5, Ni — 7,90, O — 3,7): *a* — микроструктура перед испытанием; *б, в* — распределение химических элементов в устье трещины после радиальной деформации

На пластические свойства спеченных сталей особенно сильно влияет распределение оксидов и карбидов хрома в зонах интенсивной пластической деформации. Это подтверждает картирование участков микрошлифов в устье трещины (рис. 5).

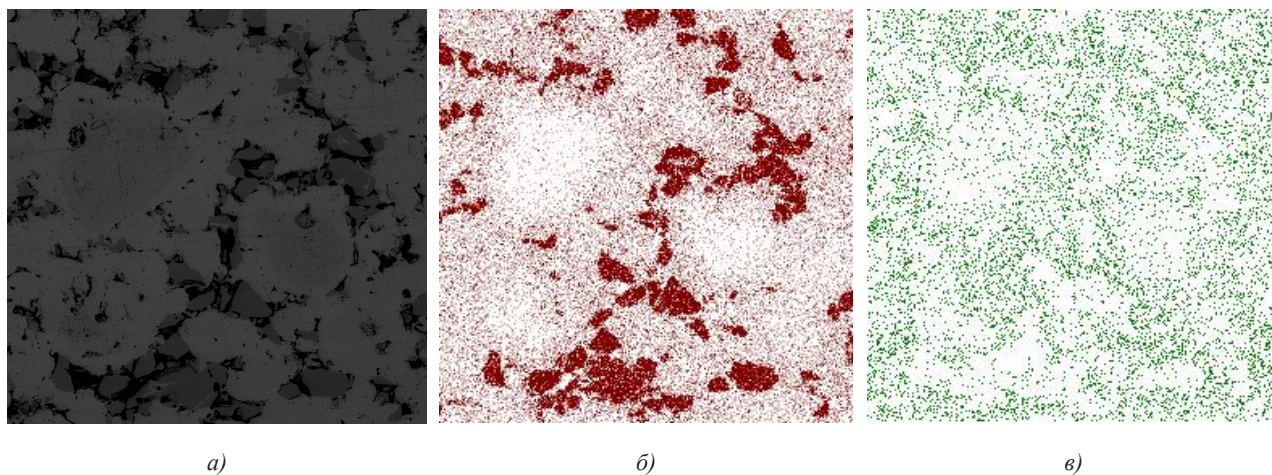


Рис. 5. Картирование спеченной хромоникелевой стали ВП 304.200.30:
а — микроструктура; б — распределение Cr; в — распределение Ni

В образцах из катаной стали 10Х18Н9 структура стали более гомогенная по хрому и никелю (рис. 6 а). Содержание инородных включений значительно меньше, чем в спеченной стали из распыленных порошков аналогического состава (рис. 6 б, в).

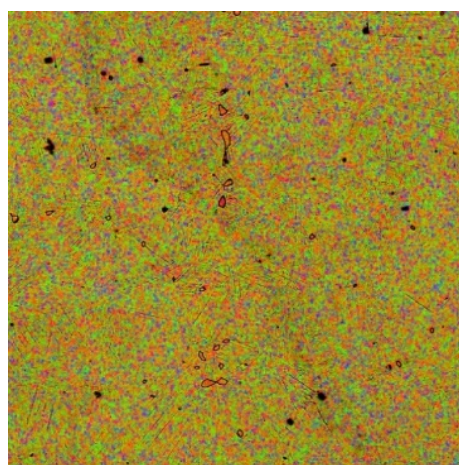
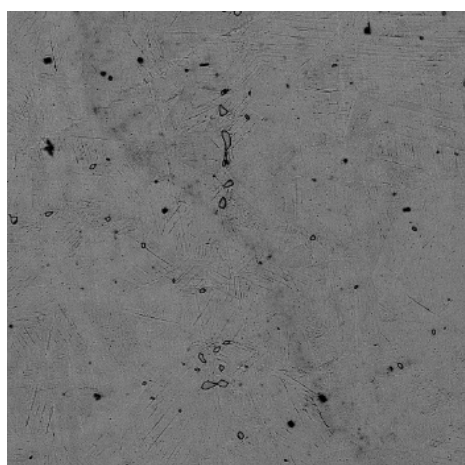
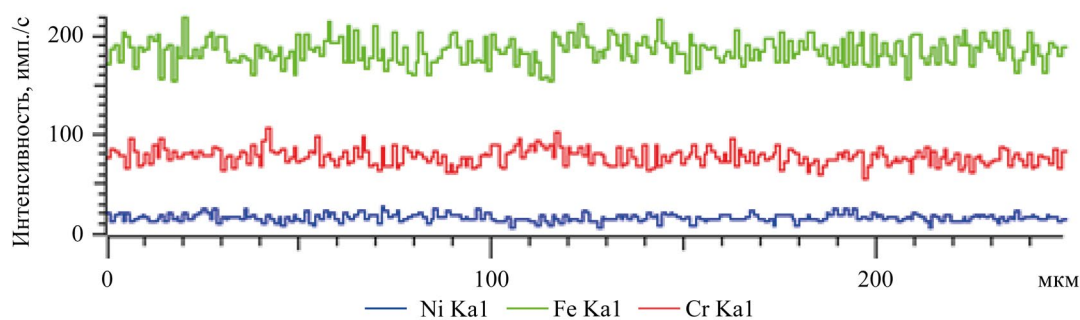


Рис. 6. Картирование стали 10Х18Н9:
а — распределение Cr и Ni; б, в — микроструктура

При осадке кольцевых образцов сдвиговую деформацию материала обеспечивают разные механизмы. Их вклад определяется схемой и степенью, размером, формой зерна и пористостью заготовок до деформации, химическим и фазовым составом материала (рис. 7 а), свойствами и размером избыточных фаз и другими условиями.

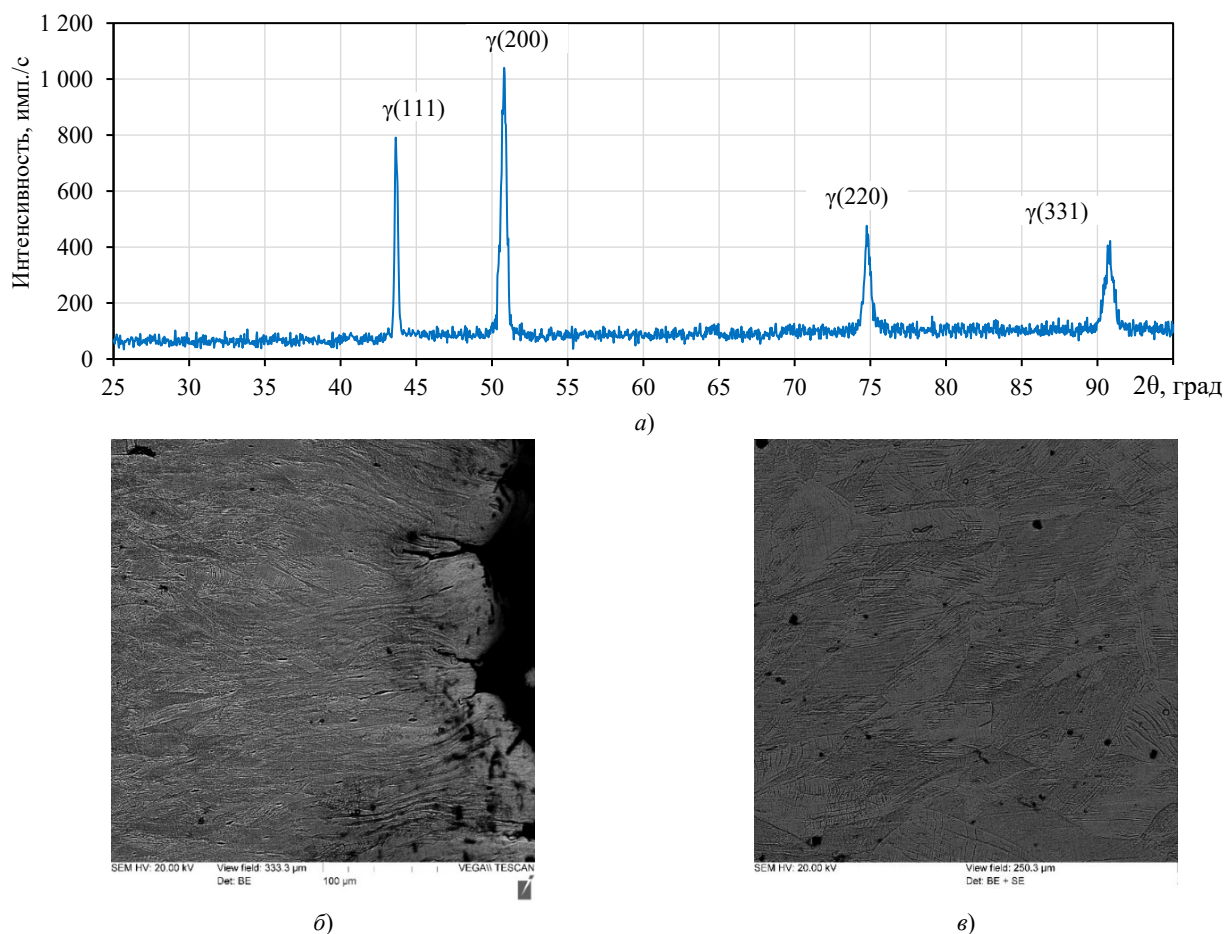


Рис. 7. Фазовый анализ и микроструктура катаной стали 10X18N9: а — дифрактограмма после радиального обжатия; б — микроструктура колец в зоне сжатия; в — микроструктура в зоне растяжения после осадки $\varepsilon_R = 63\%$

Поэтому наличие на отдельных участках строчечной структуры, характерной для катаных хромоникелевых сталей аустенитного класса (рис. 7 а), не только снижает их пластические свойства, но и влияет на кинетику формирования микроструктуры после холодной штамповки. Неоднородная деформация на разных участках образца — причина двойникования, полос сброса и переходных полос (рис. 7 б, в).

На механические свойства спеченных заготовок из порошков хромоникелевых сталей ВП 304.200.30 влияют:

- исходная микроструктура и наличие инородных включений;
- микроструктура и химический состав частиц, сформированных в процессе распыления расплава и охлаждения частиц порошка.

По-видимому, при быстром охлаждении в каплях жидкого расплава образуются устойчивые зародыши α -фазы с повышенной концентрацией железа (рис. 8 а). В частности, в таких частицах, имеющих сферическую форму (таблица 1, рис. 8, спектр 3), содержится около 91 % (ат.) железа, а в зародышах других частиц (табл. 1, рис. 8, спектр 2) — около 80 %. На других участках этих же частиц содержание Cr достигает 74 % (ат., таблица 1, рис. 8, спектр 1). Это в несколько раз больше, чем его средняя концентрация в порошках стали. Под словом «спектр» в данном случае понимается место и порядок укола на исследованном микрошлифе.

