

ISSN 2782-4004 (print)
ISSN 2782-6341 online

iPolytech Journal

Tom **29**, № **3**. 2025 / Vol. **29**, No **3**. 2025



<https://ipolytech.elpub.ru>

ISSN 2782-4004 (print)
ISSN 2782-6341 (online)

iPolytech Journal

Том 29, № 3. 2025 / Vol. 29, No. 3. 2025



<https://ipolytech.elpub.ru>



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал «iPolytech Journal» – ежеквартальный журнал теоретических и прикладных исследований в области машиностроения, энергетики и металлургии. С 1997 по 2021 год журнал выходил под названием «Вестник Иркутского государственного технического университета».

Периодичность издания - **ежеквартально. Языки – русский и английский.**

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор): Регистрационный номер: **ПИ № ФС 77–82388 от 10 декабря 2021 г.**

(Ранее действовавшие Свидетельства:

И № 0327 от 19 сентября 1997 г.; ПИ № 77-13046 от 15 июля 2002 г.;

ПИ № ФС77- 42847 от 26 ноября 2010 г.,

ПИ № ФС77-47902 от 22 декабря 2011 г.;

ПИ № ФС77-62813 от 18 августа 2015 г.).

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО ИРНИТУ).
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Издательство:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А

Адрес редакции:

664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
e-mail: pgp@istu.edu

SCHOLARLY JOURNAL

"iPolytech Journal" is a quarterly academic journal publishing theoretical and applied research papers in mechanical engineering, energy and metallurgy. From 1997 to 2021 the journal was published under the title "Proceedings of Irkutsk State Technical University" ((Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta). Periodicity: Quarterly

Periodicity: Quarterly Articles are published in Russian and English.

The Journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media: Registration certificate PI No FS77-82388 of 10 December 2021.

(previously valid certificates:

И No 0327 of September 19, 1997; ПИ No77-13046 of July 15, 2002;

ПИ No ФС77- 42847 of November 26, 2010,

ПИ No ФС77-47902 of December 22, 2011;

ПИ No ФС77-62813 of August 18, 2015).

Founder and Publisher:

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education,
Irkutsk National Research Technical University (INRTU)
83, Lermontov St. Irkutsk, 664074, Russian Federation

Publishers:

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
Irkutsk National Research Technical University (INRTU)
83A, Lermontov St. Irkutsk, 664074, Russian Federation

Editorial office:

83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation
e-mail: pgp@istu.edu



Редакционная коллегия

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

СИДОРОВ Д.Н., д. ф.-м. н., профессор, профессор РАН, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН» (Иркутск, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

ЗАЙДЕС С.А., д.т.н., профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Машиностроение» (Иркутск, Россия)

НЕМЧИНОВА Н.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Металлургия» (Иркутск, Россия)

ФЕДОСОВ Д.С., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора по направлению «Энергетика» (Иркутск, Россия)

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

КОРНЯКОВ М.В., д.т.н., ректор Иркутского национального исследовательского технического университета, председатель редакционной коллегии (Иркутск, Россия)

БАЖИН В.Ю., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II (Санкт-Петербург, Россия)

БЛЮМЕНШТЕЙН В.Ю., д. т. н., профессор Кузбасского государственного технического университета (Кемерово, Россия)

БОЛДЫРЕВ А.И., д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения Воронежского государственного технического университета (Воронеж, Россия)

БОРОВИКОВ Ю.С., д.т.н., ректор Новгородского государственного университета имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия)

ГАВЛИК ЮЗЕФ, профессор кафедры технологии производства и автоматизации Краковского технологического университета (Краков, Польша)

ЕРМОЛОВ И.Л., д.т.н., доцент, профессор РАН, заместитель директора по научной работе Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (Москва, Россия)

ЗВЕРОВЩИКОВ А.Е., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Пензенского государственного университета (Пенза, Россия)

ИЛЮШИН П.В., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт энергетических исследований Российской академии наук», Руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики (Москва, Россия)

КИМ Инсу, доцент кафедры электротехники Университета Инха (Инчхон, Южная Корея)

КОЛОСОК И.Н., д.т.н., ведущий научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (Иркутск, Россия)

КРЮКОВ А.В., д.т.н., академик Российской академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженный энергетик Республики Бурятия, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения (Иркутск, Россия)

ЛИХИ Пол, профессор кафедры ветроэнергетики, Университетский колледж Корка, исследователь, Центр морских, климатических и энергетических исследований Ирландского научного фонда MAREI (Корк, Ирландия)

ЛЮ Фанг, профессор Центрального Южного Университета (Чанша, провинция Хунань, Китай)

МАМЯЧЕНКОВ С.В., д.т.н., с.н.с., заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Уральского Федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)

МАРЧУК И. В., д. ф.-м. н., профессор РАН, декан Механико-математического факультета Новосибирского государственного университета (Новосибирск, Россия)

МУКЕШ Кумар Патхак, профессор, заведующий кафедрой электротехники Индийского технологического университета Рурки (Рурки, Индия)

МЫЛМРИН В.А., д. г.-м. н., профессор Федерального университета штата Парана (Куриitiba, Бразилия)

ОГАР П.М., д.т.н., профессор, профессор кафедры подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования Братского государственного университета (Братск, Россия)

ПАЗДЕРИН А.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электрических систем Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)

ПАНТЕЛЕЕВ В.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрических комплексов и систем Сибирского федерального университета (Красноярск, Россия)

РАШИДИ Мохаммад Мехди, доктор, профессор Университета Тунцзи (Шанхай, Китай)

СЕНДЕРОВ С.М., д.т.н., заместитель директора Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (Иркутск, Россия)

СТЕННИКОВ В.А., академик РАН, д.т.н., профессор, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (Иркутск, Россия)

СТРИЖАК П.А., д.ф.-м. н., профессор, заведующий Лабораторией тепломассопереноса Томского политехнического университета (Томск, Россия)

СТЫЧИНСКИ З.А., профессор Университета Отто-фон-Герике (Магдебург, Германия)

СУНЬ Хуалин, профессор Цзянсуского университета (Чженьцзян, Китай)

СУСЛОВ К.В., д.т.н., профессор Национального исследовательского университета «МЭИ» (Москва, Россия)

СЮЭМЭЙ Чжен, профессор кафедры электротехники Харбинского технологического университета (Харбин, Китай)

ФИШОВ А.Г., д.т.н., профессор Новосибирского государственного технического университета (Новосибирск, Россия)

ХЕЙФЕЦ М.Л., д.т.н., директор Государственного научного учреждения «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь)

ЦЗИЧЖУН Чжу, доктор философии, профессор факультета электроэнергетики Южно-Китайского технологического университета (Гуанчжоу, Китай)

ШОЛЬТЕС Бертольд, директор Института металловедения Кассельского университета (Кассель, Германия)

Editorial Board

CHIEF EDITOR:

Denis N. SIDOROV, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Full Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

DEPUTIES OF CHIEF EDITOR:

Semen A. ZAIDES, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Professor of the Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief in Mechanical engineering (Irkutsk, Russia)

Nina V. NEMCHINOVA, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Department of Nonferrous Metallurgy, Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief Metallurgy (Irkutsk, Russia)

Denis S. FEDOSOV, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Power Plants, Networks and Systems at Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor-in-Chief in Energy Sciences (Irkutsk, Russia)

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Mikhail V. KORNIKOV, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University, chairman of the editorial board (Irkutsk, Russia)

Vladimir Yu. BAZHIN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgy, Saint Petersburg Mining University named after the Empress Catherine II (Saint Petersburg, Russia)

Valery Yu. BLUMENSTEIN, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Kuzbass State Technical University (Kemerovo, Russia)

Aleksander I. BOLDYREV, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)

Yury S. BOROVNIKOV, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Novgorod State University n.a. Yaroslav-the-Wise (Veliky Novgorod, Russia)

Josef GAVLIK, Full Professor, Department of Production Technology and Automation, Krakow University of Technology (Krakow, Poland)

Ivan L. ERMOLOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Alexander E. ZVEROVSHIKOV, Dr.Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Mechanical engineering Technology Department Penza State University (Penza, Russia)

Pavel V. ILYUSHIN, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Chief Researcher, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Head of the Center for Intelligent Electric Power Systems and Distributed Energy (Moscow, Russia)

Insu KIM, Associate Professor of Electrical Engineering at Inha University (Incheon, South Korea)

Irina N. KOLOSOK, Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

Andrey V. KRYUKOV, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Academy of Sciences, Higher School of the Russian Federation and the Russian Academy of Engineering, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Advanced Professor, Department of Transport Electric Power Industry, Irkutsk State Railway University (Irkutsk, Russia)

Paul LEAHY, Professor at University College Cork (Department of Wind Power); Funded Investigator in the Science Foundation Ireland MAREI Centre for Marine, Climate and Energy research (Cork, Ireland)

Fang LIU, Professor, Central Southern University (Changsha, Hunan Province, China)

Sergey V. MAMYACHENKOV, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Department of Nonferrous Metallurgy, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg, Russia)

Igor V. MARCHUK, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Director of the Mechanics and Mathematics Department, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russia)

Pathak Kumar MUKESH, Full Professor, Head of Department of Indian Institute of Technology Roorkee (Roorkee, India)

Vsevolod A. MYMRIN, Dr. Sci. (Geology), Professor, Federal University of Parana (Curitiba, Brazil)

Pyotr M. OGAR, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Bratsk State University (Bratsk, Russia)

Andrey V. PAZDERIN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Electric Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

Vasily I. PANTELEEV, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Head of the Department of Electrical Systems, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

Mohammad Mehdi RASHIDI, Professor Tongji University, (China)

Sergey M. SENDEROV, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

Valery A. STENNIKOV, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Director, Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

Pavel A. STRIZHAK, Dr. Sci (Physics and Mathematics), Full Professor, Head of Heat and Power Process Automation Department Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia).

Zbigniew A. STYCZYNSKI, Professor, Otto-von-Guericke University (Magdeburg, Germany)

Huaping SUN, Professor, Jiangsu University (Zhenjiang, China)

Konstantin V. SUSLOV, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (Moscow, Russia)

Xuemei ZHENG, Professor of the Department of Electrical Engineering of Harbin University of Technology (Harbin, China)

Aleksander G. FISHOV, Dr. Sci. (Eng.), Full Professor, Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia)

Mikhail L. KHEIFETS, Dr. Sci. (Eng.), Director, Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Zhu JIZHONG, PhD., Professor School of Electric Power Engineering South China University of Technology (Guangzhou, China)

Berholt SCHOLTES, Director, Institute of Metal Science, University of Kassel (Kassel, Germany)



Содержание

Машиностроение

- Иванова А.В., Зеленина А.В., Гилета В.П.** Влияния исходной микрогеометрии на качество поверхности деталей из алюминиевого сплава АМг6 после ультразвукового поверхностного пластического деформирования 308
- Левин Д.Ю., Подшибякин М.Е., Рябинина О.А., Болдырев А.И.** Экспериментальное исследование различных способов постобработки пластиковых деталей, изготовленных методом 3D-печати 322
- Панова И.М., Сеницына Ю.В.** Повышение надёжности подшипника скольжения с керамической вкладкой 336
- Сысоев О.Е., Мокрицкий Б.Я., Космынин А.В., Сысоев Е.О.** Исследование возможностей концевых монолитных твёрдосплавных фрез для обработки заготовок деталей, имеющих градиент твёрдости 345

Энергетика

- Алиходжина Н.В., Титов Д.А., Тягунов М.Г.** Методика приведения исходных данных по ветроизмерениям к однородным в условиях местности со сложным рельефом 353
- Жилин Е.В., Лёвин Д.Д.** Анализ эффективности относительных методов поиска повреждений кабельных линий (на англ. яз.) 363

Металлургия

- Алейников С.А., Белоусова Н.В.** Сорбционное извлечение лития из рассола 376
- Бывальцев А.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И., Богородский Е.В., Гончарук М.А.** Усовершенствованная методика рационального анализа золота в углистом сорбционно-активном минеральном сырье 389
- Косовцева Т.Р., Сизякова Е.В., Слободин В.А.** Разработка программного обеспечения для балансовых расчётов переработки ильменитовых концентратов 399
- Немчинова Н.В., Ткач Е.А., Тютрин А.А., Бельский С.С.** Влияние состава анодной массы самообжигающегося анода на показатели электролитического получения алюминия 412

Content

Mechanical engineering

- Ivanova A.V., Zelenina A.V., Gileta V.P.** Effects of original microgeometry on the surface quality of AMg6 aluminum alloy parts following ultrasonic surface plastic straining 308
- Levin D.Yu., Podshibyakin M.E., Riabinina O.A., Boldyrev A.I.** Experimental study of different methods for post-processing plastic parts manufactured by 3D printing..... 322
- Panova I.M., Sinitsyna Yu.V.** Improving the reliability of a ceramic plain bearing..... 336
- Sysoev O.E., Mokritskii B.Ya., Kosmynin A.V., Sysoev E.O.** Study of solid carbide end mills for machining workpieces with hardness gradient..... 345

Power engineering

- Alikhodzhina N.V., Titov D.A., Tyagunov M.G.** Method for normalizing initial data of wind measurements in complex terrain areas 353
- Zhilin E.V., Levin D.D.** Analysis of the effectiveness of relative methods for power cable fault detection..... 363

Metallurgy

- Aleynikov S.A., Belousova N.V.** Lithium sorption from natural brine 376
- Byvaltsev A.V., Khmel'nitskaya O.D., Voiloshnikov G.I., Bogorodskiy E.V., Goncharuk M.A.** Improved gold diagnostic leaching procedure for carbonaceous preg-robbing ores 389
- Kosovtseva T.R., Sizyakova E.V., Slobodin V.A.** Software development for balance calculations of ilmenite concentrate processing 399
- Nemchinova N.V., Tkach E.A., Tyutrin A.A., Belskii S.S.** Effect of the anode paste composition of a self-baking anode on the performance of electrolytic aluminum production 412



Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию выпуск научного журнала «iPolytech Journal». Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Министерства науки и высшего образования РФ (**Категория К-1**), в Единый государственный перечень научных изданий «Белый список» (**Уровень 2**).