Таблица 1

Распределение химических элементов в спеченной стали из порошка ВП 304.200.30 на различных участках частиц в образцах перед холодной штамповкой

Спектр	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Всего
1	0,07	74,63	0,70	24,29	0,31	100
2	2,24	10,25	0,31	80,22	6,99	100
3	1,03	6,12	0,09	91,28	1,49	100

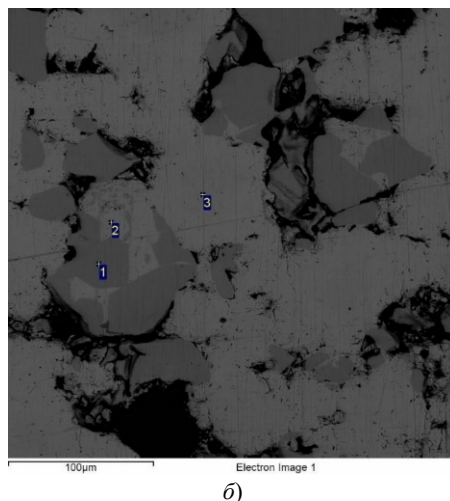
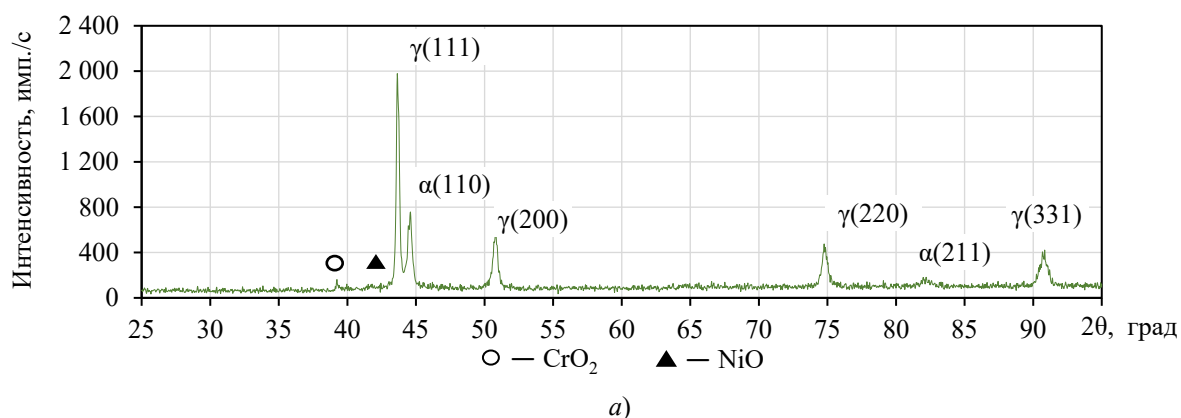


Рис. 8. Фазовый состав и микроструктура образцов перед холодной штамповкой в спеченной стали из порошка ВП 304.200.30: *а* — дифрактограмма; *б* — распределение хрома, никеля и других элементов

В процессе спекания образцов из распыленных порошков ВП 304.200.30 при температуре 1150–1180 °С в течение 2 ч происходит диффузионная гомогенизация. Хром, никель и железо взаимно растворяются и распределяются по объему более равномерно (рис. 9), что в целом влияет на пластичность спеченных в вакууме заготовок.

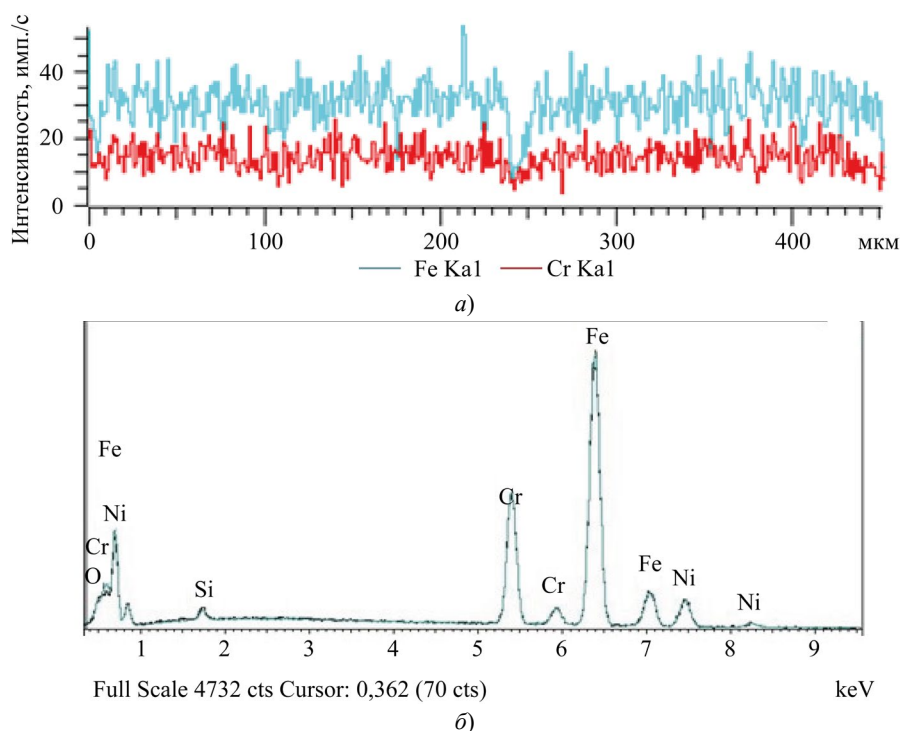


Рис. 9. Распределение химических элементов в спеченной стали из порошка ВП 304.200.30: *а* — линейное распределение Cr и Fe; *б* — спектральный анализ Cr, Ni и др. элементов

Чем крупнее пора в межчастичных границах, тем больше разница в деформации частиц, особенно при небольших средних деформациях материала. Поэтому на разных участках одной и той же зоны заметно отличается микроструктура спеченной стали после осадки и, соответственно, микротвердость (рис. 10).

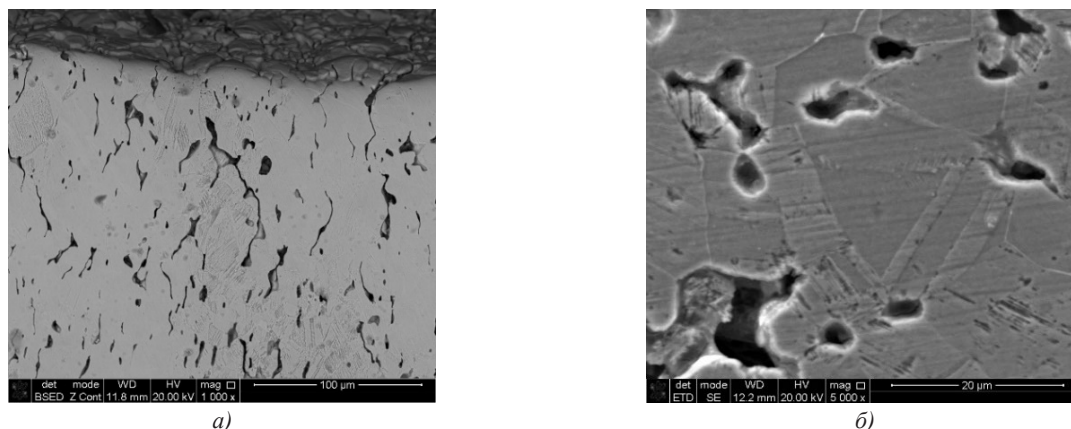


Рис. 10. Микроструктура спеченной стали ВП 304.200.30:
а — зона сжатия (А); б — зона растяжения (Б) после осадки $\epsilon_R \approx 0,5$

Предел прочности спеченных в вакууме сталей из порошка ВП 304.200.30 соизмерим с прочностью и пределом текучести некоторых хромоникелевых сталей аустенитного класса, но уступает им по показателям пластичности (таблица 2).

Таблица 2

Физико-механические свойства хромоникелевых коррозионно-стойких сталей

Материал	Свойства					
	σ_s , МПа	δ , %	Ψ , %	П, %	ρ , г/куб., см	Твердость
10X18H9	195	45	55	—	7,9	29 HRC
ВП 304.200.30	180,63	7,67	8,08	19,05	6,65	45 HRB

Таким образом, анализ механизма разрушения при осадке колец из нержавеющей хромоникелевых сталей показывает, что прочность и пластичность спеченной стали в зоне растяжения зависят не только от напряженно-деформированного состояния материала. В данном случае имеют значение еще два фактора:

- качество контакта между частицами;
- наличие на поверхности распыленных порошков инородных включений.

Моделирование процесса холодной штамповки наружной обоймы с фланцем сферического шарнира в программе *QForm* (рис. 11) дает представление о кинетике формообразования [15]. Использовались спеченные цилиндрические заготовки из порошка ВП 304.200.30. Минимальный ресурс пластичности имеет зона, выделенная темно-зеленым цветом. Именно здесь могут зарождаться макро- и микротрещины.

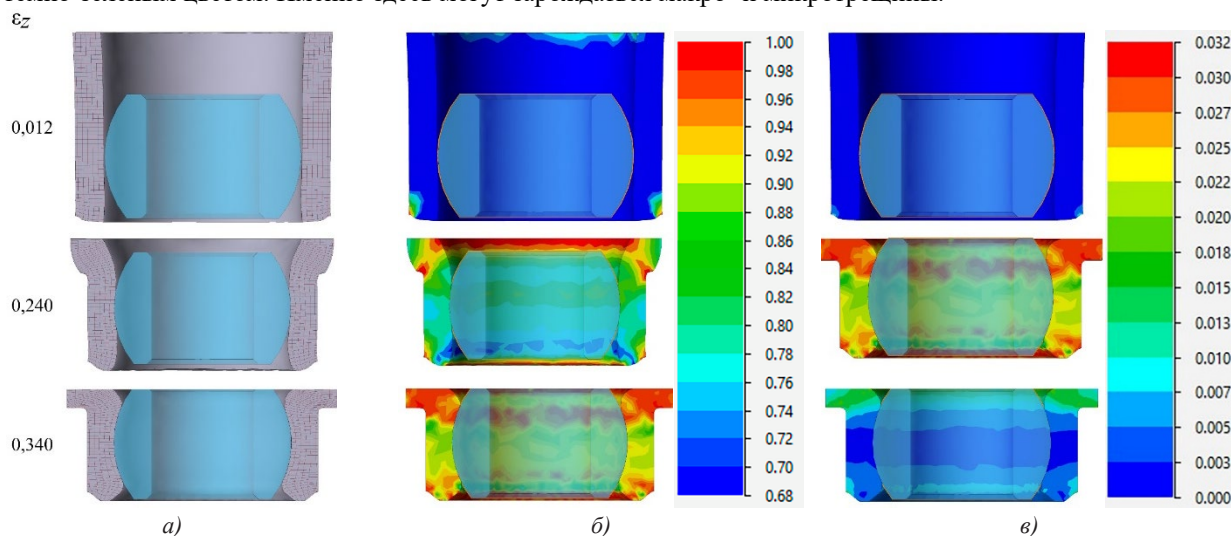


Рис. 11. Имитационное моделирование кинетики формования наружной обоймы с фланцем пористой заготовки в программе *QForm*: а — изменение координатной сетки; б — распределение по объему относительной плотности; в — ресурс пластичности

На рис. 11 ε_z — безразмерная величина. Это относительная степень деформации, то есть отношение абсолютной деформации (изменения размера) к первоначальной длине тела. При моделировании на торец образца наносили координатную сетку. В процессе деформации материала она искажалась. Соответственно, на рис. 11 можно видеть, в каком направлении движется материал при деформации.

Сравнение катаной стали 10X18H9 и порошковой ВП 304.200.30 выявило фундаментальные различия в механизмах деформации. Для порошковой стали критическим ограничением является не оксидная фаза, а локализация оксидов на границах частиц, что провоцирует хрупкое разрушение при растяжении. Химическая неоднородность частиц и остаточная пористость усугубляют проблему: в сравнении с катаной сталью относительное удлинение снижается в 6 раз (показатель δ в таблице 2). При этом в условиях сжатия спеченный материал упрочняется до 195 HV, и это говорит о возможности его использования в производстве наружных обойм сферических шарниров.

Обсуждение. Итак, при деформации спеченных заготовок интенсивность полей напряжений в зонах контактов частиц порошков и на поверхности пор существенно отличается от средних показателей. Согласно [11], критическое значения интенсивности деформации при радиальной осадке кольцевых образцов из порошка ВП 304.200.30 — 0,195. Это обуславливает неоднородность деформаций, а также исключает определение деформированного состояния по условию пластичности (если известно напряженное состояние). Схемы главных деформаций предопределяют неравномерный и анизотропный характер изменения механических свойств спеченных заготовок при холодной штамповке, поэтому на ресурс пластичности влияет не только пористость, но и деформированное состояние материала. Это установлено экспериментально.

Анализ описанных в статье особенностей деформационного поведения спеченных и катаных сталей подтверждает адекватность предложенной методики оценки деформированного состояния цилиндрических заготовок при холодной штамповке наружной обоймы сферических шарниров. Практическое использование результатов данного исследования позволит повысить эффективность технологии производства хромоникелевых сталей. Итоги научных изысканий, описанных в статье, позволяют предположить, что такой материал будет оптимальным для сферических шарниров.

Заключение. Выявленный механизм разрушения спеченных хромоникелевых сталей при холодной штамповке позволяет оценить критические значения интенсивности деформации и влияние структуры стали на ее пластичность в зоне растяжения.

Установлено, что ресурс пластичности спеченных хромоникелевых нержавеющей сталей зависит не только от напряженно-деформированного состояния материала, но и от исходной структуры, наличия примесей, а также качества межчастичных контактов и границ зерен.

Авторы фокусировались на качественных особенностях обойм сферических шарниров, применяемых в подвесках транспортных средств. Эксперименты и моделирование показали технологические особенности их производства при холодной штамповке спеченных заготовок.

Список литературы / References

1. Михайлов А.Н., Матвиенко С.А., Стрельник Ю.Н., Лукичев А.В. Функционально-ориентированный анализ условий эксплуатации и технологий изготовления сферических шарнирных соединений транспортных машин. В: *Материалы международной научно-технической конференции «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития» Петропавловск-Камчатский, 17–19 октября 2018 года*. Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет; 2019. С. 112–115.

Mikhailov AN, Matvienko SA, Strelnik YuN, Lukichev AV. Functionally-Oriented Analysis of the Operating Conditions and Production Technologies of Transport Vehicles Spherical Swivel Connections. In: *Proceedings of the International Scientific and technical conference “Technical operation of Water Transport: Problems and Ways of Development” Petropavlovsk-Kamchatsky, 17–19 October, 2018*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatka State Technical University; 2019. P. 112–115. (In Russ.)

2. Хайдоров А.Д., Юнусов Ф.А. Вакуумная термическая обработка высоколегированных коррозионно-стойких сталей. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2017;23(1):226–235. <http://doi.org/10.18721/JEST.230123>

Haidorov AD, Yunusov FA. Vacuum Heat Treatment of high Alloy Corrosion-Resistant Steels. *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology*. 2017;23(1):226–235. (In Russ.) <http://doi.org/10.18721/JEST.230123>

3. Woodhead J, Truman CE, Booker JD. Modelling of Dynamic Friction in the Cold Forming of Plain Spherical Bearings. *Surface and Contact Mechanics Including Tribology XII*. 2015;91:141–152. <http://doi.org/10.2495/SECM150131>

4. Ильющенко А.Ф. Современные разработки в области порошковой металлургии для машиностроения. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2012;(3(20)–4(21)):113–120. URL: https://mmmm.by/pdf/ru/2012/3_4_2012/11.pdf (дата обращения: 02.06.2025).

Ilyuschenko AF. Current Developments in Powder Metallurgy for Mechanical Engineering. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2012;(3(20)–4(21)):113–120. (In Russ.) URL: https://mmmm.by/pdf/ru/2012/3_4_2012/11.pdf (accessed: 02.06.2025).

5. Hojati M, Danninger H, Gierl-Mayer Ch. Mechanical and Physical Properties of Differently Alloyed Sintered Steels as a Function of the Sintering Temperature. *Metals*. 2022;12(1):13–20. <https://doi.org/10.3390/met12010013>

6. Bram M, de Freitas Daudt N, Balzer H. Porous Metals from Powder Metallurgy Techniques. *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys*. 2022;3:427–437. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00093-4>

7. Lingzhu Gong, Xiaoxiang Yang, Kaibin Kong, Shuncong Zhong. Optimal Design for Outer Rings of Self-Lubricating Spherical Plain Bearings Based on Virtual Orthogonal Experiments. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018;10(6):1–11. <https://doi.org/10.1177/1687814018783402>

8. Гасанов Б.Г., Конько Н.А., Баев С.С. Исследование кинетики формообразования деталей сферического подшипника скольжения из коррозионно-стойких сталей, полученных объемной штамповкой пористых заготовок. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2024;26(2):127–142. <http://doi.org/10.17212/1994-6309-2024-26.2-127-142>

Gasanov BG, Konko NA, Baev SS. Study of the Kinetics of Forming of Spherical Sliding Bearing Parts Made of Corrosion-Resistant Steels by Die Forging of Porous Blanks. *Metal Working and Material Science*. 2024;26(2):127–142. (In Russ.) <http://doi.org/10.17212/1994-6309-2024-26.2-127-142>

9. Rozenberg OA, Mikhailov OV, Shtern MB. Strain Hardening of Porous Bushings by Multiple Mandreling: Numerical Simulation. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2012;51:379–384. <http://doi.org/10.1007/s11106-012-9445-y>

10. Kondo H, Hegedus M. Current Trends and Challenges in the Global Aviation Industry. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2020;26(4):141–143. <https://doi.org/10.36547/ams.26.4.763>

11. Гасанов Б.Г., Конько Н.А., Баев С.С. Влияние способа получения порошков хромоникелевых нержавеющей сталей на деформированное состояние и свойства внешней обоймы сферического шарнирного узла. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2024;5:138–158. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2024.5.138-158>

Gasanov BG, Konko NA, Baev SS. The Effect of the Method for Producing Chromium-Nickel Stainless Steel Powders on the Strain State and Properties of the Outer Cage of a Spherical Hinge Joint. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2024;5:138–158. (In Russ.) <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2024.5.138-158>

12. Ковальченко М.С. Деформационное упрочнение порошкового тела при прессовании. *Порошковая металлургия*. 2009;(3/4):13–27.

Kovalchenko MS. Deformation Hardening of a Powder Body during Pressing. *Powder Metallurgy*. 2009;(3/4):13–27. (In Russ.)

13. Егоров М.С., Егорова Р.В., Пустовойт В.Н., Атрохов А.А. Механические свойства порошковых материалов после свободной осадки. *Металлург*. 2020;3:92–96.

Egorov MS, Egorova RV, Pustovoit VN, Atrokhov AA. Mechanical Properties of Powder Materials after Hot Forging. *Metallurg*. 2020;3:92–96. (In Russ.)

14. Бурлаков И.А., Забелян Д.М., Бондаренко А.К., Гладков Ю.А., Леонидов А.Н. Рациональное использование ресурса пластичности при холодной штамповке листовых заготовок на основе критериев Кокрофта и Колмогорова. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. 2016;(12):3–8.

Burlakov IA, Zabelyan DM, Bondarenko AK, Gladkov YuA, Leonidov AN. Efficient Utilization of the Plasticity Resource at Cold Forming of Sheet Workpieces Based on the Cockcroft and Kolmogorov Criteria. *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*. 2016;(12):3–8. (In Russ.)

15. Баглюк Г.А., Курихин В.С., Хоменко А.И., Козаченко И.С. Совершенствование методов исследования распределения деформации при прессовании порошков. *Порошковая металлургия*. 2015;54:129–135. <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9689-4>

Baglyuk GA, Kurikhin VS, Khomenko AI, Kozachenko IS. Improving Methods for Studying the Strain Distribution in Powders During Compaction. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2015;54:129–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9689-4>

Об авторах:

Николай Андреевич Конько, ассистент кафедры «Общеинженерные дисциплины», Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (346428, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), konko2013@mail.ru

Бадрудин Гасанович Гасанов, доктор технических наук, профессор кафедры «Международные логистические системы и комплексы» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (346428, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), gasanov.bg@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Н.А. Конько: формальный анализ, проведение исследования, разработка методологии, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

Б.Г. Гасанов: создание концепции, курирование работы с данными, научное руководство.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Nikolai A. Konko, Assistant Professor of the Department of General Engineering Disciplines, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI) (132, Prosveshcheniya Str., Novocherkassk, 346428, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), konko2013@mail.ru

Badrudin G. Gasanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of International Logistics Systems and Complexes, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI) (132, Prosveshcheniya Str., Novocherkassk, 346428, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), gasanov.bg@gmail.com

Claimed Contributorship:

NA Konko: formal analysis, research, methodology, validation, visualization, writing – original draft preparation.

BG Gasanov: conceptualization, data curation, supervision.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 30.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 14.07.2025

Принята к публикации / Accepted 25.07.2025

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 669.1:66.04

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-242-249>

Влияние магнитного поля на особенности поведения трещин в стали после термической обработки на высокопрочное состояние

В.Н. Пустовойт , Ю.В. Долгачев

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ydolgachev@donstu.ru

EDN: OIJHCO

Аннотация

Введение. Усталостное разрушение происходит при напряжениях ниже предела прочности, характеризуясь внезапностью и катастрофическими последствиями. Статистические данные свидетельствуют о том, что разрушение при циклическом нагружении является одним из наиболее распространённых видов повреждений материалов, а их работоспособность во многом определяется сопротивлением росту трещин. Кроме уже известных методов достижения высокопрочного состояния, предлагается использовать термическую обработку в магнитном поле (ТОМП). Тем не менее, механизмы изменения поведения трещин после такой обработки и факторы, влияющие на трещиностойкость, всё ещё недостаточно изучены. В связи с этим поставлена цель оценить влияние структуры после ТОМП на кинетические особенности роста усталостных трещин и эффективность образуемых в процессе ТОМП структурных барьеров, препятствующих разрушению стали.

Материалы и методы. Кинетику развития усталостной трещины исследовали при циклических испытаниях призматических образцов на оригинальной установке со специальным стабилизатором амплитуды колебаний. Возникновение и последующее развитие трещины регистрировали методом электропотенциалов. Исследования проводили на сталях, термически обработанных на высокопрочное состояние: сталь 18Х2Н4ВА после закалки на воздухе со структурой мартенсита и сталь 30ХГСА после изотермической закалки при 380 °С на структуру нижнего бейнита. Магнитное поле напряженностью 1,6 МА/м получали в магнитном зазоре электромагнита ФЛ–1.

Результаты исследования. Установлено, что термическая обработка сталей 30ХГСА и 18Х2Н4ВА в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м приводит к заметному снижению скорости распространения усталостных трещин. Отмечено повышение пороговых значений напряжений для расслоения магистральной трещины по отрывному механизму, что свидетельствует о повышении долговечности. При анализе траекторий трещин был выявлен рост показателей их ветвления — увеличение стандартного отклонения углов наклона трещин, а также уменьшение интервала корреляции наклона изгибов трещины относительно среднего положения на 0,5 мкм. Эти изменения обусловлены влиянием магнитного поля на микроструктуру мартенсита, формированием большего числа эффективных барьеров на пути движения трещин, что в итоге сказывается на устойчивости к усталостному разрушению сталей и их механических свойствах.

Обсуждение. Анализ полученных результатов на основе современных теорий прочности и разрушения показал, что механизм вязкого разрушения, который характерен для исследуемых сталей, работает путём зарождения, роста и коалесценции пор. Под действием нормальных напряжений на поверхности микропор оседают вакансии и в результате этого пора постепенно трансформируется в трещину. Наблюдения за трещинами в фольгах показали, что изменение траектории трещины не зависит от вида термической обработки и является случайным процессом.

Заключение. Статистическая обработка опытных данных, полученных в этой работе, позволяет сделать вывод, что после ТОМП формируется структура, обеспечивающая увеличение микроизвилистости трещины с повышенной крутизной изгибов траектории из-за часто встречающихся структурных барьеров. Выявленные особенности поведения трещин положительно характеризуют ТОМП как практический способ создания высокопрочного состояния сталей, применимый для широкого ассортимента марок и не требующий кардинальных изменений в технологии их термической обработки. Повышение трещиностойкости сталей способствует улучшению безопасности различных устройств и техногенных систем, а также снижению их себестоимости и затрат на обслуживание.

Ключевые слова: сталь, высокопрочное состояние, магнитное поле, усталостное разрушение, трещины

Благодарности. Авторы благодарят редакцию журнала за ценные замечания и сотрудников кафедры «Материаловедение и технологии металлов» за помощь в получении и обсуждении результатов.

Для цитирования. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Влияние магнитного поля на особенности поведения трещин в стали после термической обработки на высокопрочное состояние. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(3):242–249. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-242-249>

Original Empirical Research

Influence of the Magnetic Field on the Behavior of Cracks in Steel after Heat Treatment to a High-Strength State

Viktor N. Pustovoyt , Yuri V. Dolgachev  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 ydolgachev@donstu.ru

Abstract

Introduction. Fatigue failure develops at stresses below the ultimate strength and is characterized by its suddenness and catastrophic consequences. Statistical data indicate that failure under cyclic loading is one of the common types of damage to materials and their performance is largely determined by their resistance to crack growth. In addition to well-known methods for achieving high-strength states, it has been proposed to use heat treatment in the magnetic field (HTMF). However, the mechanisms of crack behavior changes after such treatment and factors affecting crack resistance remain poorly understood. In this regard, this study aims to assess the effect of the structure after HTMF on the kinetic features of fatigue crack growth and the effectiveness of structural barriers formed during HTMF, preventing the destruction of steel.