«iPolytech Journal» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН. Каждой статье присваивается цифровой идентификатор **DOI**.

«iPolytech Journal» реферируется и рецензируется

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- **Машиностроение**

- 2.5.2. Машиноведение
- 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки
- 2.5.6. Технология машиностроения

- **Энергетика**

- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы
- 2.4.3. Электроэнергетика
- 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

- **Металлургия**

- 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов

Dear Readers!

We would like to bring to your attention the issue of the scientific journal "iPolytech Journal".

The journal is included in the list of the leading scientific journals and publications, where the key scientific results of doctoral (candidate's) theses approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Ministry of Education are to be published, is included to the Unified State List of Scientific publications - the "White List" (Level 2).

"iPolytech Journal" is included in the "UlrichsPeriodicals Directory", iPolytech Journal EBSCO database, Scientific electronic library (eLIBRARY.RU). It is presented in the e-library «Cyberleninka», University OXFORD, Scientific Indexing Services (SIS), Directory of Open Access Journals (DOAJ). It is sent to the Russian Book Chamber and All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI) RAS. Each article is assigned a digital indicator **DOI**.

The journal "iPolytech Journal" is abstracted and reviewed

You are welcome for active and creative collaboration
in the following fields:

- **Mechanical Engineering**

- 2.5.2. Mechanical engineering (engineering sciences)
- 2.5.5. Technology and equipment for mechanical and physical and technical machining (engineering sciences)
- 2.5.6. Engineering technology (technical sciences)

- **Power Engineering**

- 2.4.2. Electrotechnical equipment and systems (engineering sciences)
- 2.4.3. Electric power industry (engineering sciences)
- 2.4.5. Energy systems and complexes (engineering sciences)

- **Metallurgy**

- 2.6.2. Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals (engineering sciences)

Editorial Board



Влияния исходной микрогеометрии на качество поверхности деталей из алюминиевого сплава АМг6 после ультразвукового поверхностного пластического деформирования

А.В. Иванова^{1✉}, А.В. Зеленина², В.П. Гилета³

¹⁻³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Резюме. Цель – изучение влияния исходной микрогеометрии поверхности и количества проходов индентора на микротвердость и шероховатость поверхностного слоя изделий после ультразвукового поверхностного пластического деформирования. Исследование проводилось на цилиндрических образцах из алюминиевого сплава АМг6. Обработка осуществлялась методом ультразвукового поверхностного пластического деформирования по тангенциальной схеме ввода ультразвуковых колебаний и при изменении количества проходов индентора от 1 до 5. Диапазон исходной шероховатости алюминиевых образцов – от $Ra\ 0,44$ до $Ra\ 3$ мкм. Оценка качества обработанной ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием поверхности осуществлялась на основе измерения параметров шероховатости и микротвердости. Экспериментально установлено, что для выбранного диапазона исходной шероховатости поверхности показатели шероховатости и микротвердости образцов достигают стабильных значений после 1-2 проходов ультразвуковой обработки. Показано, что эффективность ультразвукового поверхностного пластического деформирования деталей из алюминиевого сплава АМг6 в значительной степени определяется микрогеометрическими и физико-механическими характеристиками исходной поверхности и количеством циклов обработки, при этом наблюдается существенное снижение параметров шероховатости и прирост микротвердости в сочетании с формированием специфической ячеистой микрогеометрии поверхности. Установлено, что увеличение количества проходов (более 1-2) не является эффективным способом дальнейшего улучшения качества поверхностного слоя. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологических процессов в машиностроительной, авиационной, автомобильной и других отраслях промышленности, рационализации подбора финишных операций, обеспечения современных требований к качеству обработанной поверхности деталей из алюминиевых сплавов, что позволит повысить экономическую эффективность производства.

Ключевые слова: ультразвуковое упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, качество поверхности, шероховатость, микротвердость

Для цитирования: Иванова А.В., Зеленина А.В., Гилета В.П. Влияния исходной микрогеометрии на качество поверхности деталей из алюминиевого сплава АМг6 после ультразвукового поверхностного пластического деформирования // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 308–321. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-308-321>. EDN: ZGFVII.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Effects of original microgeometry on the surface quality of AMg6 aluminum alloy parts following ultrasonic surface plastic straining

Alina V. Ivanova^{1✉}, Anna V. Zelenina², Viktor P. Gileta³

¹⁻³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract. We study the effect of original surface microgeometry and the number of indenter passes on the microhardness and roughness of the surface layer of products treated by ultrasonic surface plastic straining. The study was conducted using cylindrical specimens made of AMg6 aluminum alloy. Ultrasonic surface plastic straining was performed according to a tangential input of ultrasonic vibrations for the number of indenter passes varying from 1 to 5. The original roughness of aluminum specimens ranged from $Ra\ 0.44$ to $Ra\ 3\ \mu m$. The quality of the surface treated by ultrasonic surface plastic straining was assessed based on roughness and microhardness parameters.

For the selected range of original surface roughness, the roughness and microhardness of the specimens reached stable values after 1-2 interender passes. The efficiency of ultrasonic surface plastic straining for products made of AMg6 aluminum alloy is largely determined by the microgeometric and physicomachanical characteristics of the original surface, as well as by the number of processing cycles. Thus, a significant decrease in roughness and increase in microhardness were observed in the formed specific cellular microgeometry of the surface. Increasing the number of passes above 1-2 appears ineffective in terms of further improving the quality of the surface layer. The obtained results can be used to optimize technological processes in mechanical engineering, aviation, automobile, and other industries, optimize the selection of finishing operations, ensure contemporary quality requirements for the processed surface of aluminum alloy products, and increase the economic efficiency of production.

Keywords: ultrasonic hardening, surface plastic deformation, surface quality, roughness, microhardness

For citation: Ivanova A.V., Zelenina A.V., Gileta V.P. Effects of original microgeometry on the surface quality of AMg6 aluminum alloy parts following ultrasonic surface plastic straining. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):308-321. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-308-321>. EDN: ZGFVII.

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование (УЗППД) начинает широко применяться наряду с традиционными методами поверхностного пластического деформирования (ППД), такими как выглаживание и обкатывание [1–10]. Существует множество научных исследований, подтверждающих улучшение параметров качества поверхностного слоя деталей после обработки УЗППД. Наличие колебаний индентора изменяет условия его контактирования с обрабатываемой деталью, обуславливает другой характер напряженно-деформированного состояния материала в очаге деформации и благоприятно влияет на качество поверхности [11–27]. Улучшение микрогеометрических и физико-механических характеристик качества поверхностного слоя после УЗППД позволяет повышать износостойкость, контактную выносливость, усталостную прочность [7, 12–15, 17, 19, 20, 24–27]. Эффективность применения такого перспективного метода финишной обработки, как УЗППД, напрямую зависит не только от режимных параметров, но и от исходного качества поверхностного слоя обрабатываемой детали [12, 14, 15, 17–19, 20–25].

Исследование влияния исходной шероховатости на получаемые после обработки параметры качества поверхностного слоя является важным для оптимизации процесса финишной обработки детали методом УЗППД, а также выбора стратегии подготовки поверхности перед этой обработкой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на цилиндрических образцах диаметром 50 мм, изготовленных из алюминиевого сплава АМг6, который широко используется в ракетостроении, авиа- и автомобилестроении благодаря низкой плотности и высокой коррозионной стойкости. При этом термическое упрочнение сплава АМг6 считается незначительным, ввиду чего данный сплав классифицируют как не упрочняемый термической обработкой. Поверхность образцов перед УЗППД обрабатывалась точением с различными подачами. В работе использовалось пять серий образцов, отличающихся исходной шероховатостью (табл. 1). Исходная микротвердость образцов до точения составляла 116 HV₅₀, микротвердость образцов после точения представлена в табл. 1.

Выбор диапазона исходной шероховатости обусловлен необходимостью изучения влияния УЗППД на свойства поверхности, полученные при различных режимах предшествующей механической обработки – от черновой до тонкой, что соответствует различным стратегиям получения необходимой точности. Этот подход дает возможность оценить эффективность УЗППД в широком диапазоне технологических стратегий подготовки поверхности и позволяет выявить закономерности изменения морфологии, микротвердости и шероховатости в зависимости от исходного микрогеометрического и физико-ме-

Таблица 1. Исходное значение шероховатости и микротвердости поверхности образцов

Table 1. Base value of sample surface roughness and microhardness

№ серии образцов	1	2	3	4	5
Исходная шероховатость, Ra, мкм	0,44	1,23	1,99	2,34	3,00
Исходная микротвердость, МПа	130	123	125	124	121

ханического состояния поверхности, а также определить оптимальные режимы УЗППД для различных типов предварительной обработки.

Обработка проводилась по тангенциальной схеме ввода ультразвуковых колебаний (рис. 1), при которой вектор колебательной скорости индентора V_k располагался коллинеарно и компланарно вектору скорости обработки V_d , а статическое усилие P , прилагаемое к индентору, направлялось по нормали к оси обрабатываемой детали.

Материал индентора – поликристаллический синтетический алмаз с рабочей частью в форме сферы радиусом 3,5 мм.

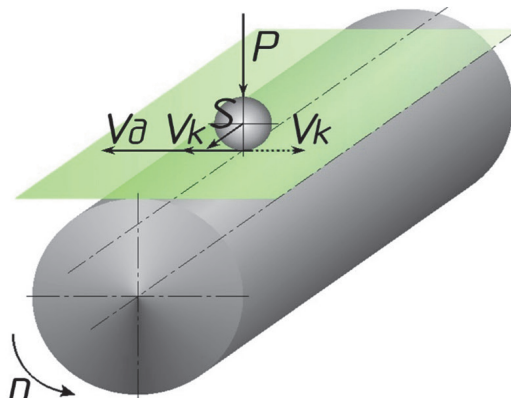


Рис. 1. Тангенциальная схема ультразвукового поверхностного пластического деформирования

Fig. 1. Tangential scheme of ultrasonic surface plastic deformation

УЗППД осуществлялось на токарном станке 250ИТВМ.01, оснащённом специальным приспособлением, обеспечивающем совпадение линии действия вектора колебательной скорости индентора V_k и вектора скорости детали V_d . Источником механических колебаний ультразвуковой частоты служил магнитострикционный преобразователь, подсоединённый к генератору IL10. Усилителем механических колебаний служила стержневая волноводная система.

Количество проходов варьировалось от 1 до 5 при постоянных скоростях обработки $V_d = 59$ м/мин, подаче $S = 0,107$ мм/об и статической нагрузке $P = 50$ Н. Частота колебаний $f = 19600$ Гц, амплитуда $A = 13$ мкм.

Параметры шероховатости после проведенных обработок контролировались с помощью контактного профилометра MarSurf PS. Морфология поверхности оценивалась на интерференционном микроскопе белого света Zygo NewView 7300.

Степень изменения шероховатости ΔRa оценивалось по формуле:

$$\Delta Ra = \frac{Ra_{исх}}{Ra},$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля обработанной поверхности; $Ra_{исх}$ – исходное среднее арифметическое отклонение профиля.