Materials and Methods. The kinetics of fatigue crack development was studied during cyclic testing of prismatic samples using an original setup with a special stabilizer of oscillation amplitude. The occurrence and subsequent development of a crack was recorded by the method of electric potentials. The studies were conducted on steels that had been heat-treated to achieve a high-strength state: 18Kh2N4VA steel after quenching in air with a martensite structure and 30KhGSA steel after isothermal quenching at 380°C to a lower bainite structure. A magnetic field of 1.6 MA/m was obtained in the magnetic gap of the FL-1 electromagnet.

Results. It was found that heat treatment of 30KhGSA and 18Kh2N4VA steels in a magnetic field of 1.6 MA/m led to a noticeable decrease in the rate of fatigue crack propagation. An increase in the threshold stress values for the delamination of the main crack by the tear-off mechanism was noted, which indicated an increase in durability. When analyzing the crack trajectories, an increase in their branching indicators was revealed: an increase in the standard deviation of crack inclination angles, as well as a decrease in the correlation interval of the crack bend inclination relative to the average position by 0.5 μm. These changes were due to the effect of the magnetic field on the microstructure of martensite, the formation of a greater number of effective barriers on the path of crack movement, which ultimately affected the resistance to fatigue failure of steels and their mechanical properties.

Discussion. Analysis of the obtained results, based on modern theories of strength and fracture, revealed that the mechanism of viscous destruction, which was typical for the steels under study, worked by the origin, growth and coalescence of pores. Under the influence of normal stresses, vacancies settled on the surface of micropores and as a result, the pore gradually transformed into a crack. Observations of cracks in foils showed that the change in the crack trajectory did not depend on the type of heat treatment and was a random process.

Conclusion. The statistical data obtained in this study allow us to conclude that after HTMF, a structure is formed that leads to an increase in the micro-tortuosity of cracks, with a steeper trajectory of bends due to frequent structural barriers. These features of crack behavior suggest that HTMF is a practical method for achieving a high-strength state in steels, which can be applied to a wide range of steel grades without requiring significant changes to their heat treatment processes. By increasing the crack resistance of steels, we can improve the safety of various devices and man-made systems, as well as reduce their costs and maintenance requirements.

Keywords: steel, high-strength condition, magnetic field, fatigue failure, cracks

Acknowledgments. The authors would like to thank the editorial board of the journal for their insightful comments and to the staff of the Department of Materials Science and Technology of Metals for their assistance in obtaining and reviewing the results.

For citation. Pustovoyt VN, Dolgachev YuV. Influence of the Magnetic Field on the Behavior of Cracks in Steel after Heat Treatment to a High-Strength State. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(3):242–249. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-242-249>

Введение. Разрушение при циклическом нагружении является одним из распространённых видов повреждений материалов, а работоспособность этих материалов во многом определяется их сопротивлением росту трещин. Проблема заключается в том, что циклические нагрузки могут привести к усталостному разрушению при напряжениях, которые ниже предела прочности. Хотя рост усталостной трещины происходит постепенно, само разрушение может произойти внезапно, что приводит к катастрофическим последствиям. Существует обширная статистика [1] случаев железнодорожных и авиакатастроф, обрушений мостов и техногенных аварий, обусловленных развитием подобных дефектов. По данным ASM International [2], в машиностроении до 90 % отказов механизмов связано с усталостью, а в нефтегазовой отрасли усталостные трещины в трубопроводах и буровых установках ежегодно приводят к миллиардным убыткам. В связи с этим внедряются методы неразрушающего контроля дефектов, затраты на которые в аэрокосмической отрасли могут составлять до 30 % от стоимости обслуживания. Для безопасной и длительной эксплуатации деталей машин и приборов актуально получение их высокопрочного состояния с повышенной трещиностойкостью.

Известные способы достижения высокопрочного состояния [1, 2] заключаются в сочетании определенного состава легированной стали с режимами термической обработки, минимизации неметаллических включений, создании гетерогенной микроструктуры и использовании методов поверхностного упрочнения. Ранее авторами была предложена технология термической обработки в магнитном поле (ТОМП) [3], позволяющая при определённых режимах достигать высокопрочного состояния в сталях. Особенностью предлагаемой технологии является увеличение прочностных показателей без снижения вязкости. При этом широко используемые марки легированных сталей подвергаются практически традиционным режимам термической обработки, но с наложением энергии постоянного магнитного поля.

Существующие способы повышения трещиностойкости [1, 2] оперируют следующими механизмами: увеличением зоны пластической деформации у вершины трещины; ветвлением траектории трещины (увеличением её пути); созданием сжимающих напряжений для замедления роста трещины; локальным упрочнением на пути движения трещины; уменьшением количества и размеров концентраторов напряжений; созданием микроструктурных барьеров. Однако сведений о поведении трещин в сталях, обработанных по режимам с наложением постоянного магнитного поля, в настоящее время недостаточно. В связи с этим в настоящей работе поставлена цель оценить изменения в трещиностойкости и кинетике развития трещин после ТОМП.

Материалы и методы. Особенности развития трещин во времени изучались с помощью установки, которая создает циклические колебания стабилизированной амплитуды, устройство которой описано в работе [4]. Метод электропотенциалов [5, 6] позволял фиксировать момент зарождения и этапы развития усталостных трещин. Полученные таким образом данные впоследствии переводились в реальные значения с помощью диаграммы калибровки при известных данных о длине трещины и размерах образца призматической формы.

Результаты исследования представлены в виде зависимостей с осями $dl/dN - \lg \Delta K$ [2, 7], характеризующими развитие усталостного разрушения. Величина отношения dl/dN определяет экспоненциальную скорость распространения трещины за определённое число циклов нагрузки. Параметр ΔK демонстрирует диапазон изменения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при циклических нагрузках и вычисляется как разность между наибольшим и наименьшим значениями КИН:

$$\Delta K = K_{lc\max}^I - K_{lc\min}^I. \quad (1)$$

Значения K_{lc}^I вычислялись через максимальные напряжения (σ), возникающие при циклическом изгибе призматического образца с трещиной длиной l , по формуле:

$$K_{lc}^I = \sigma \sqrt{\pi \cdot l}. \quad (2)$$

Исследования проводили на призматических образцах из сталей 18Х2Н4ВА, 30ХГСА которые были термообработаны (18Х2Н4ВА — воздушная закалка на мартенсит; 30ХГСА — изотермическая закалка при 380 °С на нижний бейнит) на высокопрочное состояние. Магнитное поле напряженностью 1,6 МА/м получали магнитном зазоре электромагнита ФЛ – 1.

При изучении тонкой структуры применялся просвечивающий электронный микроскоп ЭММА – 4 и растворный электронный микроскоп (РЭМ) ZEISS CrossBeam 340.

Результаты исследования. Рис. 1 иллюстрирует зависимость длины усталостной трещины от числа циклов испытания после различной обработки для исследуемых сталей.

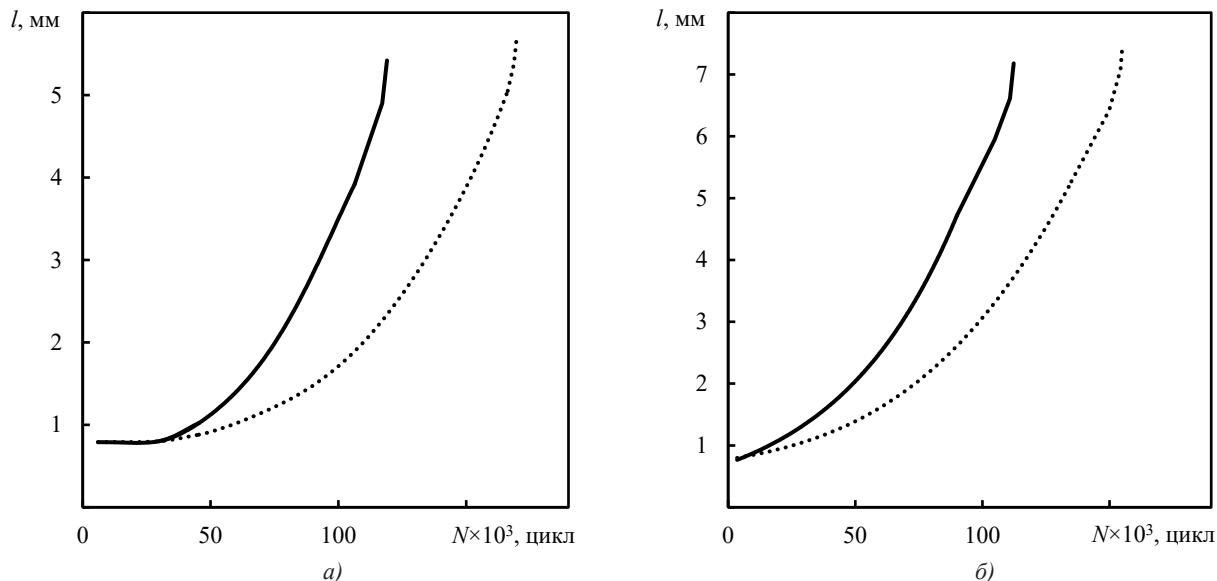


Рис. 1. Зависимость роста усталостной трещины от числа циклов знакопеременного изгиба сталей: *a* — 30ХГСА; *б* — 18Х2Н4ВА; сплошная линия — обработка без поля; точечная линия — в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м

Диаграммы развития усталостных трещин во времени показаны на рис. 2, их внешний вид иллюстрирует три стадии развития трещины. На каждой из этих стадий трещина имеет определённую скорость распространения: 1-я — стадия медленного роста; 2-я — стабильного роста и 3-я — ускоренного или нестабильного роста [1]. Для каждой из стадий характерны свои особенности рельефа поверхности разрушения [2], которые хорошо обнаруживаются на изломе образцов после испытания на циклический изгиб.

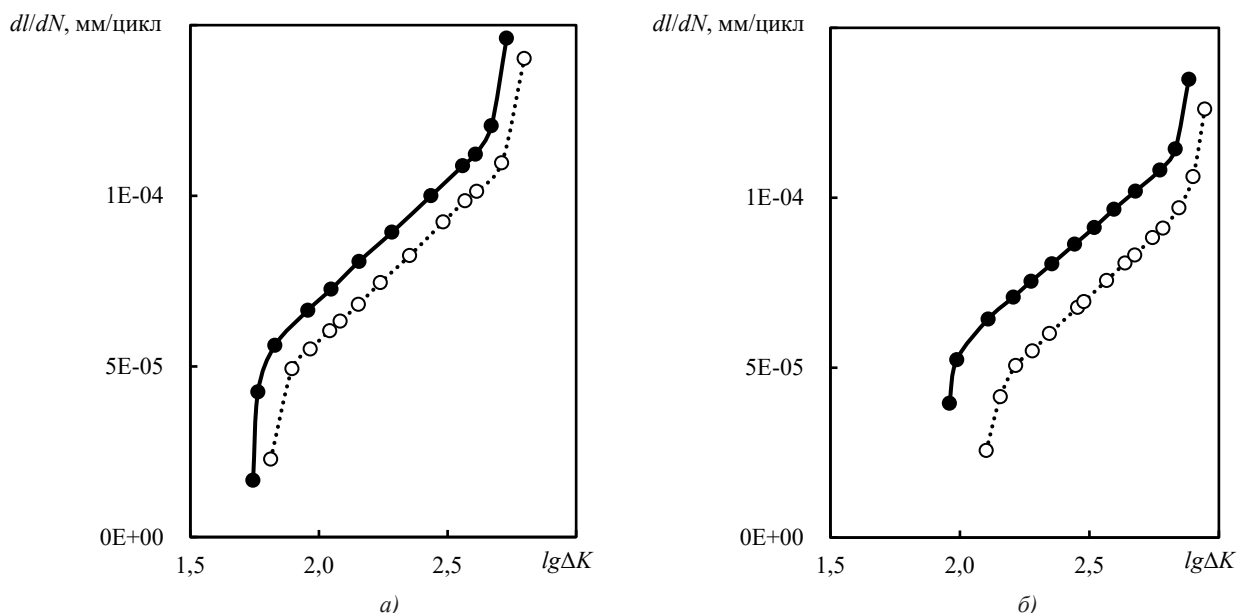


Рис. 2. Кинетические диаграммы развития усталостной трещины в сталях: *a* — 30ХГСА; *б* — 18Х2Н4ВА; сплошная линия — обработка без поля; точечная линия — в магнитном поле 1,6 МА/м

Видно (рис. 2), что после ТОМП значительно снижается скорость распространения трещины по сравнению с обработкой без поля, при этом диапазон значений КИН ΔK остается соизмеримым. Разрушение образца происходит при большей циклической длине трещины и большей величине K_{Ic}^H , что показано в таблице 1. В числителе приведены данные для обработки без поля, а в знаменателе — в поле с напряженностью 1,6 МА/м. Доверительные интервалы указаны при доверительной вероятности $P = 0,95$ и числе измерений $n = 5$.

Параметры, характеризующие вязкость при циклическом разрушении

Сталь	K_{Ic}^{II}	K_0^{II}	$l_{кр}$, мм	Число циклов до разрушения $N \times 10^3$
	МН/м ^{3/2}			
18Х2Н4ВА	$\frac{70,1 \pm 1,0}{81,5 \pm 1,0}$	$\frac{8,3 \pm 0,4}{9,9 \pm 0,4}$	$\frac{6,74 \pm 0,05}{7,11 \pm 0,05}$	$\frac{109 \pm 10}{153 \pm 10}$
	$\frac{51,1 \pm 1,0}{60,3 \pm 1,0}$	$\frac{5,1 \pm 0,3}{6,3 \pm 0,3}$	$\frac{4,92 \pm 0,05}{5,16 \pm 0,05}$	$\frac{115 \pm 10}{168 \pm 10}$

Рис. 3 а иллюстрирует механизм вязкого разрушения путём зарождения, роста и коалесценции пор, что характерно для сталей 18Х2Н4ВА и 30ХГСА. Рис. 3 б показывает результат того, как под действием нормальных напряжений из пор образуется трещина.

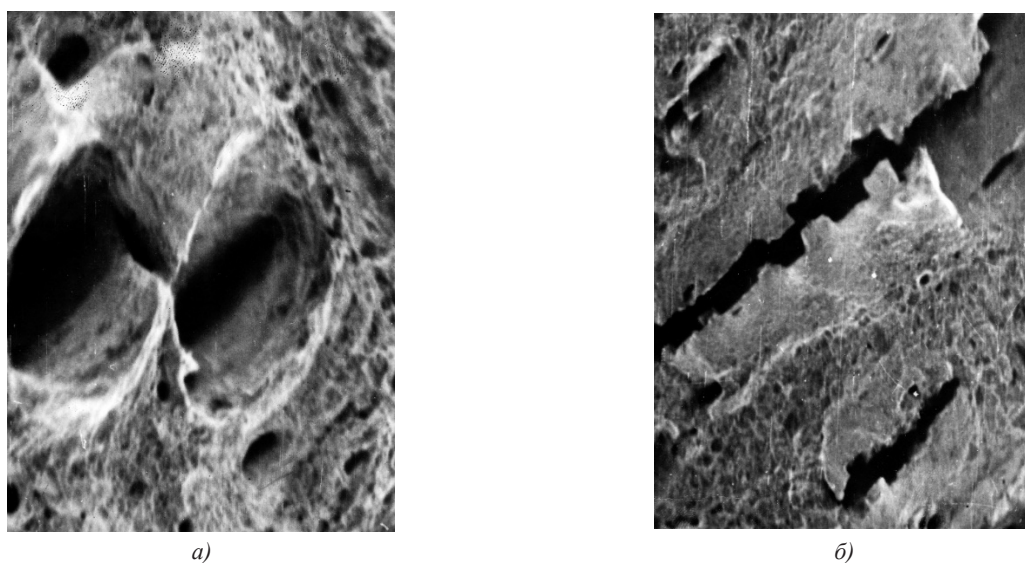


Рис. 3. Механизм образования трещины в стали 30ХГСА (РЭМ): а — излом с возникшими порами ($\times 1\,200$); б — трансформация пор в трещину ($\times 500$)

На рис. 4 продемонстрированы фрагменты трещин при режимах термической обработки в магнитном поле и без поля. Проводился анализ подобных данных для выявления зависимости изменения траектории трещины от вида термообработки.

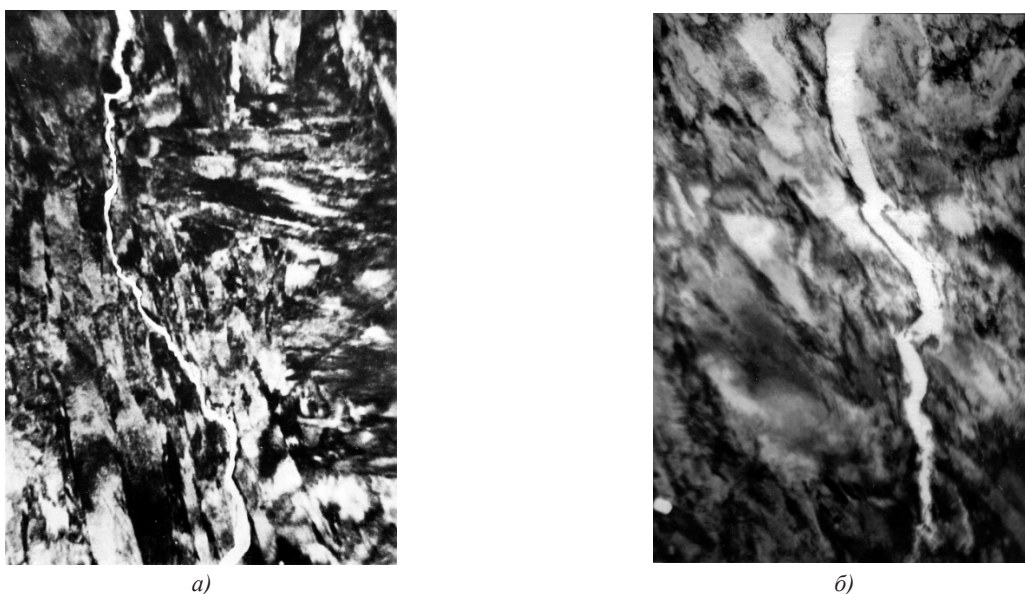


Рис. 4. Трещина в фольге стали 30ХГСА после закалки в масле ($\times 10\,000$): а — в магнитном поле; б — без поля

Обсуждение. Данные на рис. 1 показывают, что в случае термообработки в магнитном поле кинетика распространения трещин проявляет более подавленный характер по сравнению с обработкой без поля, а последняя стадия разрушения наступает при большем количестве циклов испытания. Кинетические диаграммы развития усталостной трещины (рис. 2) также демонстрируют существенное снижение скорости развития трещины в условиях обработки в магнитном поле при сохранении интервала КИН ДК. Существуют представления [8, 9], что при циклических испытаниях целесообразнее характеризовать вязкость начальной (пороговой) величиной КИН K_0^H , соответствующей началу расслоения магистральной трещины по отрывному механизму (с заданной степенью стеснения пластической деформации), а не максимальной величиной КИН, отвечающей предельному состоянию. Как видно из таблицы 1, после ТОМП значение величиной K_0^H увеличивается. Обосновано можно ожидать повышения долговечности и работоспособности изделий машиностроения после проведения термообработки в магнитном поле [10, 11], на что также указывают результаты предыдущих исследований о воздействии ТОМП на механические свойства [12, 13].

В монографии [3] обобщены данные о том, что при обработке на высокопрочное состояние (структура мартенсита отпуска или нижнего бейнита [14, 15]) влияние магнитного поля проявляется в существенной фрагментации структуры, повышении дисперсности отдельных кристаллов ферромагнитной α -фазы и их ансамблей (пакетов), увеличении удельной поверхности субгранц, препятствующих движению дислокаций в процессе нагружения. Локальное перенапряжение у вершины дислокационного скопления может релаксировать через образование зародыша трещины, развитие которой зависит от характера структуры стали. В зависимости от условий нагружения и исходного состояния мартенсита [16, 17], рост микроскопической трещины может протекать по различным механизмам, определяющим вид поверхности излома. Следует отметить, что для рассматриваемых сталей 30ХГСА и 18Х2Н4ВА вязкое разрушение происходит при появлении пор, их росте и объединении (рис. 3 а). Знакопеременные нагрузки приводят к усталостному разрушению путем образования большого количества избыточных вакансий (например, в результате междислокационных взаимодействий и скольжения с образованием порогов [2, 18]), которые могут объединяться, образуя пору. Нормальные напряжения, действуя на поверхности зародышей пор, способствуют стоку вакансий, что приводит к трансформации пор в трещину (рис. 3 б).

Продвижение образовавшейся трещины зависит от наличия препятствий на её пути, что определяется особенностями имеющейся у материала структуры. В связи с этим с помощью электронной микроскопии исследовались параметры траектории распространения трещин в тонких фольгах, т.к. они очень зависимы от структуры [1]. Результаты анализа тонкой структуры позволяют сделать заключение, что использование технологии ТОМП не влияет на механизм изменения траектории трещины, т.е. смена траектории происходит случайным образом (рис. 4) при встрече с различными структурными элементами (карбидами, границами фаз и т.п.) и не зависит от способа термообработки.

Оценить эффективность структурных барьеров, обусловленных ТОМП, на пути развития трещины позволяет анализ автокорреляционных функций (АКФ) [19, 20] связывающих отклонение линии трещины от её среднего положения и 1-ую производную траектории её распространения (рис. 5), что характеризует угловые параметры изменения траектории распространения трещины в фольге. АКФ позволили оценить влияние ТОМП на статистические параметры трещин: $K_x(0)$ — стандартное отклонение линии трещины; $K'_x(0)$ — стандартный разброс тангенса угла наклона траектории (показатель извилистости); $\tau_x(0)$ и $\tau'_x(0)$ — диапазоны взаимозависимости функций линейного разброса и тангенсов углов наклона соответственно (характеризуют увеличение длины трещины в результате воздействия однократно возникшего фактора). Статистические параметры трещин $K_x(0)$; $\tau_x(0)$; $K'_x(0)$; $\tau'_x(0)$ для стали 30ХГСА показаны в таблице 2, где приведены среднеквадратичные отклонения экспериментальных данных.

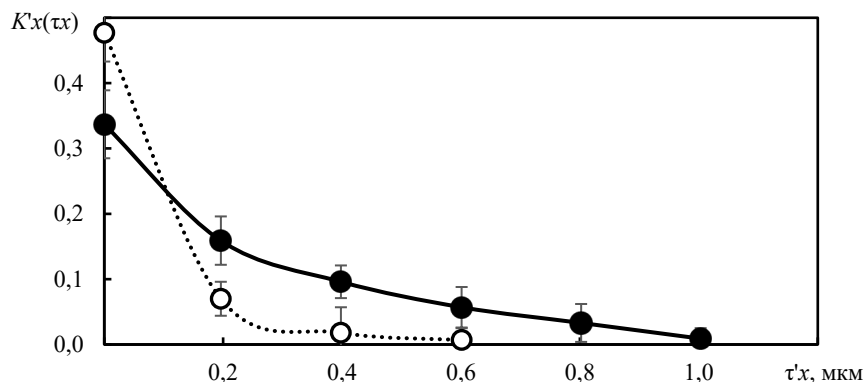


Рис. 5. Графики функций автокорреляции наклона изгибов линии трещины относительно среднего положения: сплошная линия — обработка без поля; точечная линия — обработка в магнитном поле напряженностью 1,6 МА/м

Таблица 2

Влияние режимов термообработки на параметры распространения трещины длиной $l = 6$ мкм

Величина напряженности магнитного поля, МА/м	$\sqrt{K_x(0)}$	$\tau_x(0)$	$\sqrt{K'_x(0)}$	$\tau'_x(0)$
0,0	$0,156 \pm 0,03$	$0,5 \pm 0,20$	$0,58 \pm 0,04$	$1,1 \pm 0,3$
1,6	$0,144 \pm 0,03$	$1,1 \pm 0,15$	$0,66 \pm 0,03$	$0,6 \pm 0,2$

По данным в таблице 2 можно отметить, что ТОМП оказывает влияние на все приведённые статистические характеристики трещин. Стандартный разброс тангенса углов наклона участков линии трещины ($\sqrt{K'_x(0)}$) после ТОМП увеличивается на 0,12, что отвечает увеличению среднего модуля наклона траектории трещины на $\sim 6^\circ$ (от 29 до 35°). При этом интервал корреляции ($\tau'_x(0)$) снижается на 0,5 мкм.