Микротвердость определялась на микротвердомере ПМТ-ЗМ. Исследование проводилось по методу Виккерса согласно ГОСТ 9450–76⁴. Нагрузка на пирамиду составляла 0,5 Н.

Расчет микротвердости поверхности осуществлялся по формуле:

$$H = 0,189 \frac{P_1}{d_2^2} \cdot 10^2,$$

где P_1 – нагрузка на пирамиду, Н; d_2 – среднеарифметическое длин двух диагоналей отпечатка пирамиды, мм.

⁴ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Введ. 01.01.1977 (изм. в сентябре 1981 г., октябре 1991 г.). М.: Изд-во стандартов, 1992.

Помимо определения микротвердости проводилась оценка степени упрочнения ΔH по формуле:

$$\Delta H = \frac{H - H_{исх}}{H_{исх}} \cdot 100\%$$

где H – микротвердость обработанной поверхности, МПа; $H_{исх}$ – исходная микротвердость, МПа.

Для обеспечения достоверности полученных результатов измерения параметров поверхности проводились не менее 10 раз на каждом исследуемом участке обработанной поверхности, после чего результаты выборки проходили проверку на наличие подозрительных, выпадающих значений, которые исключались из выборок. За действительное значение величины принималось среднее арифметическое после исключений выпадающих значений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 2 представлена морфология поверхности образцов 1 и 5 серий после обработки УЗППД.

Анализ изображений на рис. 2 показывает, что уже после первого прохода происходит сглаживание крупных неровностей, оставшихся после точения, и уменьшение количества исходных микродефектов. Отчетливо прослеживается характерная для УЗППД ячеистая структура поверхности. Видно, что дальнейшее увеличение числа проходов оказывает незначительное влияние на изменение морфологии поверхности. С увеличением количества проходов площадь необработанной УЗППД поверхности постепенно уменьшается, а микрорельеф становится более равномерным и однородным. Формирование ячеистой структуры с малыми размерами ячеек характерно только для УЗППД и обусловлено особенностями кинематики и динамики этого процесса. При УЗППД вектор результирующей скорости $V_{рез}$ перемещения индентора относительно детали

$$\overline{V_{рез}} = \overline{V_{\delta}} + \overline{V_{\kappa}} + \overline{V_S}.$$

Для рассматриваемой в работе схемы УЗППД скалярная величина результирующей скорости

$$V_{рез} = \sqrt{(V_{\delta} + V_{\kappa})^2 + V_S^2},$$

где V_{κ} – колебательная скорость индентора, м/мин; V_{δ} – скорость детали, м/мин; V_S – скорость подачи, мм/мин.

Скорость детали

$$V_{\delta} = \frac{\pi n D}{1000},$$

где n – число оборотов образца, об/мин; D – диаметр обрабатываемого образца, мм.

Скорость минутной подачи

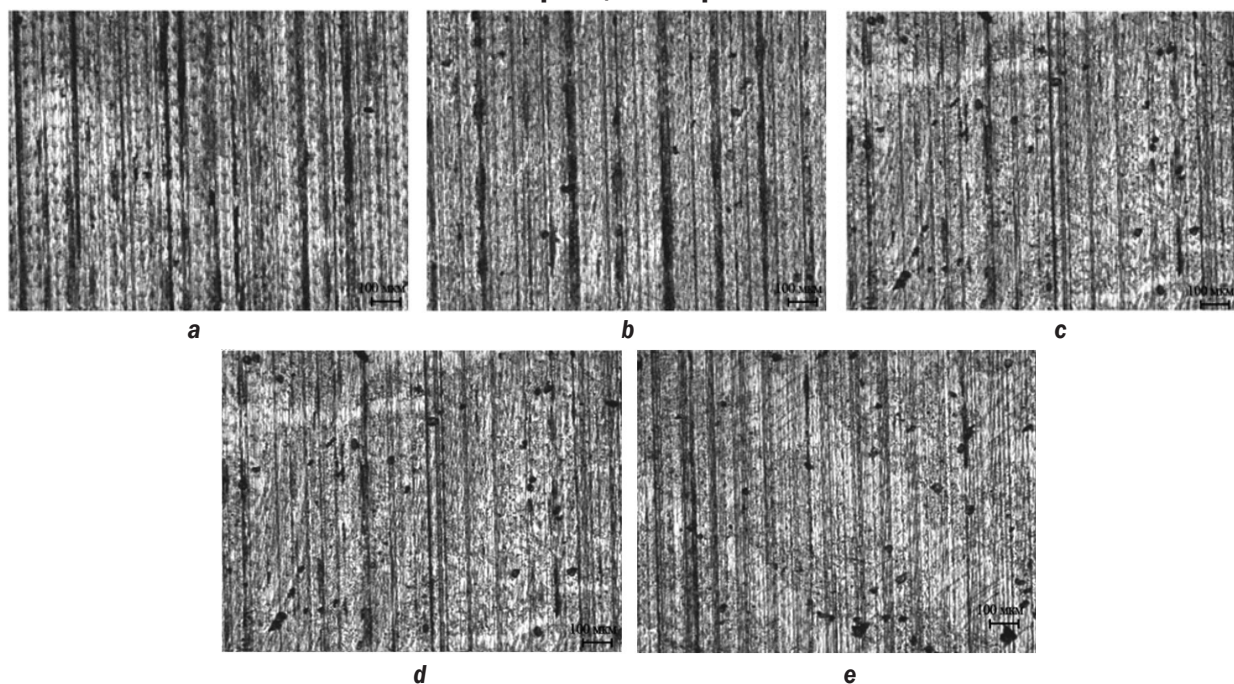
$$V_S = S n,$$

где S – подача, мм/об.

При гармоническом характере ультразвуковых колебаний, описываемом уравнением:

$$A(t) = A_0 \sin(\omega t) = A_0 \sin(2\pi f t).$$

Образцы 1 серии



Образцы 5 серии

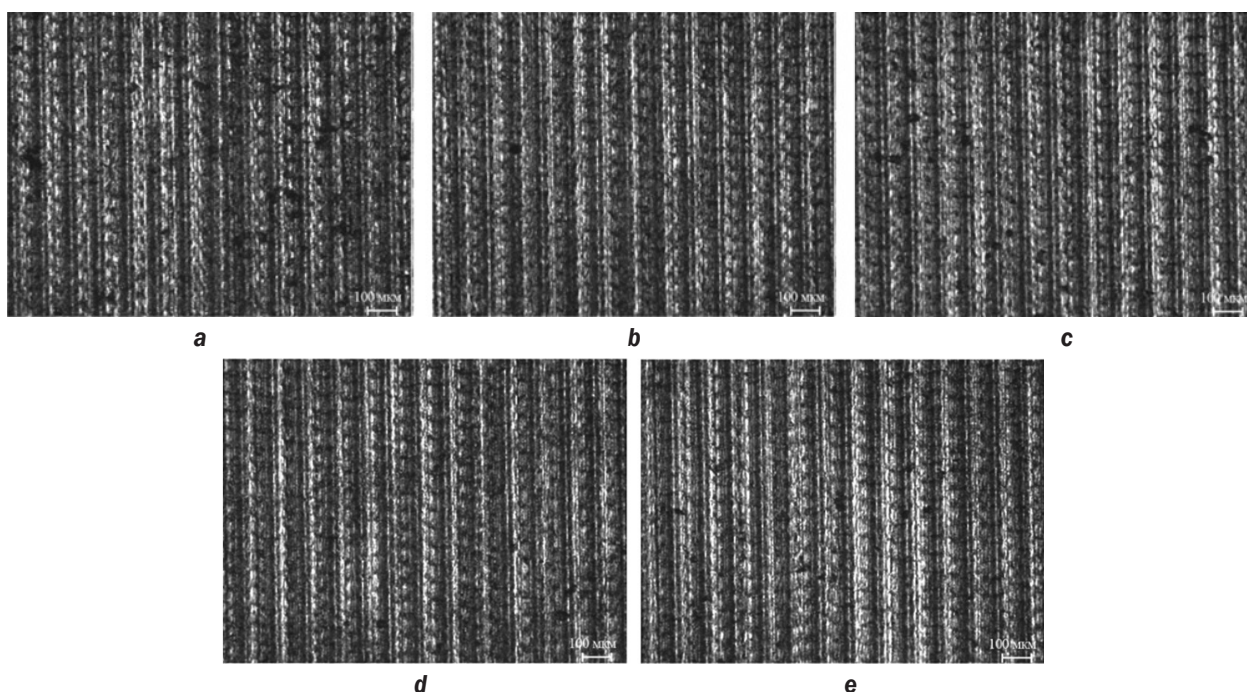


Рис. 2. Морфология обработанных образцов после ультразвукового поверхностного пластического деформирования (a – 1 проход, b – 2 прохода, c – 3 прохода, d – 4 прохода, e – 5 проходов): образцы 1 серии – исходная шероховатость $Ra = 0,44 \text{ мкм}$; образцы 5 серии – исходная шероховатость $Ra = 3,00 \text{ мкм}$

Fig. 2. Morphology of processed samples after ultrasonic surface plastic deformation (a – 1 pass, b – 2 passes, c – 3 passes, d – 4 passes, e – 5 passes): 1st series samples – base roughness of $Ra = 0.44 \text{ }\mu\text{m}$; 5th series samples – base roughness of $Ra = 3.00 \text{ }\mu\text{m}$

Колебательная скорость индентора

$$V_{\kappa}(t) = \frac{dA(t)}{dt} = 2\pi f A_0 \cos(2\pi f t),$$

где A_0 – амплитуда колебаний, мкм; ω – круговая частота колебаний, рад/с; f – частота колебаний, с⁻¹; t – время, с.

Тогда с учетом размерностей величина результирующей скорости определяется следующим выражением:

$$V_{рез} = \sqrt{\left(\frac{Sn}{60 \cdot 1000}\right)^2 + \left(\frac{\pi n D}{1000} + 2\pi f \cdot 60 \cdot A_0 \cdot 10^{-6} \cdot \cos(2\pi ft)\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{Sn}{6 \cdot 10^4}\right)^2 + \left(\frac{\pi n D}{1000} + 12\pi f A_0 \cdot 10^{-5} \cdot \cos(2\pi ft)\right)^2},$$

так как величина $\left(\frac{Sn}{6 \cdot 10^4}\right)^2$ незначительна по сравнению с остальной частью выражения.

Результирующую скорость перемещения индентора относительно детали можно описывать следующим уравнением:

$$V_{рез} = \frac{\pi n D}{1000} + 12\pi f A_0 \cdot 10^{-5} \cdot \cos(2\pi ft).$$

Как видно из этого уравнения, результирующая скорость индентора относительно поверхности детали не является величиной постоянной, а изменяется по гармоническому закону с периодом колебаний $T = \frac{1}{f}$.

Графическая зависимость $V_{рез}$ от времени для применяемых в исследовании режимов обработки представлена на рис. 3.

Из графика зависимости видно, что для выбранных режимов УЗПД результирующая скорость обработки имеет широкий диапазон изменения от -2,02 до 134,46 м/мин и за период колебаний имеет место два противоположных направления выглаживания (изменение направления перемещения индентора относительно обрабатываемой заготовки на противоположное), что и обуславливает формирование специфического микрогеометрического и физико-механического состояния поверхности.

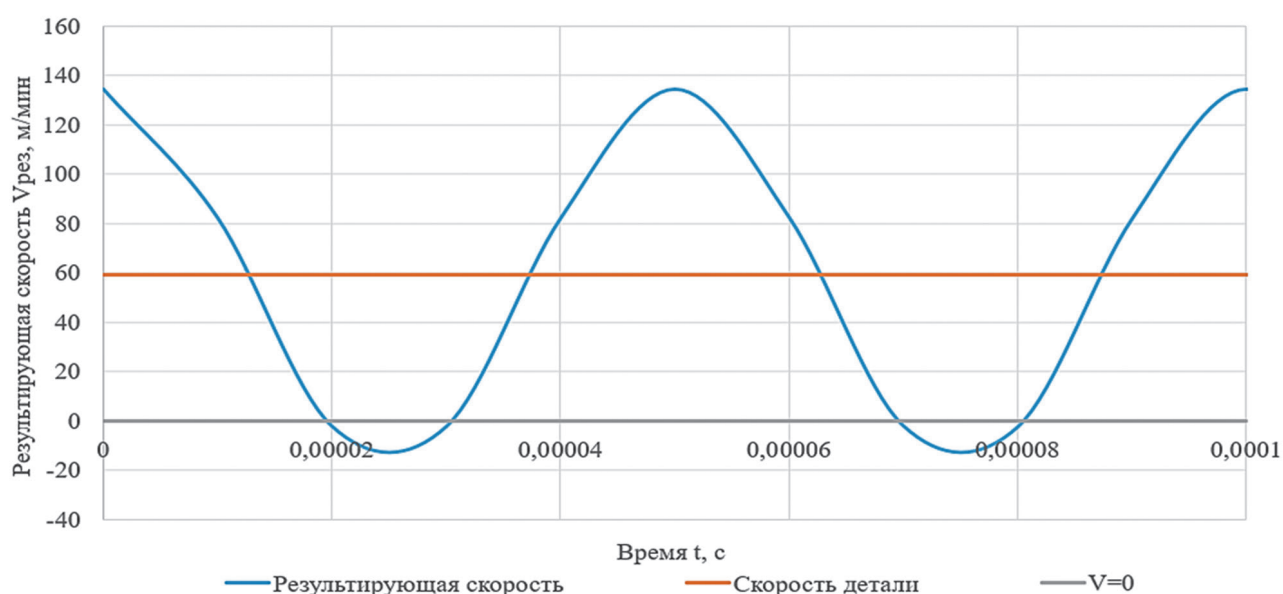


Рис. 3. Изменение результирующей скорости обработки при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании
Fig. 3. Resultant processing velocity variation during ultrasonic surface plastic deformation

Независимо от значения исходной шероховатости поверхности, УЗППД позволяет достичь существенного снижения значения параметра шероховатости Ra . Максимальное снижение среднего арифметического отклонения профиля наблюдается после первого прохода (рис. 4). С ростом количества проходов значение параметра Ra обработанной поверхности существенно не уменьшается. В рассматриваемом диапазоне исходных высот неровностей эффективнее всего значение параметра Ra уменьшается для линий, соответствующих большим значениям исходной шероховатости поверхности. Это подтверждает интенсификацию процесса пластического течения материала поверхности при сообщении индентору ультразвуковых колебаний [8, 15,16, 22–24, 26, 27].

На графиках (рис. 5, 6) представлены зависимости среднего шага неровностей профиля Sm и наибольшей высоты профиля Rz от количества проходов для исследуемых серий образцов с различной исходной шероховатостью поверхности.

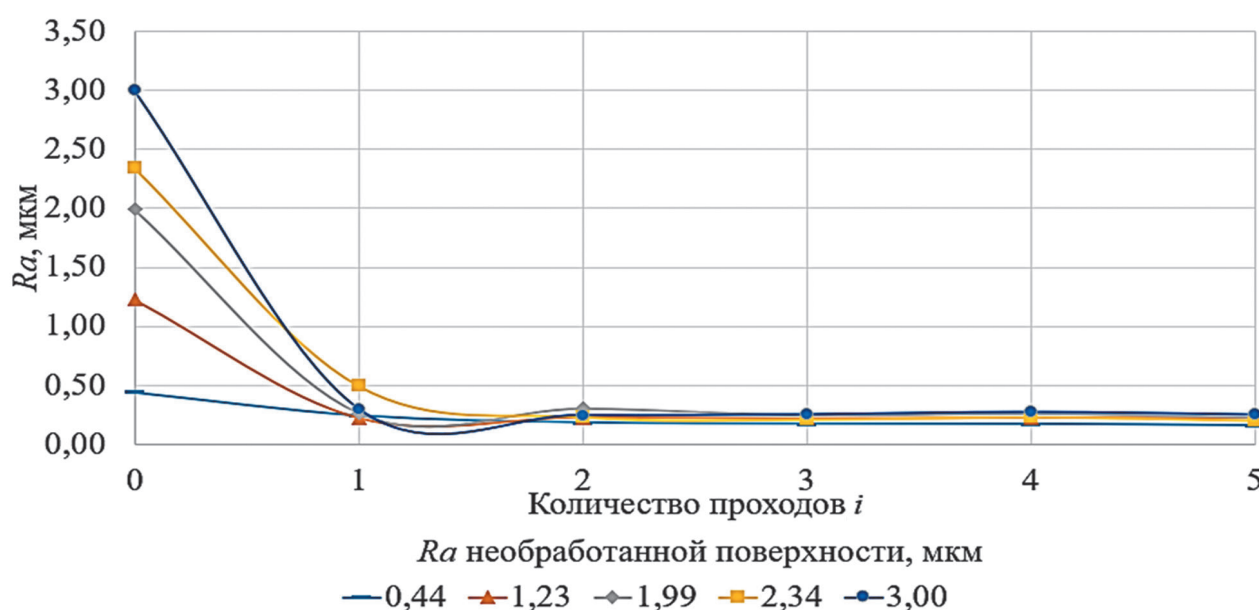


Рис. 4. Изменение шероховатости после ультразвукового поверхностного пластического деформирования в зависимости от количества проходов индентора

Fig. 4. Roughness variation after ultrasonic surface plastic deformation as a function of the number of indenter passes

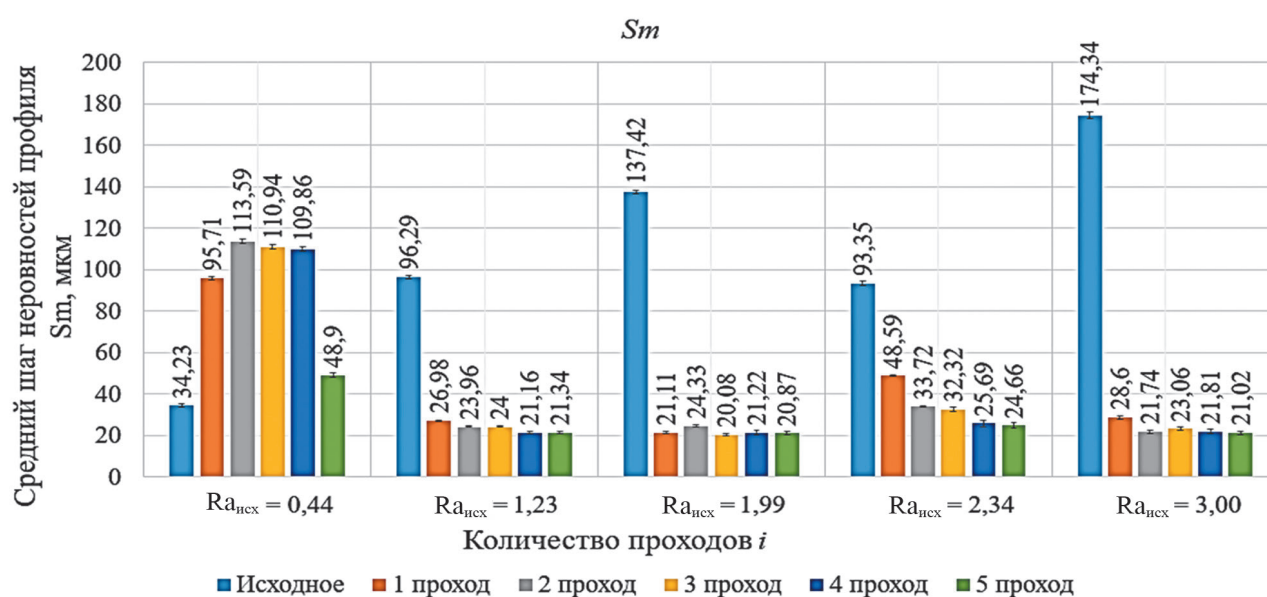


Рис. 5. Зависимость среднего шага неровностей профиля Sm от количества проходов

Fig. 5. Mean spacing of profile irregularities Sm vs the number of passes

Из графика на рис. 5 видно, что в исходном состоянии значения Sm значительно отличаются друг от друга, что обусловлено различной исходной шероховатостью поверхностей. В общем случае после первого прохода наблюдается резкое снижение среднего шага неровностей Sm , что объясняется активным сглаживанием поверхности за счет пластической деформации, приводящей к уменьшению высоты и шага микронеровностей. Однако при самой низкой исходной шероховатости ($Ra = 0,44$ мкм) происходит увеличение Sm , а затем его стабилизация. На начальном этапе обработки (при первом проходе индентора) происходит интенсивная пластическая деформация поверхностного слоя материала. В результате этого процесса мелкие неровности исходной поверхности с низкой шероховатостью сглаживаются, а металл активно перераспределяется. Это перераспределение приводит к увеличению среднего расстояния между неровностями Sm , так как мелкие неровности устраняются, а более крупные (относительно исходного состояния) становятся выраженными.

С ростом числа проходов наблюдается стабилизация значений Sm , что связано с достижением предела пластичности материала и завершением его перераспределения в поверхностном слое образцов. Дальнейшее уменьшение среднего шага неровностей становится незначительным, так как материал уже подвергся предельному упрочнению, и дальнейшее воздействие не изменяет микрорельеф поверхности.

График на рис. 6 показывает изменение наибольшей высоты профиля в зависимости от количества проходов. В исходном состоянии шероховатость поверхности характеризуется более высоким значением Rz . После 1–2 проходов наблюдается значительное снижение Rz , что объясняется интенсификацией процессов пластической деформации, в результате которой происходит существенное сглаживание выступов и уменьшение глубины микровпадин исходного профиля. Дальнейшее увеличение количества проходов приводит к менее эффективному снижению, что связано с достижением предела пластической деформации поверхности.

При этом для образцов с высокой исходной шероховатостью эффект снижения наиболее заметен, так как в начальной стадии УЗППД (1–2 проход) крупные микронеровности подвергаются наиболее интенсивному сглаживанию. После этого процесс стабилизируется, поскольку дальнейшее снижение шероховатости ограничено физико-механическими характеристиками материала.

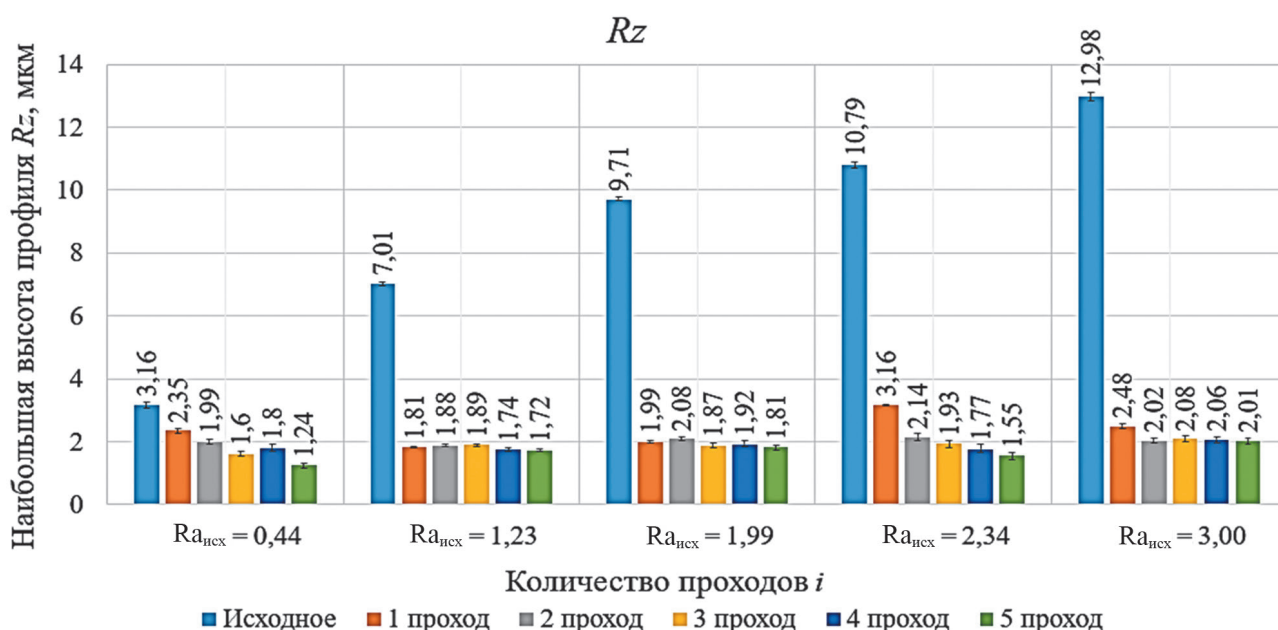


Рис. 6. Зависимость наибольшей высоты профиля Rz от количества проходов индентора после ультразвукового поверхностного пластического деформирования

Fig. 6. Maximum profile height Rz vs the number of indenter passes after ultrasonic surface plastic deformation

В табл. 2 представлены значения параметра Ra и степени изменения шероховатости в зависимости от исходной и количества проходов после УЗППД.

Исходя из данных табл. 2, можно сказать, что чем выше исходное значение $Ra_{исх}$ необработанной поверхности, тем сильнее эффект УЗППД, то есть выше степень снижения ΔRa . Для используемого в исследовании диапазона исходных шероховатостей и режимов обработки максимальная степень снижения достигает 12 раз (для исходной шероховатости $Ra_{исх} = 3$ мкм). Рациональное количество числа проходов – 1–2, так как дальнейшее увеличение их числа не приводит к существенному снижению шероховатости по параметру Ra .