Заключение. Основным результатом работы является установление изменений в кинетике развития усталостных трещин, а также выявление механизмов, обуславливающих повышенную трещиностойкость после ТОМП. На основе полученных данных можно сделать вывод, что технология термической обработки в магнитном поле способствует формированию структуры, обеспечивающей увеличение извилистости трещин: наблюдается увеличение крутизны изгиба траектории из-за большего числа эффективных барьеров (увеличение дисперсности мартенсита) на её пути. В этой связи можно заключить, что характер организации структуры при ТОМП имеет много общего с процессом высокотемпературной термомеханической обработки. Таким образом, в арсенале практических методов для создания высокопрочного состояния появляется новый, который применим для широкого ассортимента марок сталей и не требует кардинальных изменений в технологии их термической обработки. В свою очередь, повышение трещиностойкости сталей позволяет обеспечить большую безопасность различных устройств и техногенных систем, а также снизить их себестоимость и затраты на обслуживание.

Список литературы / References

1. Gdoutos EE. *Fracture Mechanics: An Introduction*. Springer Nature Switzerland AG; 2020. 477 p.
2. Yukitaka Murakami. *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*. Academic Press; 2019. 758 p.
3. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. *Магнитная гетерогенность аустенита и превращения в сталях*. Монография. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2021. 198 с.
4. Pustovoit VN, Dolgachev YuV. *Magnetic Heterogeneity of Austenite and Transformations in Steels*. Monograph. Rostov-on-Don: Don State Technical University; 2021. 198 p. (In Russ.)
5. Пустовойт В.Н., Гришин С.А., Дука В.В., Федосов В.В. Установка для исследования кинетики развития трещины при испытаниях на циклический изгиб. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2020;86(7):59–64. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-59-64>
6. Pustovoit VN, Grishin SA, Duka VV, Fedosov VV. Setup for Studying the Kinetics of Crack Growth in Cyclic Bending Tests. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2020;86(7):59–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-59-64>
7. Si Y, Rouse JP, Hyde CJ. Potential Difference Methods for Measuring Crack Growth: A Review. *International Journal of Fatigue*. 2020;136:105624. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105624>
8. Tarnowski KM, Dean DW, Nikbin KM, Davies CM. Predicting the Influence of Strain on Crack Length Measurements Performed Using the Potential Drop Method. *Engineering Fracture Mechanics*. 2017;182:635–657. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.06.008>
9. Zerbst U, Madia M, Vormwald M, Beier HTh. Fatigue Strength and Fracture Mechanics – A General Perspective. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018;198:2–23. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.04.030>
10. Pineau A, McDowell DL, Busso EP, Antolovich SD. Failure of Metals II: Fatigue. *Acta Materialia*. 2016;107:484–507. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.05.050>
11. Tatsuo Sakai, Akiyoshi Nakagawa, Noriyasu Oguma, Yuki Nakamura, Akira Ueno, Shoichi Kikuchiet, et al. A review on fatigue fracture modes of structural metallic materials in very high cycle regime. *International Journal of Fatigue*. 2016;93(2):339–351. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.05.029>
12. Schastlivtsev VM, Kaletina YuV, Fokina EA, Mirzaev DA. Effect of External Actions and a Magnetic Field on Martensitic Transformation in Steels and Alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 2016;58:247–253. <https://doi.org/10.1007/s11041-016-9997-4>
13. Yan Wang, Zhiguo Xing, Yanfei Huang, Weiling Guo, Jiajie Kang, Haidou Wang, et al. Effect of Pulse Magnetic Field Treatment on the Hardness of 20Cr2Ni4A Steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021;538:168248. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168248>

12. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Структурное состояние мартенсита и остаточного аустенита в углеродистых сталях после закалки в магнитном поле. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022;(12(810)):10–14. <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.12.10-14>

Pustovoyt VN, Dolgachev YuI. Structural State of Martensite and Retained Austenite in Carbon Steels after Quenching in Magnetic Field. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2022;(12(810)):10–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.12.10-14>

13. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.Н. Формирование эпюры остаточных напряжений после закалки в магнитном поле. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(4):54–61. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61>

Pustovoyt VN, Dolgachev YV. Formation of Residual Stress Diagram after Quenching in a Magnetic Field. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(4):54–61. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61>

14. Bhadeshia HKDH, Honeycombe RWK. *Steels: Structure, Properties, and Design*. Elsevier; 2024. 550 p.

15. Fultz B. *Phase Transitions in Materials*. Cambridge University Press; 2020. 604 p.

16. Jinliang Wang, Xiaohui Xi, Yong Li, Chenchong Wang, Wei Xu. New Insights on Nucleation and Transformation Process in Temperature-Induced Martensitic Transformation. *Materials Characterization*. 2019;151:267–272. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.03.023>

17. Wang JL, Huang MH, Xi XH, Wang CC, Xu W. Characteristics of Nucleation and transformation sequence in Deformation-Induced Martensitic Transformation. *Materials Characterization*. 2020;163:110234. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110234>

18. Anderson PM, Hirth JP, Lothe J. *Theory of Dislocations*. Cambridge University Press; 2017. 699 p.

19. Webster JG, Eren H (eds.). *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Two-Volume Set*. CRC press; 2018. 3559 p.

20. Whitehouse DJ. *Handbook of Surface Metrology*. CRC press; 2023. 350 p.

Об авторах:

Виктор Николаевич Пустовойт, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), pustovoyt45@gmail.com

Юрий Вячеславович Долгачев, доктор технических наук, доцент кафедры «Материаловедение и технология металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), ydolgachev@donstu.ru

Заявленный вклад авторов:

В.Н. Пустовойт: формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

Ю.В. Долгачев: получение экспериментальных данных, расчеты, анализ результатов исследований, подготовка текста, формулирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Viktor N. Pustovoyt, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), pustovoyt45@gmail.com

Yuri V. Dolgachev, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Materials Science and Metal Technology Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), ydolgachev@donstu.ru

Claimed Contributorship:

VN Pustovoyt: formulation of the basic concept, goals and objectives of the research, academic advising, text revision, conclusions correction.

YuV Dolgachev: obtaining experimental data, calculations, research results analysis, text preparation, conclusions formulation.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 06.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 02.07.2025

Принята к публикации / Accepted 10.07.2025

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.793

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-250-256>

Тонкая структура стали после микродугового молибденирования

М.С. Степанов , Ю.М. Домбровский 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ stepanovms@yandex.ru

EDN: BECKGZ

Аннотация

Введение. В условиях современного производства важной задачей является повышение надежности и долговечности стальных изделий. Для решения этой проблемы целесообразно создавать на их поверхности высокотвердые износостойкие покрытия, формируемые методом диффузионного насыщения металла карбидообразующими элементами. Традиционные способы получения таких покрытий отличаются значительной продолжительностью — до 8 и более часов. Для ускорения процесса формирования в литературе предложены различные методы, основанные на применении высокоэнергетического воздействия на материал (лазерного, плазменного и т.д.), однако они требуют использования сложного и дорогостоящего оборудования. В настоящей работе рассмотрен способ получения высокотвердого покрытия на основе молибдена методом микродугового легирования, который заключается в воздействии на обрабатываемое стальное изделие, погруженное в угольный порошок, мультипликативных микродуговых разрядов, возникающих между поверхностью металла и окружающей порошковой средой при пропускании электрического тока. Этот метод позволяет значительно интенсифицировать процесс диффузионного поверхностного насыщения, отличается простотой и низкой энергоемкостью. Свойства получаемых покрытий в основном определяются их тонкой структурой, поэтому исследование этой структуры представляет собой актуальную задачу. Таким образом, целью работы было изучение особенностей тонкой структуры поверхностного слоя стали после микродугового молибденирования.

Материалы и методы. В качестве источника молибдена для диффузионного насыщения использовали обмазку, содержащую мелкодисперсный порошок молибдата аммония и электропроводный гель в качестве связующего в объемном соотношении 1:1. Обмазку наносили на поверхность цилиндрических образцов диаметром 12 мм и длиной 35 мм, изготовленных из стали 20, после чего их погружали в металлический контейнер с угольным порошком с размером частиц 0,4–0,6 мм. Через данный порошок пропускали электрический ток в течение 6 минут, при этом поверхностная плотность тока составляла 0,53 А/см². Для исследований тонкой структуры стали использовали микроскоп Neophot-21, дифрактометр ARL X'TRA-435, сканирующий электронный микроскоп ZEISS CrossBeam 340 с рентгеновским микроанализатором и сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator.

Результаты исследования. После микродугового молибденирования стальных образцов образуется покрытие, обладающее многослойным строением и сложным фазовым составом. На поверхности материала обнаруживается слаботравящийся слой толщиной 50–55 мкм, под которым расположен науглероженный слой с эвтектоидной структурой толщиной около 200 мкм, а еще ниже сохраняется исходная феррито-перлитная структура. Основа слаботравящегося слоя представляет собой дисперсную феррито-карбидную смесь, содержащую около 47 мас. % Мо и имеющую микротвердость 8–9 ГПа. В этом слое расположены карбидные включения размером до 5 мкм, содержащие 94 мас. % Мо и обладающие микротвердостью до 21 ГПа. Рельеф поверхности характеризуется наличием карбидных включений размером 3–5 мкм, а также множественными наноразмерными включениями, выступающими над поверхностью шлифа на высоту от 10 до 150–200 нм.

Обсуждение. Результаты исследования, полученные с использованием металлографического анализа, сканирующей электронной микроскопии, рентгеновского фазового анализа и атомно-силовой микроскопии, показали, что при микродуговом молибденировании стали формируется диффузионный слой, содержащий наноразмерные частицы карбидной фазы, достигающие объёмной доли до 70 %, расположенные в основе слоя, представляющего собой феррито-карбидную эвтектидную смесь. Количественная оценка упрочняющего влияния этих частиц подтвердила, что наличие таких частиц, характеризующихся высокой микротвердостью, и обуславливает высокую твердость образующегося покрытия.

Заключение. Микродуговое молибденирование стали представляет собой эффективный метод получения покрытий, обладающих выдающимися эксплуатационными характеристиками. Полученные вследствие этого покрытия не только отличались высокой твердостью за счет наноразмерных карбидных частиц, расположенных в феррито-карбидной основе, но и демонстрировали улучшенные механические свойства. Это делает их перспективными для применения в различных отраслях, где требуются высокая износостойкость и долговечность изделий. Результаты исследований показывают, что использование данного метода значительно сокращает время обработки и позволяет избежать применения дорогостоящего оборудования, что делает его более доступным для промышленного внедрения.

Ключевые слова: модифицирование поверхности стали, создание молибденированного покрытия, формирование диффузионного слоя

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников редакции и рецензентов за внимание, проявленное к публикации и ценные замечания, которые позволили улучшить ее содержание.

Для цитирования. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Тонкая структура стали после микродугового молибденирования. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(3):250–256. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-250-256>

Original Empirical Research

Fine Steel Structure after Microarc Molybdenum Steel Saturation

Makar S. Stepanov , Yuri M. Dombrovskii 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ stepanovms@yandex.ru

Abstract

Introduction. In modern production, it is important to increase reliability and durability of steel products. One way to achieve this is by creating high-hardness, wear-resistant coatings on their surface. These coatings can be formed using the method of diffusion saturation, which involves the introduction of carbide-forming elements into the metal. Traditional methods for creating these coatings are time-consuming, taking up to 8 hours or more. To accelerate this process, researchers have proposed using high-energy methods such as laser and plasma treatments. However, these methods require specialized equipment that can be expensive. In this paper, we consider a method for creating a high-hardness molybdenum-based coating by microarc alloying. This method involves exposing a processed steel product immersed in coal powder to multiplicative microarc discharges that occur between the metal surface and the surrounding powder medium. The discharges are generated when an electric current is passed through them. This method allows for a significant increase in the process of diffusive surface saturation. It is characterized by simplicity and low energy consumption. The properties of the resulting coatings are primarily determined by their fine structure. Therefore, studying this structure is a crucial task. The aim of this research was to investigate the features of the fine structure of the steel surface layer after microarc molybdenum plating.