Изменение микротвердости поверхности после обработки УЗППД показано на рис. 7.

Как видно из графика, количество проходов также оказывает влияние и на микротвердость поверхностного слоя образцов, обработанных методом УЗППД изделий. Наибольший градиент роста микротвердости наблюдается после первого прохода. В общем случае, с учетом доверительных интервалов, достижение наибольшего значения микротвердости происходит после 2–3 проходов, при этом видно, что для линии, соответствующей самой гладкой исходной поверхности, максимальное значение микротвердости достигается после 2 прохода, а для более высоких исходных значений шероховатости – после 3 прохода, после чего происходит ее незначительное снижение и последующая стабилизация.

Таблица 2. Зависимость степени изменения шероховатости ΔRa от числа проходов индентора

Table 2. Dependence of the roughness variation degree ΔRa on the number of indenter passes

Кол-во проходов i	Ra , мкм									
	Номер серии образцов									
	1		2		3		4		5	
	$Ra_{исх} = 0,44$	ΔRa	$Ra_{исх} = 1,23$	ΔRa	$Ra_{исх} = 1,99$	ΔRa	$Ra_{исх} = 2,34$	ΔRa	$Ra_{исх} = 3,00$	ΔRa
1	0,24	1,83	0,22	5,59	0,27	7,37	0,49	4,78	0,30	10,00
2	0,18	2,44	0,23	5,35	0,30	6,63	0,23	10,17	0,25	12,00
3	0,17	2,59	0,22	5,59	0,25	7,96	0,21	11,14	0,25	12,00
4	0,17	2,59	0,22	5,59	0,26	7,65	0,23	10,17	0,27	11,11
5	0,16	2,75	0,22	5,59	0,23	8,65	0,20	11,70	0,25	12,00

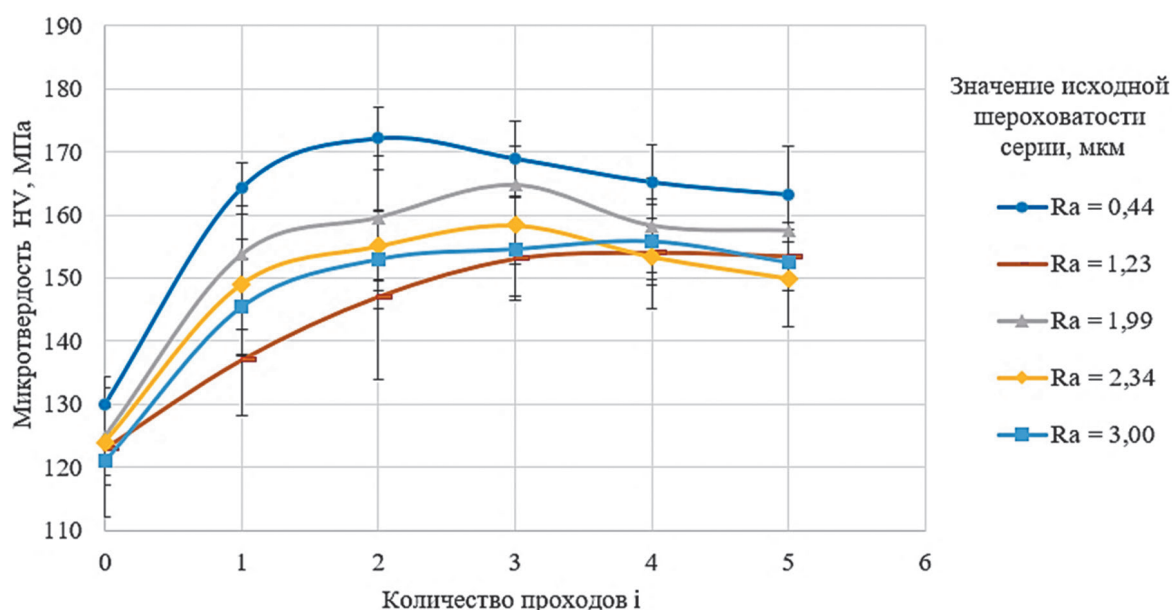


Рис. 7. Зависимость микротвердости поверхности после ультразвукового поверхностного пластического деформирования от исходной шероховатости и количества проходов

Fig. 7. Surface microhardness after ultrasonic surface deformation vs base roughness and number of passes

В табл. 3 представлены данные по изменению степени упрочнения обработанной поверхности после УЗППД в зависимости от исходной шероховатости поверхности и от количества проходов.

Таблица 3. Зависимость микротвердости и прироста микротвердости от количества проходов при различной исходной шероховатости поверхности

Table 3. Dependence of microhardness and microhardness increase on the number of passes with different base surface roughness

Количество проходов i	Микротвердость HV, МПа									
	№ серии образцов									
	1		2		3		4		5	
	$H_{исх} = 130$	$\Delta H(1), \%$	$H_{исх} = 123$	$\Delta H(2), \%$	$H_{исх} = 125$	$\Delta H(3), \%$	$H_{исх} = 124$	$\Delta H(4), \%$	$H_{исх} = 121$	$\Delta H(5), \%$
1	164	26,2	133	8,1	154	23,2	149	20,2	145	19,8
2	172	32,3	141	14,6	160	28,0	155	25,0	153	26,4
3	169	30,0	161	30,9	165	32,0	158	27,4	155	28,1
4	165	26,9	155	26,0	158	26,4	153	23,4	156	28,9
5	163	25,4	153	24,4	158	26,4	150	21,0	153	26,4

Степень упрочнения также зависит от исходного состояния поверхности, которое формируется на предшествующих операциях. С увеличением значения параметра Ra исходной поверхности максимально достигаемое значение микротвердости после обработки методом УЗППД, как правило, снижается. Данную закономерность можно объяснить тем, что микротвердость предварительно подготовленной (методом точения) поверхности с малой шероховатостью выше, что, вероятно, обусловлено проявлением технологической наследственности при подготовке поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы: ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование приводит к значительному снижению шероховатости и увеличению микротвердости поверхности образцов из материала АМг6, что в большинстве случаев может положительно влиять на такие эксплуатационные характеристики изделий, как износостойкость и усталостная прочность.

Исходная шероховатость поверхности оказывает влияние на эффективность УЗППД: с увеличением исходной шероховатости эффективность снижения шероховатости возрастает, то есть чем выше исходное значение Ra необработанной поверхности, тем сильнее эффект УЗППД (выше степень снижения ΔRa).

Оптимальное количество проходов для достижения большей микротвердости и малой шероховатости составляет 1–2, дальнейшее увеличение количества проходов не приводит к значительному снижению шероховатости и росту микротвердости, а в некоторых случаях может ухудшить показатели из-за возникновения явления перенаклепа поверхностного слоя. С учетом исходной шероховатости наиболее целесообразной является коррекция режимов обработки, обеспечивающая наилучшее сочетание параметров качества поверхности, чем осуществление многопроходной обработки.

Учет исходного состояния поверхности позволяет рационализировать процесс обработки и достичь наилучших возможных результатов как по качеству поверхностного слоя, так и по производительности процесса. Полученные результаты могут быть использованы для разработки процесса УЗППД алюминиевых сплавов, при выборе оптимальных параметров упрочнения, а также стратегии проведения предшествующих операций, что позволит более эффективно улучшать качество поверхности и повышать эксплуатационные характеристики изделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кувшинов М.О., Хлыбов А.А. Сравнительный анализ методов поверхностного пластического деформирования (ППД) // Уральская школа молодых металлургов: матер. XVIII Междунар. науч.-техн. Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых (г. Екатеринбург, 21–23 ноября 2017 г.). Екатеринбург: УРФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. С. 37–42. EDN: YRSFDW.
2. Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V., Argirov Ya., Todorov V., et al. Effects of heat treatment and severe surface plastic deformation on mechanical characteristics, fatigue, and wear of Cu-10Al-5Fe bronze // *Materials*. 2022. Vol. 15. Iss. 24. P. 8905. <https://doi.org/10.3390/ma15248905>.
3. Brostow W., Czechowski K., Polowski W., Rusek P., Toboła D., Wronska I. Slide diamond burnishing of tool steels with adhesive coatings and diffusion layers // *Materials Research Innovations*. 2013. Vol. 17. Iss. 4. P. 269–277. <https://doi.org/10.1179/1433075X12Y.0000000060>.
4. Uddin M., Santifoller R., Hall C., Schlaefer T. Effect of combined grinding–burnishing process on surface integrity, tribological, and corrosion performance of laser-clad Stellite 21 alloys // *Advanced Engineering Materials*. 2022. Vol. 25. Iss. 8. P. 2201332. <https://doi.org/10.1002/adem.202201332>.
5. Santos V., Uddin M., Hall C. Mechanical surface treatments for controlling surface integrity and corrosion resistance of Mg alloy implants: a review // *Journal of Functional Biomaterials*. 2023. Vol. 14. Iss. 5. P. 242. <https://doi.org/10.3390/jfb14050242>.
6. Ferencsik V., Varga G. The influence of diamond burnishing process parameters on surface roughness of low-alloyed aluminium workpieces // *Machines*. 2022. Vol. 10. Iss. 7. P. 564. <https://doi.org/10.3390/machines10070564>.
7. Schubnell J., Farajian M. Fatigue improvement of aluminium welds by means of deep rolling and diamond burnishing // *Welding in the World*. 2022. Vol. 66. No. 4. P. 699–708. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01212-1>.
8. Nestler A., Schubert A. Effect of machining parameters on surface properties in slide diamond burnishing of aluminium matrix composites // *Materials Today: Proceedings*. 2015. Vol. 2-1. P. S156–S161. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.033>.
9. Varga G., Ferencsik V. Investigation of the effect of surface burnishing on stress condition and hardening phenomena // *Tehnički vjesnik*. 2022. Vol. 29. No. 4. P. 1247–1253. <https://doi.org/10.17559/TV-20211110171854>.
10. Xiong Qiwen, Zhang Po, Zhai Wenzheng, Luo Xiaoshuang, Cai Zhaobing, Zheng Feilong, et al. Effect of ultrasonic surface rolling on the fretting wear property of 7075 aluminum alloy // *Metals*. 2023. Vol. 13. Iss. 10. P. 1674. <https://doi.org/10.3390/met13101674>.
11. Velázquez-Corral E., Wagner V., Jerez-Mesa R., Llumà J., Travieso-Rodríguez J.A., Dessein G. Analysis of ultrasonic vibration-assisted ball burnishing process on the tribological behavior of AISI 316L cylindrical specimens // *Materials*. 2023. Vol. 16. Iss. 16. P. 5595. <https://doi.org/10.3390/ma16165595>.
12. Tao Jiahao, Zhang Xin, Huang Lianpeng, Wang Hao, Zhang Yuanhu, Wang Zehua, et al. Microstructure and property evolutions of Q345B steel during ultrasonic shot peening // *Crystals*. 2023. Vol. 13. Iss. 2. P. 299. <https://doi.org/10.3390/cryst13020299>.
13. Ma Xiguan, Zhang Weihai, Xu Shubo, Sun Kangwei, Hu Xinzh, Ren Guocheng, et al. Effect of ultrasonic surface rolling process on surface properties and microstructure of 6061 aluminum alloy // *Materials Research*. 2023. Vol. 26. Iss. 9-10. P. e20230322. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2023-0322>.
14. John M., Ralls A.M., Dooley S.C., Thazhathidathil A.K.V., Perka A.K., Kuruveri U.B., et al. Ultrasonic surface rolling process: properties, characterization, and applications // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 22. P. 10986. <https://doi.org/10.3390/app112210986>.
15. Kishore A., John M., Ralls A.M., Jose S.A., Kuruveri U.B., Menezes P.L. Ultrasonic nanocrystal surface modification: processes, characterization, properties, and applications // *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. Iss. 9. P. 1415. <https://doi.org/10.3390/nano12091415>.
16. Fernández-Osete I., Estevez-Urra A., Velázquez-Corral E., Valentin D., Llumà J., Jerez-Mesa R., et al. Ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool for a lathe characterized by acoustic emission and vibratory measurements // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 19. P. 5746. <https://doi.org/10.3390/ma14195746>.
17. Teimouri R., Amini S., Bami A.B. Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic assisted ball burnishing of AA6061-T6 // *Measurement*. 2018. Vol. 116. P. 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.001>.
18. Velázquez-Corral E., Llumà J., Jerez-Mesa R., Wagner V., Dessein G., Travieso-Rodríguez J.A. Fatigue enhancement and hardening effect through ultrasonic vibration-assisted ball-burnishing process on AISI 1045 steel // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2024. Vol. 47. Iss. 1. P. 203–219. <https://doi.org/10.1111/ffe.14180>.
19. Biffi C.A., Bassani P., Nematollahi M., Moghaddam N.S., Amerinatanzi A., Mahtabi M.J., et al. Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on the microstructure and martensitic transformation of selective laser melted nitinol // *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 19. P. 3068. <https://doi.org/10.3390/ma12193068>.
20. Salmi M., Huuki J., Ituarte I.F. The ultrasonic burnishing of cobalt-chrome and stainless steel surface made by additive manufacturing // *Progress in Additive Manufacturing*. 2017. Vol. 2. Iss. 1. P. 31–41. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0017-z>.