Materials and Methods. A coating containing finely dispersed ammonium molybdate powder and an electrically conductive gel as a binder in a volume ratio of 1:1 was used as a source of molybdenum for diffusion saturation. The coating was applied to the surface of cylindrical samples made of 20 steel with a diameter of 12 mm and a length of 35 mm. Then they were immersed in a metal container with a carbon powder with a particle size 0.4–0.6 mm. An electric current was passed through this powder for 6 minutes, with a surface current density of 0.53 A/cm². A Neophot-21 microscope, an ARL X'TRA-435 diffractometer, a ZEISS CrossBeam 340 scanning electron microscope with an X-ray microanalyzer, and a NanoEducator scanning probe microscope were used to study the fine structure of steel.

Results. After microarc molybdenum saturation of steel samples, a coating with a multilayer structure and a complex phase composition was formed. On the surface of the material, there was a slightly etched layer with a thickness of 50–55 μm, under which there was a carbonized layer with eutectoid structure and a thickness of approximately 200 μm, and the original ferrite-pearlite structure was preserved lower. The base of the slightly etched layer was a dispersed ferrite-carbide mixture containing about 47% wt. % of Mo and having a microhardness of 8–9 GPa. This layer contained carbide inclusions up to 5 μm in size, containing 94 wt. % of Mo and having microhardness up to 21 GPa. The surface relief was characterized by the presence of carbide inclusions of 3–5 μm in size, as well as multiple nanoscale inclusions protruding above the surface to a height of 10 to 150–200 nm.

Discussion. The results of the study, obtained using metallographic analysis, scanning electron microscopy, X-ray phase analysis and atomic force microscopy, showed that during microarc molybdenum steel saturation, a diffusion layer was formed containing nanoscale particles of the carbide phase. These particles reached a volume fraction of up to 70% and were located at the base of the layer. This layer was a ferrite-carbide eutectoid mixture. A quantitative assessment of the strengthening effect of these particles confirmed that the presence of such particles, characterized by high microhardness, determines the high hardness of the resulting coating.

Conclusion. Microarc molybdenum steel saturation is an effective method for creating coatings with exceptional performance characteristics. These coatings are characterized not only by their high hardness, due to the presence of nanoscale carbide particles located in a ferrite-carbide base, but also by their improved mechanical properties. This makes them promising for use in various industries where high wear resistance and durability of products are required. The research findings indicate that microarc molybdenum steel saturation significantly reduces processing time and avoids the use of expensive equipment, which makes it more affordable for industrial implementation.

Keywords: modification of the steel surface, creation of a molybdenum coating, formation of a diffusion layer

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board of the journal and the reviewers for their attentive attitude to the article and the comments that improved its quality.

For citation. Stepanov MS, Dombrovskii YuM. Fine Steel Structure after Microarc Molybdenum Steel Saturation. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(3):250–256. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-250-256>

Введение. В условиях современного производства постоянно возрастают требования к надежности и долговечности стальных изделий, особенно тех, которые работают в сложных условиях эксплуатации. Традиционным методом решения данной задачи является формирование на их поверхности диффузионных покрытий, обладающих повышенной твердостью и износостойкостью [1, 2]. Сюда следует отнести покрытия карбидного типа, полученные при диффузионном насыщении стали хромом [3], вольфрамом [4], молибденом и другими карбидообразующими элементами [5]. Существенным недостатком этой технологии является её значительная продолжительность — более 8 часов. Ускорить диффузионное насыщение возможно, если применять высокоэнергетическое воздействия на материал, например, плазменное [6], ионно-плазменное [7], лазерное [8, 9], электроискровое [10], а также нагрев с использованием термоэмиссионных эффектов [11]. Перечисленные технологии эффективны, но требуют сложного и дорогостоящего оборудования. В этой связи неоспоримым преимуществом отличается метод микродугового поверхностного легирования [12], при котором нагрев и диффузионное насыщение стального изделия происходит в металлическом контейнере с угольным порошком. При этом нагрев протекает за счёт микродуг, возникающих в результате пропуска электрического тока в цепи: источник питания – контейнер – угольный порошок – стальное изделие. Ускорение процесса диффузионного насыщения достигается за счет воздействия на материал микродуговых разрядов, возникающих между поверхностью изделия и угольным порошком. Очевидная простота данной технологии в совокупности с низкой энергоемкостью не требуют дополнительных доказательств её преимущества.

Покрытия карбидного типа, содержащие молибден, широко применяются в машиностроении. Молибденирование проводят нагревом в порошках химических соединений на основе молибдена или ферромolibдена, а также в газовой среде галогенидов молибдена, либо в расплавах на основе молибдата натрия. Процесс молибденирования осуществляют при 1000–1200 °С, в течение не менее 6–7 ч. Применение метода микродугового легирования для получения таких покрытий позволит значительно сократить длительность процесса, поэтому изучение свойств покрытий, полученных с использованием микродугового нагрева, является актуальной задачей [13, 14]. Основным фактором, определяющим свойства покрытий такого типа, является наличие в их структуре частиц карбидной фазы. В этом контексте целью настоящей работы стало изучение особенностей тонкой структуры поверхностного слоя стали после микродугового молибденирования.

Материалы и методы. Микродуговое молибденирование выполняли в обмазке, из порошка молибдата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ в электропроводном геле в объемном соотношении 1:1. Обмазку наносили на поверхность образцов из стали 20 диаметром 12 мм и длиной 35 мм, которые погружали в металлический контейнер с угольным порошком дисперсностью 0,4–0,6 мм, и пропускали электрический ток в течение 6 минут в цепи источник – контейнер – угольный порошок – образец. Для достижения требуемой температуры процесса молибденирования, плотность тока на поверхности образцов составляла 0,53 А/см².

После диффузионного насыщения изготавливали поперечный микрошлиф путём его заливки эпоксидной смолой в цилиндрические оправки с помощью которых обеспечивалась строгая перпендикулярность поверхности шлифа его продольной оси. Далее образцы шлифовались на шлифовальных бумагах зернистостью от Р480 до Р2500, и полировались сначала оксидом хрома Cr_2O_3 марки ОХА-0 по ГОСТ 2912–79 и окончательно алмазной пастой марки АМ с зернистостью порошка 3/2 по ГОСТ 25593–83. После удаления остатков пасты этиловым спиртом проводили химическое травление реактивом Ржешотарского (4 %-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте).

Микроструктуру изучали на микроскопе Neophot-21 с цифровой приставкой TourCam Xcam0720P-H HDMI. Рентгенофазовый анализ — на дифрактометре ARL X'TRA-435 в Cu-K α излучении. Твердость диффузионного слоя измерялась микротвёрдомером ПМТ-3 при нагрузках 0,490 и 0,196 Н. Содержание молибдена в слое определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа ZEISS CrossBeam 340 с рентгеновским микроанализатором Oxford Instruments X-max 80. Рельеф поперечного шлифа диффузионного слоя изучали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NanoEducator в режиме постоянной силы.

Результаты исследования. Металлографическим анализом на поверхности образцов после микродугового молибденирования выявлено слаботравящееся покрытие толщиной 50–55 мкм. Под ним обнаружен науглероженный слой с перлитной структурой толщиной около 200 мкм, далее — исходная структура. Покрытие состоит из дисперсной феррито-карбидной смеси, содержащей карбидные включения размером до 5 мкм. Микротвердость основы слоя составляет 8–9 ГПа, карбидных включений — до 21 ГПа (рис. 1).

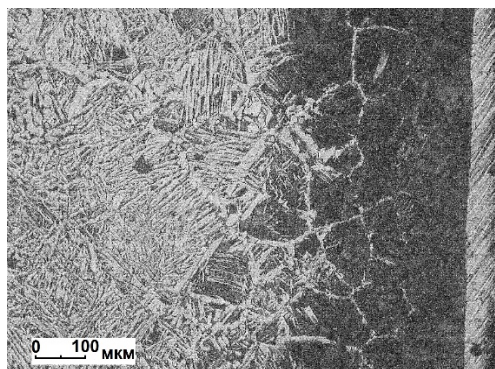


Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя стали 20 после микродугового молибденирования

Результаты измерения массовой доли молибдена (рис. 2) представлены в таблице 1. Из полученных данных видно, что содержание молибдена в различных точках покрытия отличается, а само покрытие имеет неоднородный состав.

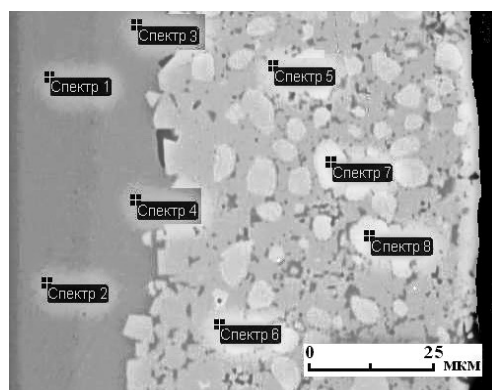


Рис. 2. Структура молибденированного покрытия в отраженных электронах

Таблица 1

Концентрация С диффузанта в отдельных точках покрытия

№	1	2	3	4	5	6	7	8
С, масс. %	—	—	3,1	3,3	46,8	47,0	93,9	94,1

В точках 1 и 2 молибден отсутствует. Далее формируется переходная зона твердого раствора молибдена, содержащая около 3 % Мо. Толщина диффузионного слоя составляет 50–55 мкм. Он состоит из основы (спектры 5, 6) с расположенными в ней округлыми включениями (спектры 7, 8). Как видно из таблицы 1, в основе содержится примерно 47 % Мо, и поэтому она может представлять собой интерметаллид Fe₃Mo₂ или карбиды (Fe,Mo)₃C [15, 16]. Во включениях (спектры 7, 8) содержится примерно 94 % Мо, что соответствует карбидной фазе Mo₂C [16, 17].

Образование таких карбидов в поверхностном слое подтверждено с помощью рентгеновского фазового анализа (рис. 3).

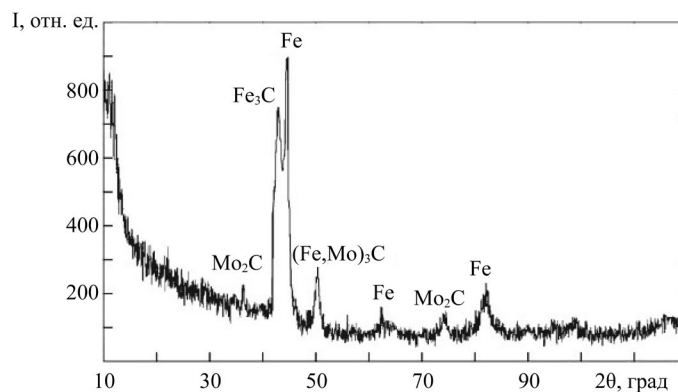
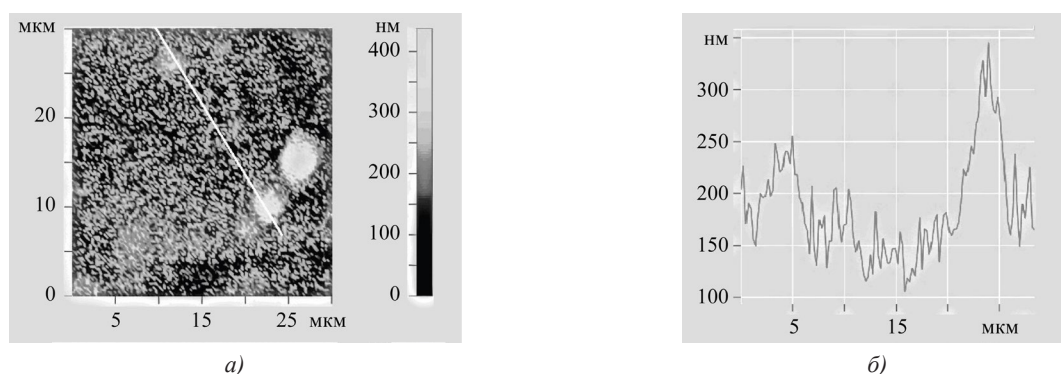
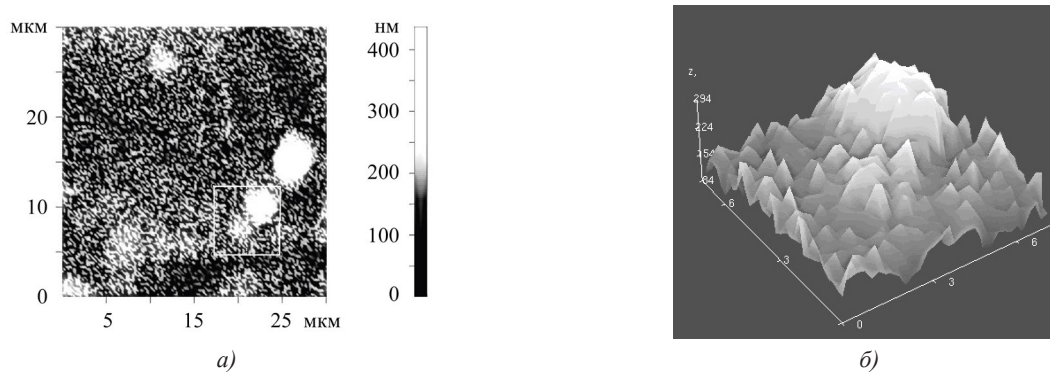


Рис. 3. Дифрактограмма молибденированного покрытия

Высокая микротвердость основы покрытия может объясняться формированием в ней наноразмерных карбидных частиц, что было подтверждено результатами атомно-силовой микроскопии (АСМ) (рис. 4, 5).


 Рис. 4. Рельеф поверхности образца: *а* — сечение по направлению 1; *б* — профиль, соответствующий данному сечению

 Рис. 5. Изображение поверхности стали, полученное методом АСМ: *а* — 2D-изображение; *б* — 3D-изображение

Таким образом, в структуре покрытия обнаружены карбидные включения размером до 5 мкм, а также множественные наноразмерные включения, которые выступают над плоскостью поверхности образца. Такие включения имеют более высокую твердость по сравнению с остальными структурными составляющими.

Для количественной оценки упрочняющего влияния этих частиц целесообразно использовать правило аддитивности твердости, в соответствии с которым твердость H_{AB} двухфазного сплава можно представить в виде суммы твердости H_A и H_B составляющих фаз A и B , взятых в их объемных долях V_A и V_B :

$$H_{AB} = H_A \cdot V_A + H_B \cdot V_B. \quad (1)$$

В качестве фазы A выступает дисперсная феррито-карбидная смесь, как основа диффузионного слоя, в качестве фазы B — наноразмерные карбидные включения. Для расчета по формуле (1) использовали следующие исходные данные: $H_A = 3\,000$ МПа, $H_B = 23$ ГПа, значения V_A и V_B определены по методике [18] и приняты равными: $V_A = 0,73$; $H_B = 0,27$. Откуда получено: $H_{AB} = 8\,400$ МПа, что согласуется с результатами измерения интегральной микротвердости диффузионного слоя.

Обсуждение. Полученные данные подтвердили возможность ускоренного получения высокотвердого молибденового покрытия на стали с использованием метода микродугового поверхностного легирования. При общей толщине покрытия 50–55 мкм оно имеет сложное строение по глубине и состоит дисперсной ферритокарбидной смеси микротвердостью 8–9 ГПа, с включениями относительно крупных частиц карбидной фазы размером до 5 мкм (микротвердо-

стью до 21 ГПа), и множественных наноразмерных включений. Далее следует науглероженный слой с перлитной структурой толщиной около 200 мкм, переходящий в исходную структуру стали 20. Расчетная оценка упрочняющего влияния таких наноразмерных включений подтвердила, что их наличие обуславливает высокую микротвердость основы покрытия. Следует отметить, что полученное значение микротвердости основы покрытия превышает ее значение, которое достигается при применении традиционных методов молибденирования. Можно предположить, что образование наноразмерных включений карбидной фазы при микродуговом молибденировании происходит под воздействием многочисленных микродуговых разрядов, возникающих между поверхностью стали и прилегающим угольным порошком в процессе протекания электрического тока. Однако физические процессы, происходящие при таком воздействии, требуют отдельного рассмотрения и могут быть одним из направлений для будущих исследований.

Заключение. Микродуговое поверхностное легирование может быть использовано для получения высокотвердых покрытий на стали методом молибденирования. Исследование тонкой структуры покрытия показало, что оно имеет сложный фазовый состав: дисперсную ферритно-карбидную смесь с многочисленными мелкими и наноразмерными карбидными включениями, что придаёт покрытию высокую микротвердость. Под ним расположен науглероженный слой с перлитной структурой, а далее — исходная структура стали. Полученные результаты могут быть полезны при разработке технологий поверхностного упрочнения стальных изделий, таких как инструменты и детали машин, работающих в сложных условиях.

Список литературы / References

1. Mittemeijer EJ, Somers MAJ (eds.). *Thermochemical Surface Engineering of Steels*. Woodhead Publishing; 2015. 827 p.
2. Wang RJ, Qian YY, Liu J. Structural and Interfacial Analysis of WC92–Co8 Coating Deposited on Titanium Alloy by Electrospark Deposition. *Applied Surface Science*. 2024;228(1–4):405–409. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.01.043>
3. Guryev MA, Guryev AM, Ivanov SG, Chernykh EV. Influence of the Chemical Composition of Steel on the Structure and Properties of Diffusion Coatings Obtained by Simultaneous Saturation of Structural Steels with Boron, Chromium, and Titanium. *Physics of the Solid State*. 2023;65(1):62–65. <https://doi.org/10.1134/S1063783423700014>
4. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Создание покрытий карбидного типа при микродуговом термодиффузионном вольфрамирании стали. *Материаловедение*. 2018;(1):20–25.
5. Stepanov MS, Dombrovskiy YuM. Deposition of Carbide-Type Coatings during Micro-Arc Thermomdiffusion Tungstening of Steel. *Materialovedenie*. 2018;(1):20–25. (In Russ.)
6. Yu-Hsien Liao, Fan-Bean Wu. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Refractory Molybdenum-Tungsten Nitride Coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2024;476:130154. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130154>
7. Калита В.И., Комлев Д.И., Радюк А.А., Михайлова А.Б., Демин К.Ю., Румянцев Б.А. Исследование структуры и микротвердости плазменного покрытия из аустенитной стали после фрикционной обработки. *Металлы*. 2024;(3):32–42.
8. Kalita VI, Komlev DI, Radyuk AA, Mikhailova AB, Demin KYu, Rumyantsev BA. Investigation of the Structure and Microhardness of Plasma Coatings Made of Austenitic Steel after Friction Treatment. *Metally*. 2024;(3):32–42. (In Russ.)
9. Кудряков О.В., Варавка Н.В., Забияка И.Ю., Ядрец Э.А., Караваев П.В. Морфология и генеалогия структурных дефектов в вакуумных ионно-плазменных покрытиях. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2020;20(3):269–279. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-269-279>
10. Kudryakov OV, Varavka VN, Zabiya IYu, Yadrets EA, Karavaev VP. Morphology and Genealogy of Structural Defects in Vacuum Ion-Plasma Coatings. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2020;20(3):269–279 <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-269-279>
11. Шабурова Н.А., Пашкеев К.Ю., Мясоедов В.А. Сравнительный анализ структуры и свойств хромокобальтового покрытия, полученного диффузионным насыщением и лазерной наплавкой. *Материаловедение*. 2024;(6):12–20. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2024-0-6-12-20>
12. Shaburova NA, Pashkeev KYu, Myasoedov VA. Comparative Analysis of Structure and Properties of Chromocobalt Coating Applied by Diffusion Saturation and Laser Surfacing. *Materialovedenie*. 2024;(6):12–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2024-0-6-12-20>
13. Liexin Wu, Li Meng, Yueyue Wang, Shuhuan Zhang, Wuxia Bai, Taoyuan Ouyang, et al. Effects of Laser Surface Modification on the Adhesion Strength and Fracture Mechanism of Electroless-Plated Coatings. *Surface And Coatings Technology*. 2022;429:127927. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127927>
14. Химухин С.Н., Еремина К.П., Хе В.К. Структура комбинированных интерметаллидных покрытий электроискровых покрытий на стали 45. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2024;(11):20–27. <https://doi.org/10.30906/mitom.2024.11.20-27>
15. Khimukhin SN, Eremina KP, Khe VK. Structure of Combined Intermetallide Electrospark Coatings on Steel 45. *Metallvedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*. 2024;(11):20–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.30906/mitom.2024.11.20-27>
16. Shaburova NA. Chromium Plating of Steel Parts Using the Thermoemission Field. *Materials Physics and Mechanics*. 2024;52(3):154–160. https://doi.org/10.18149/MPM.5232024_14
17. Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Пустовойт В.Н. Микродуговое диффузионное насыщение стали углеродом и карбидообразующими элементами. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017;(5(743)):45–49.

Stepanov MS, Dombrovskii YuM, Pustovoit VN. Microarc Diffusion Saturation of Steel with Carbon and Carbide-Forming Elements. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov* 2017;(5(743)):45–49. (In Russ.)

13. Stepanov MS, Dombrovskii YuM. Thermodynamic Analysis of Carbide Layer Formation in Steel with Microarc Saturation by Molybdenum. *Steel in Translation*. 2016;46(2):79–82. <https://doi.org/10.3103/S0967091216020169>

14. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Микродуговое молибденирование стали с использованием молибдата аммония. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;8(4):47–53. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-47-53>

Stepanov MS, Dombrovskii YM. Microarc Molybdenum Steel Saturation Using Ammonium Molybdate. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;8(4):47–53. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-47-53>

15. Калинин Б.А., Платонов П.А., Тузов Ю.В., Чернов И.И., Штромбах Я.И. Конструкционные материалы ядерной техники. В кн: *Физическое материаловедение*, т. 6. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; 2021. 736 с.

Kalin BA, Platonov PA, Tuzov YuV, Chernov II, Strombakh YaI. Structural Materials of Nuclear Engineering. In: *Physical Materials Science*, vol. 6. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI; 2021. 736 p. (In Russ.)

16. Kobernik NV, Pankratov AS, Mikheev RS, Orlik AG, Sorokin SP, Petrova VV, et al. Application of Chromium Carbides in Surfacing Materials Intended for Obtaining of Abrasion Resistant Coatings. *Vestnik Mashinostroyeniya*. 2020;(9):64–68. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-9-64-68>

17. Алешин Н.П., Коберник Н.В., Панкратов А.С., Петрова В.В. Термодинамическое моделирование образования карбидов хрома в наплавленном металле. *Вестник машиностроения*. 2020;(7):67–71. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-7-67-71>

Aleshin NP, Kobernik NV, Pankratov AS, Petrova VV. Thermodynamic Modeling of the Formation of Chromium Carbides in the Surfaced Metal. *Vestnik Mashinostroyeniya*. 2020;(7):67–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2020-7-67-71>

18. Волков Н.В., Скрытний В.И., Филиппов В.П., Яльцев В.Н. Методы исследования структурно-фазового состояния материалов. В кн: *Физическое материаловедение*, т. 3. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; 2021. 800 с.

Volkov NV, Skrytny VI, Filippov VP, Yaltsev VN. Methods for Studying the Structural and Phase State of Materials. In: *Physical Materials Science*, vol. 3. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI; 2021. 800 p. (In Russ.)

Об авторах:

Макар Степанович Степанов, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление качеством» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), stepanovms@yandex.ru

Юрий Маркович Домбровский, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), yurimd@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

М.С. Степанов: разработка концепции, создание и подготовка рукописи, визуализация результатов исследования и полученных данных.

Ю.М. Домбровский: осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

About the Authors:

Makar S. Stepanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Quality Management, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), stepanovms@yandex.ru

Yurii M. Dombrovskii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Materials Science and Technology of Metals Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), yurimd@mail.ru

Claimed Contributorship:

MS Stepanov: conceptualization, writing – original draft preparation, visualization.

YuM Dombrovskii: investigation, experiments.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 03.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 30.06.2025

Принята к публикации / Accepted 06.07.2025