21. Kumar S., Kumar D., Singh I., Rath D. An insight into ultrasonic vibration assisted conventional manufacturing processes: a comprehensive review // *Advances in Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 14. Iss. 6. P. 168781322211078. <https://doi.org/10.1177/16878132221107812>.
22. Ровин С.А., Дикун А.О. Исследование влияния ультразвуковой обработки в процессе кристаллизации на структуру и свойства деформируемых алюминиевых сплавов // *Литье и металлургия*. 2023. № 3. С. 28–35. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-28-35>. EDN: UPCUPD.
23. John M., Ralls A.M., Dooley S.C., Thazhathidathil A.K.V., Perka A.K., Kuruveri U.B., et al. Ultrasonic surface rolling process: properties, characterization, and applications // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Iss. 22. P. 10986. <https://doi.org/10.3390/app112210986>.
24. John M., Kalvala P.R., Misra M., Menezes P.L. Peening techniques for surface modification: processes, properties, and applications // *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 14. P. 3841. <https://doi.org/10.3390/ma14143841>.
25. Xu Nan, Jiang Xiaochen, Shen Xuehui, Peng Hao. Improving the surface integrity and tribological behavior of a high-temperature friction surface via the synergy of laser cladding and ultrasonic burnishing // *Lubricants*. 2023. Vol. 11. Iss. 9. P. 379. <https://doi.org/10.3390/lubricants11090379>.
26. Fu Lei, Li Xiulan, Lin Li, Wang Zhengguo, Zhang Yingqian, Luo Yunrong, et al. Study on microstructure evolution mechanism of gradient structure surface of AA7075 aluminum alloy by ultrasonic surface rolling treatment // *Materials*. 2023. Vol. 16. Iss. 16. P. 5616. <https://doi.org/10.3390/ma16165616>.

References

1. Kuvshinov M.O., Khlybov A.A. Comparative analysis of the methods of surface plastic deformation. In: *Ural'skaya shkola molodyh metallovodov: materialy XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy Ural'skoj shkoly-seminara metallovodov – molodyh uchenyh = Ural school of young metallurgists: Proceedings of 18th International scientific and technical Ural school-seminar of metallurgists – young scientists*. 21–23 November 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; 2017, p. 37–42. (In Russ.). EDN: YRSFDW.
2. Maximov J., Duncheva G., Anchev A., Dunchev V., Argirov Ya., Todorov V., et al. Effects of heat treatment and severe surface plastic deformation on mechanical characteristics, fatigue, and wear of Cu-10Al-5Fe bronze. *Materials*. 2022;15(24):8905. <https://doi.org/10.3390/ma15248905>.
3. Brostow W., Czechowski K., Polowski W., Rusek P., Toboła D., Wronska I. Slide diamond burnishing of tool steels with adhesive coatings and diffusion layers. *Materials Research Innovations*. 2013;17(4):269–277. <https://doi.org/10.1179/1433075X12Y.0000000060>.
4. Uddin M., Santifoller R., Hall C., Schlaefel T. Effect of combined grinding–burnishing process on surface integrity, tribological, and corrosion performance of laser-clad Stellite 21 alloys. *Advanced Engineering Materials*. 2022;25(8):2201332. <https://doi.org/10.1002/adem.202201332>.
5. Santos V., Uddin M., Hall C. Mechanical surface treatments for controlling surface integrity and corrosion resistance of Mg alloy implants: a review. *Journal of Functional Biomaterials*. 2023;14(5):242. <https://doi.org/10.3390/jfb14050242>.
6. Ferencsik V., Varga G. The influence of diamond burnishing process parameters on surface roughness of low-alloyed aluminium workpieces. *Machines*. 2022;10(7):564. <https://doi.org/10.3390/machines10070564>.
7. Schubnell J., Farajian M. Fatigue improvement of aluminium welds by means of deep rolling and diamond burnishing. *Welding in the World*. 2022;66(4):699–708. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01212-1>.
8. Nestler A., Schubert A. Effect of machining parameters on surface properties in slide diamond burnishing of aluminium matrix composites. *Materials Today: Proceedings*. 2015;2-1:S156–S161. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.05.033>.
9. Varga G., Ferencsik V. Investigation of the effect of surface burnishing on stress condition and hardening phenomena. *Tehnički vjesnik*. 2022;29(4):1247–1253. <https://doi.org/10.17559/TV-2021110171854>.
10. Xiong Qiwen, Zhang Po, Zhai Wenzheng, Luo Xiaoshuang, Cai Zhaobing, Zheng Feilong, et al. Effect of ultrasonic surface rolling on the fretting wear property of 7075 aluminum alloy. *Metals*. 2023;13(10):1674. <https://doi.org/10.3390/met13101674>.
11. Velázquez-Corral E., Wagner V., Jerez-Mesa R., Lluma J., Travieso-Rodríguez J.A., Dessein G. Analysis of ultrasonic vibration-assisted ball burnishing process on the tribological behavior of AISI 316L cylindrical specimens. *Materials*. 2023;16(16):5595. <https://doi.org/10.3390/ma16165595>.
12. Tao Jiahao, Zhang Xin, Huang Lianpeng, Wang Hao, Zhang Yuanhu, Wang Zehua, et al. Microstructure and property evolutions of Q345B steel during ultrasonic shot peening. *Crystals*. 2023;13(2):299. <https://doi.org/10.3390/cryst13020299>.
13. Ma Xiguan, Zhang Weihai, Xu Shubo, Sun Kangwei, Hu Xinzhi, Ren Guocheng, et al. Effect of ultrasonic surface rolling process on surface properties and microstructure of 6061 aluminum alloy. *Materials Research*. 2023;26(9-10):e20230322. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2023-0322>.
14. John M., Ralls A.M., Dooley S.C., Thazhathidathil A.K.V., Perka A.K., Kuruveri U.B., et al. Ultrasonic surface rolling process: properties, characterization, and applications. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10986. <https://doi.org/10.3390/app112210986>.

15. Kishore A., John M., Ralls A.M., Jose S.A., Kuruveri U.B., Menezes P.L. Ultrasonic nanocrystal surface modification: processes, characterization, properties, and applications. *Nanomaterials*. 2022;12(9):1415. <https://doi.org/10.3390/nano12091415>.
16. Fernández-Osete I., Estevez-Urra A., Velázquez-Corral E., Valentin D., Llumà J., Jerez-Mesa R., et al. Ultrasonic vibration-assisted ball burnishing tool for a lathe characterized by acoustic emission and vibratory measurements. *Materials*. 2021;14(19):5746. <https://doi.org/10.3390/ma14195746>.
17. Teimouri R., Amini S., Bami A.B. Evaluation of optimized surface properties and residual stress in ultrasonic assisted ball burnishing of AA6061-T6. *Measurement*. 2018;116:129-139. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.001>.
18. Velázquez-Corral E., Llumà J., Jerez-Mesa R., Wagner V., Dessein G., Travieso-Rodriguez J.A. Fatigue enhancement and hardening effect through ultrasonic vibration-assisted ball-burnishing process on AISI 1045 steel. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2024;47(1):203-219. <https://doi.org/10.1111/ffe.14180>.
19. Biffi C.A., Bassani P., Nematollahi M., Moghaddam N.S., Amerinatanzi A., Mahtabi M.J., et al. Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on the microstructure and martensitic transformation of selective laser melted nitinol. *Materials*. 2019;12(19):3068. <https://doi.org/10.3390/ma12193068>.
20. Salmi M., Huuki J., Ituarte I.F. The ultrasonic burnishing of cobalt-chrome and stainless steel surface made by additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*. 2017;2(1):31-41. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0017-z>.
21. Kumar S., Kumar D., Singh I., Rath D. An insight into ultrasonic vibration assisted conventional manufacturing processes: a comprehensive review. *Advances in Mechanical Engineering*. 2022;14(6):168781322211078. <https://doi.org/10.1177/16878132221107812>.
22. Rovin S.L., Dikun A.O. Investigation of the effect of ultrasonic treatment during crystallization on the structure and properties of deformable aluminum alloys. *Foundry production and metallurgy*. 2023;(3):28-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2023-3-28-35>. EDN: UPCUPD.
23. John M., Ralls A.M., Dooley S.C., Thazhathidathil A.K.V., Perka A.K., Kuruveri U.B., et al. Ultrasonic surface rolling process: properties, characterization, and applications. *Applied Sciences*. 2021;11(22):10986. <https://doi.org/10.3390/app112210986>.
24. John M., Kalvala P.R., Misra M., Menezes P.L. Peening techniques for surface modification: processes, properties, and applications. *Materials*. 2021;14(14):3841. <https://doi.org/10.3390/ma14143841>.
25. Xu Nan, Jiang Xiaochen, Shen Xuehui, Peng Hao. Improving the surface integrity and tribological behavior of a high-temperature friction surface via the synergy of laser cladding and ultrasonic burnishing. *Lubricants*. 2023;11(9):379. <https://doi.org/10.3390/lubricants11090379>.
26. Fu Lei, Li Xiulan, Lin Li, Wang Zhengguo, Zhang Yingqian, Luo Yunrong, et al. Study on microstructure evolution mechanism of gradient structure surface of AA7075 aluminum alloy by ultrasonic surface rolling treatment. *Materials*. 2023;16(16):5616. <https://doi.org/10.3390/ma16165616>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванова Алина Владиславовна,

аспирант,
Новосибирский государственный
технический университет,
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия
✉ a.v.ivanova.2018@corp.nstu.ru

Зеленина Анна Владимировна,

аспирант,
Новосибирский государственный
технический университет,
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия
zelenina.2018@corp.nstu.ru

Гилета Виктор Павлович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры технологии машиностроения,
Новосибирский государственный
технический университет,
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия
v.gileta@corp.nstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6195-3919>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alina V. Ivanova,

Postgraduate Student,
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia
✉ a.v.ivanova.2018@corp.nstu.ru

Anna V. Zelenina,

Postgraduate Student,
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia
zelenina.2018@corp.nstu.ru

Viktor P. Gileta,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Mechanical Engineering Technology,
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia
v.gileta@corp.nstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6195-3919>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.05.2025 г.; одобрена после рецензирования 07.07.2025 г.; принята к публикации 22.07.2025 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 20.05.2025; approved after reviewing 07.07.2025; accepted for publication 22.07.2025.



Экспериментальное исследование различных способов постобработки пластиковых деталей, изготовленных методом 3D-печати

Д.Ю. Левин^{1✉}, М.Е. Подшибякин², О.А. Рябинина³, А.И. Болдырев⁴

¹⁻⁴Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

Резюме: Цель работы – провести сравнительный анализ и оценку методов обработки поверхностей пластиковых изделий, изготовленных с использованием технологии 3D-печати методом Fused Deposition Modelling (моделирование методом послойного наплавления). Экспериментальные исследования производились на образцах, изготовленных из ABS-пластика с помощью различных инструментов физической, термической и химической обработки, таких как: электрического гравера с абразивными кругами крупной и мелкой зернистости, фетрового полировального круга и абразивной пасты, бор-фрезы; ацетона, дихлорметана (метилена хлористого); паяльно-го фена; полупроводникового лазерного гравера NEJE Master с регулировкой мощности лазерного излучения. Изучение проводилось с помощью оптического портативного и цифрового микроскопов. Основное внимание в статье было уделено практическому рассмотрению существующих методов обработки поверхности изделий из ABS-пластика, их недостаткам и преимуществам. В результате проведенного сравнительного анализа методов обработки поверхностей изделий из ABS-пластика была проведена визуальная оценка результатов обработки поверхности различными методами по нескольким критериям. Сравнение проводилось среди полученных типов поверхностей, четкости слоев, однородности поверхности, степени деформации, наличию царапин/трещин, раковин, наплывов, вздутий. Их сравнение было проведено на основе выдвинутых критериев. Сравнительный анализ различных методов обработки показал, что наилучший результат полученного качества был достигнут при обработке поверхности с помощью лазерного излучения. Показано, что данный метод имеет недостаток, который заключается в необходимости предварительной настройки лазера и потенциальной сложности обработки объемных деталей. Результаты данного исследования можно применять в машиностроении при изготовлении деталей с использованием аддитивных технологий для управления качеством поверхности пластиковых изделий.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, FDM, ABS-пластик, постобработка, методы обработки, качество поверхности

Для цитирования: Левин Д.Ю., Подшибякин М.Е., Рябинина О.А., Болдырев А.И. Экспериментальное исследование различных способов постобработки пластиковых деталей, изготовленных методом 3D-печати // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 322–335. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-322-335>. EDN: OPPOEU.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Experimental study of different methods for post-processing plastic parts manufactured by 3D printing

Dmitrii Yu. Levin^{1✉}, Maksim E. Podshibyakin², Olga A. Riabinina³, Aleksander I. Boldyrev⁴

¹⁻⁴Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract. The article aims to compare and evaluate methods for surface treatment of plastic products manufactured using 3D printing technology, namely by fused deposition modelling (layer-by-layer FDM). The experimental studies were conducted on ABS plastic samples using various tools for physical, thermal, and chemical processing. These included an electric engraver with coarse and fine grain grinding wheels, a felt polishing wheel and abrasive paste, burrs; acetone, dichloromethane (methylene chloride); a heat gun; a NEJE Master semiconductor laser engraver with adjustable laser power. The study was conducted utilizing portable optical and digital microscopes. The article focuses on the existing methods for surface treatment of ABS plastic products and

highlights their advantages and disadvantages. In order to compare the methods of surface treatment of ABS plastic products, a visual assessment of the results of surface treatment by various methods was carried out according to several criteria. We compared the obtained types of surfaces, printer resolution (i. e., layer thickness and X-Y resolution), surface uniformity, degree of deformation, presence of scratches/cracks, cavities, buildups, and blisters employing the proposed criteria. The comparative analysis of various processing methods demonstrated that the best result in terms of quality was achieved with surface treatment using laser radiation. However, this method was shown to have a drawback which is the need for preliminary laser adjustment and the potential complexity of processing three-dimensional parts. The results of the present study can be applied in mechanical engineering when manufacturing parts using additive technologies to manage the surface quality of plastic products.

Keywords: additive technologies, 3D printing, FDM, ABS plastic, post-processing, machining techniques, surface quality

For citation: Levin D.Yu., Podshibyakin M.E., Riabinina O.A., Boldyrev A.I. Experimental study of different methods for post-processing plastic parts manufactured by 3D printing. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):322-335. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-322-335>. EDN: OPPOEU.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время множество приборов различной конфигурации изготавливается методом 3D-печати, так как этот метод позволяет существенно снизить вес компонентов, улучшить их прочностные характеристики и оптимизировать геометрию изделий, что особенно важно для условий эксплуатации в аэрокосмической отрасли. 3D-печать также обеспечивает высокую степень свободы в проектировании, позволяя создавать сложные и уникальные конструкции, которые невозможно получить традиционными методами литья или механической обработки. Использование специализированных полимеров и композитов с наполнителями (например, углеродонаполненные или металлонаполненные пластики) расширяет диапазон эксплуатационных характеристик, таких как термостойкость и устойчивость к агрессивным средам. Кроме того, данный подход способствует сокращению производственных затрат и времени на изготовление деталей за счет минимизации отходов материалов и быстрой адаптации к изменениям в конструкции изделия. Поэтому важное значение имеет изучение и развитие способов работы с деталями, получаемыми данным типом производства, включая их постобработку, контроль качества, обеспечение надежности в условиях экстремальных нагрузок и температур, а также интеграцию в существующие технологические процессы авиакосмического приборостроения [1–4].

В рамках данного исследования особое внимание будет уделено сравнительному анализу методов постобработки пластиковых деталей, полученных аддитивными технологиями, включая механическую шлифовку, химическое сглаживание и термическую об-

работку. С помощью лабораторного оборудования проведено качественное сравнение, которое позволит оценить изменения шероховатости и выявить критические дефекты, влияющие на эксплуатационную долговечность. Полученные данные позволяют выработать обоснованные рекомендации по выбору оптимального способа постобработки для снижения волнистости и шероховатости 3D-печатных компонентов, улучшить визуальные качества изделия.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Современные технологии аддитивного производства, такие как FDM (от англ. Fused Deposition Modeling – моделирование методом послойного наплавления), произвели революционные изменения в области проектирования и изготовления изделий. FDM – одна из самых популярных технологий 3D-печати, она очень проста: сложные объекты создаются из расплавленного пластика, выдавленного через сопло. Намотанная на катушку пластиковая нить, разматываясь, подается в экструзионное сопло, при этом управляемый компьютером механизм перемещает само сопло и/или объект вдоль трех осей. После выдавливания материал моментально затвердевает [5, 6]. Эта методика предоставила новые возможности для создания сложных геометрических форм и функциональных компонентов при минимальных затратах времени и материальных ресурсов. FDM позволила внедрить производственные процессы, которые раньше считались технически или экономически невозможными, особенно в условиях индивидуального и мелкосерийного производства [7, 8].

Среди материалов, используемых в технологии FDM, акрилонитрил-бутадиен-стирол

(ABS) – трехсоставной сополимер нефтехимического происхождения [9] – занимает особое место благодаря своим выдающимся механическим характеристикам, термостойкости и экономичности. Материал также обладает высокой химической устойчивостью и механической прочностью, что делает его незаменимым в различных отраслях, включая автомобилестроение, производство электронной и медицинской техники [10–12].

Тем не менее детали, изготовленные из ABS методом FDM, характеризуются присущими этому процессу недостатками: выраженной слоистостью, наличием мелких дефектов и поверхностной неоднородностью. Эти недостатки объясняются природой самого метода: послойное наплавление приводит к формированию заметных швов и неоднородностей, что особенно критично в случаях, когда изделие подвергается высокому механическому или химическому воздействию. Более того, шероховатость поверхности может затруднять дальнейшую обработку и ухудшать эстетическое восприятие деталей, что делает необходимым использование технологий постобработки. Такие дефекты не только влияют на внешний вид изделий, но и могут снижать их долговечность и функциональность, особенно в условиях высоких нагрузок или агрессивных сред [13–17].

В настоящее время для постобработки деталей из ABS применяется широкий спектр методов, включая механическое шлифование, химическое сглаживание с использованием растворителей, термическое выравнивание и использование лазерного

излучения. Каждый из этих подходов обладает специфическими преимуществами, ограничениями и имеет свои области применения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках данной статьи была проведена сравнительная оценка методов обработки поверхности изделий из ABS, полученных при помощи 3D-печати методом FDM.

На первом этапе был выбран материал для проведения анализа – филамент компании eSUN. Характеристики рассматриваемого филамента представлены в табл. 1.

Из данного пластика с помощью 3D-принтера были напечатаны заготовки (рис. 1), поверхность которых была обработана различными методами, рассмотренными далее в рамках проведенного эксперимента.



Рис. 1. Заготовки из акрилонитрил-бутадиен-стирола
Fig. 1. Acrylonitrile butadiene styrene workpieces

Таблица 1. Характеристики филамента
Table 1. Filament characteristics

Производитель	eSUN
Тип пластика	ABS
Температура экструдера	240–270°C
Температура стола	90–110°C
Скорость печати	40–300 мм/с
Плотность	1,06 г/см ³
Температура теплового искажения	94,9°C, 0,45 МПа
Показатель текучести	1,42 г/мин
Предел прочности	29,9 МПа
Относительное удлинение	5,7%
Прочность на изгиб	76,2 МПа
Модуль упругости на изгиб	2694 МПа
Ударная вязкость	3,5 кДж/м ²

В качестве начального этапа рассмотрена поверхность заготовки без обработки. В дальнейшем для более подробного рассмотрения будут использованы микроскопы: оптический портативный (рис. 2 а), позволяющий получить 30-кратное увеличение, и цифровой (рис. 2 б), дающий увеличение в 100 раз.

Поверхности заготовки без обработки под разным увеличением приведены на рис. 2.

Как можно заметить, поверхность заготовки без обработки достаточно слоиста, четко виден каждый слой. Даже без увеличения заметно, что поверхность неоднородна, так как между слоями имеются канавки, при увеличении это видно отчетливее. На верхней поверхности слои наиболее равномерны, но они все также различимы.

Следующим шагом была обработка поверхности заготовок с использованием различных методик.

Первым методом обработки была механическая в различных вариациях. Обработка была проведена с помощью электрического гравера TASP с использованием гибкого вала для удобства обработки.

Первая заготовка была обработана с использованием абразивных кругов диаме-

тром 14 мм крупной (R80) и мелкой (R240) зернистости на скорости 15000 об/мин.

Часть поверхности заготовки, обработанная с помощью абразивного круга крупной зернистости, представлена на рис. 3.

Оставшаяся часть поверхности заготовки, обработанная с помощью абразивного круга мелкой зернистости, представлена на рис. 4.

Обработка при помощи абразивного круга различной зернистости визуально показала примерно одинаковый результат. Слоистость пропала, но появились визуально заметные царапины, так как абразив царапает и вырывает материал, получая крошку, но в случае с крупным зерном материал вырывает сильнее и царапины получаются глубже.

Следующая заготовка была обработана с использованием фетрового полировального круга (диаметром 14 мм, толщиной 6 мм) и дополнительно с использованием абразивной пасты DREMEL 14 (зернистость 400) на скорости 12000 об/мин.

Части поверхности заготовки, обработанные полировальным кругом и кругом с нанесением абразивной пасты, показаны на рис. 5, 6 соответственно.

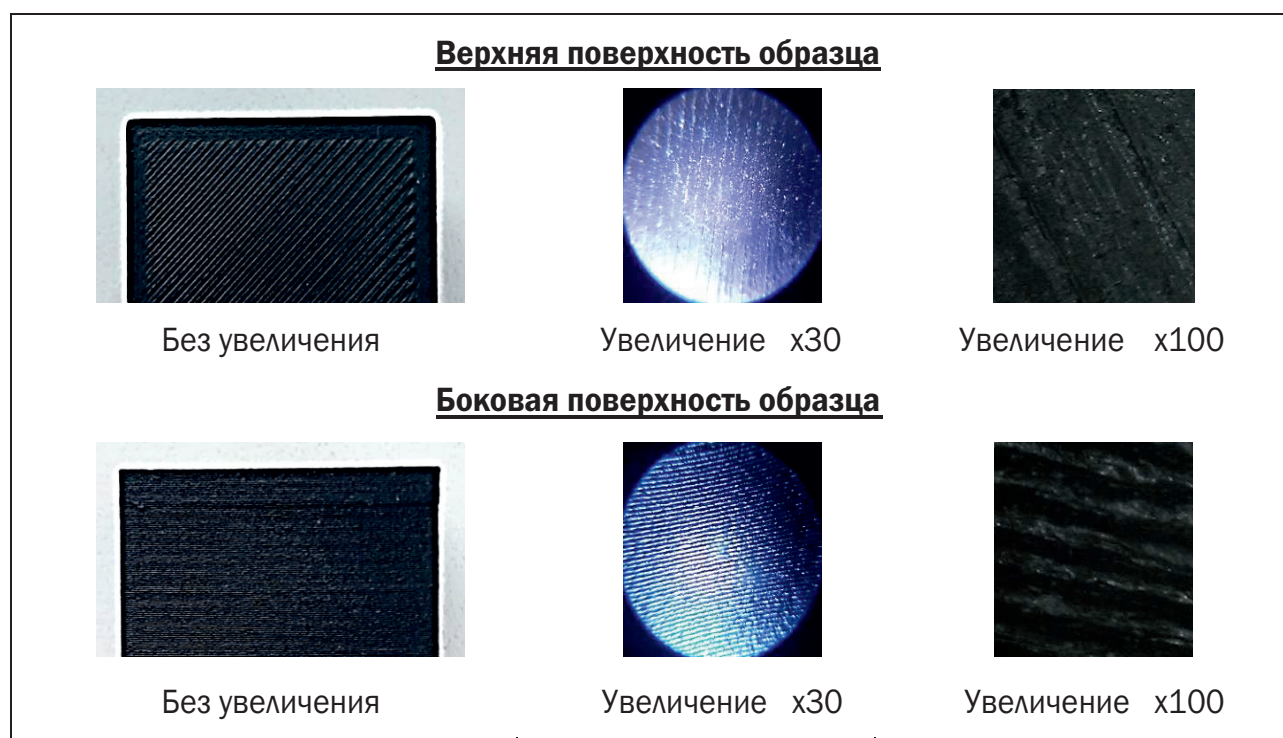


Рис. 2. Заготовка без обработки
Fig. 2. Workpiece without machining

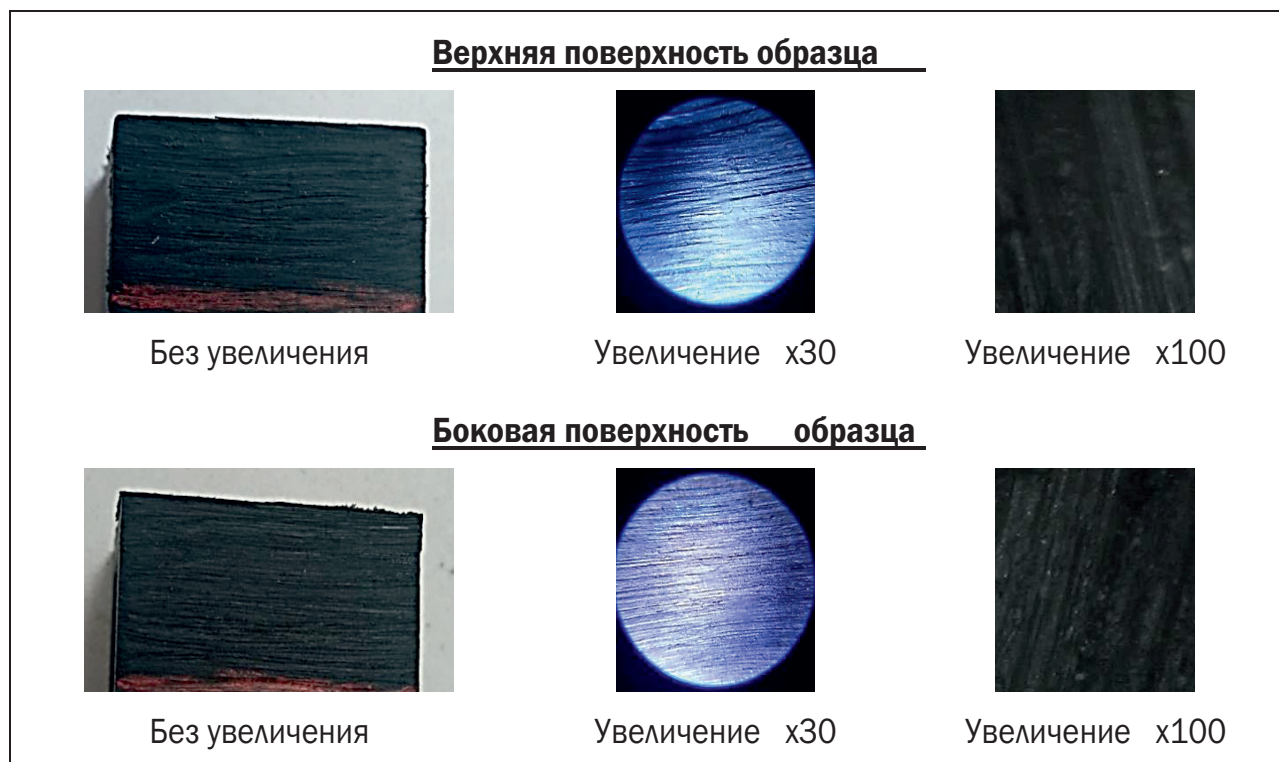


Рис. 3. Часть заготовки, обработанная абразивным кругом крупной зернистости
Fig. 3. Part of the workpiece processed with a coarse-grained abrasive wheel

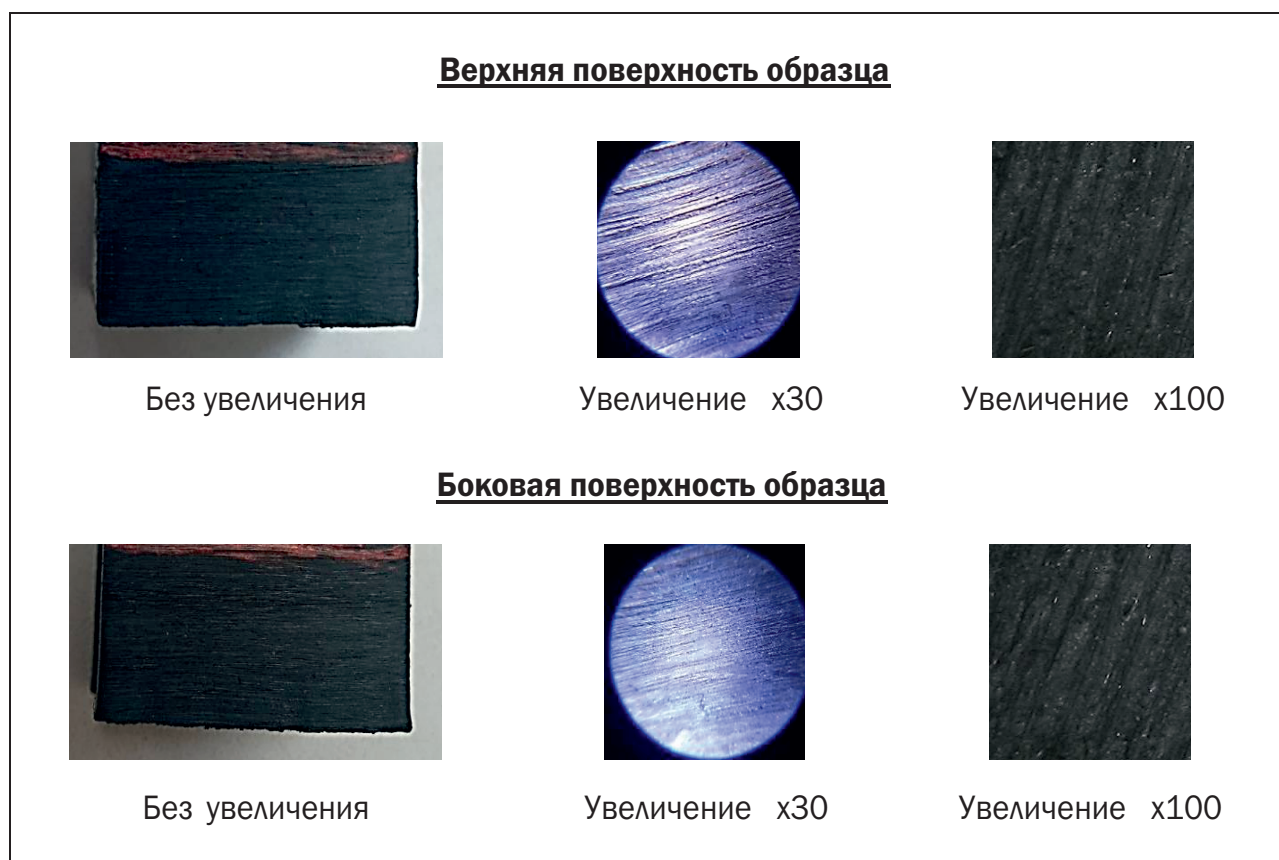


Рис. 4. Часть заготовки, обработанная абразивным кругом мелкой зернистости
Fig. 4. Part of the workpiece processed with a fine-grained abrasive wheel

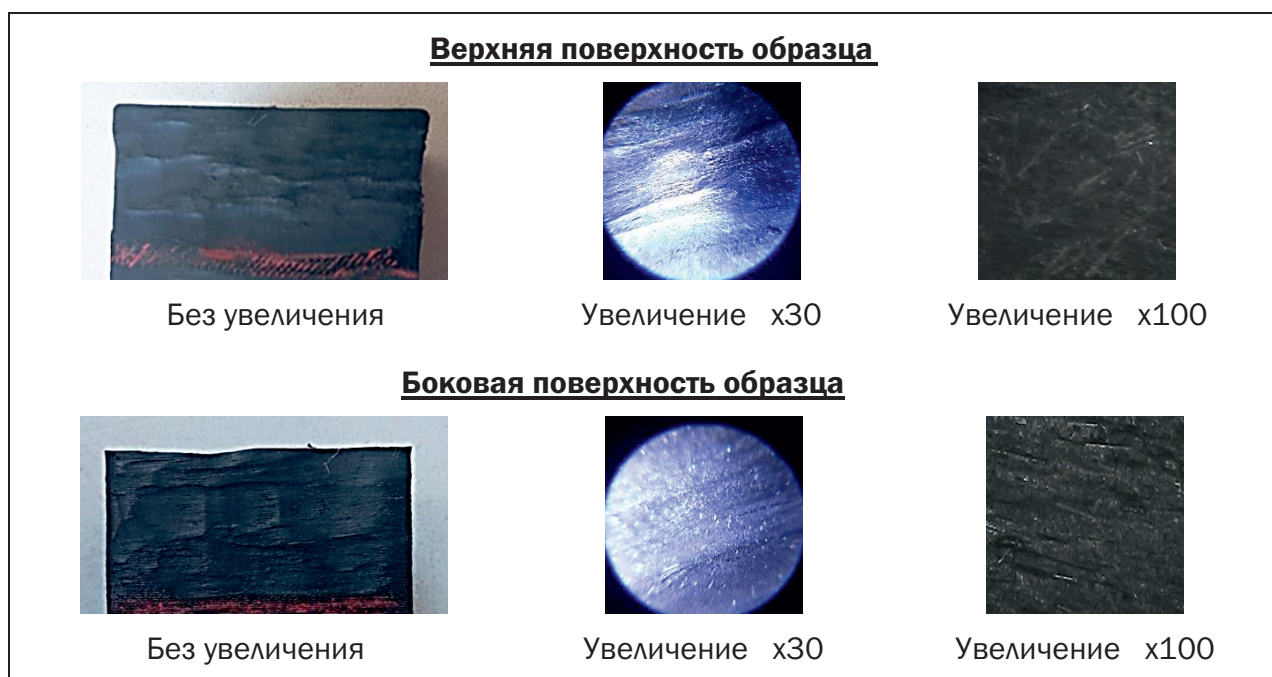


Рис. 5. Часть заготовки, обработанная полировальным кругом

Fig. 5. Part of the workpiece machined with a polishing wheel



Рис. 6. Часть заготовки, обработанная полировальным кругом с абразивной пастой

Fig. 6. Part of the workpiece machined with a polishing wheel with abrasive paste

Можно заметить, что оба варианта схожи, но необходимо подчеркнуть, что полировка с пастой была проще в применении и наиболее контролируема, о чем говорит меньшее количество раковин и наплывов мате-

риала. Поверхность в каждом из вариантов однотипна, но в случае с абразивной пастой появился характерный блеск, и при увеличении можно отметить определенную однородность обрабатываемой поверхности.

Последняя заготовка в механическом методе была обработана при помощи борфрезы с алмазным напылением. Поверхности, обработанные с помощью борфрезы, представлены на рис. 7.

Обработка борфрезой визуально показала хороший результат. Как и с обработкой шлифовальным кругом, на поверхности имеются царапины, но не такие глубокие и четкие, однако на боковой поверхности царапины более выражены, также на ней имеются раковины.

Химическая обработка была произведена следующим методом. В качестве реагентов использованы ацетон и дихлорметан (метилен хлористый). Обработка происходила нанесением реагента на поверхность заготовки в несколько слоев, с ожиданием полного высыхания предыдущего нанесения.

Заготовки, обработанные ацетоном и дихлорметаном, представлены на рис. 8, 9 соответственно.

Как можно заметить, обработка поверхности ацетоном практически ничего не изменила. При увеличении можно отметить, что слои стали более гладкими, а сам пластик – матовым.

Обработка дихлорметаном привела к растворению поверхности, которая сглади-

лась, но местами слоистость еще различима. Из-за воздействия реагента появилась пузыристость поверхности, но незначительная.

Следующие заготовки были обработаны термическим методом. Обработка проводилась при помощи паяльного фена, позволяющего производить нагрев до 450 °С.

В рамках анализа была рассмотрена обработка поверхности при воздействии температуры в 400 °С. Поверхности, полученные при температурном воздействии, продемонстрированы на рис. 10.

Во время термического воздействия на поверхность произошло спекание слоев, отчего поверхность стала немного гладкой, но наблюдались вздутие и деформация слоев. Также стоит отметить, что поверхность стала глянцевой и при увеличении напоминает стекло.

Последним рассматриваемым методом была обработка поверхности лазерным излучением. Обработка проходила на лазерном гравере NEJE Master с лазерной головкой на 3,5 Вт. Дополнительно гравер был помещен в специальный корпус с вытяжной системой для отвода газов, возникающих при сгорании слоев пластика [18–20].

Для проведения обработки необходимо подобрать скоростной режим и мощность лазер-

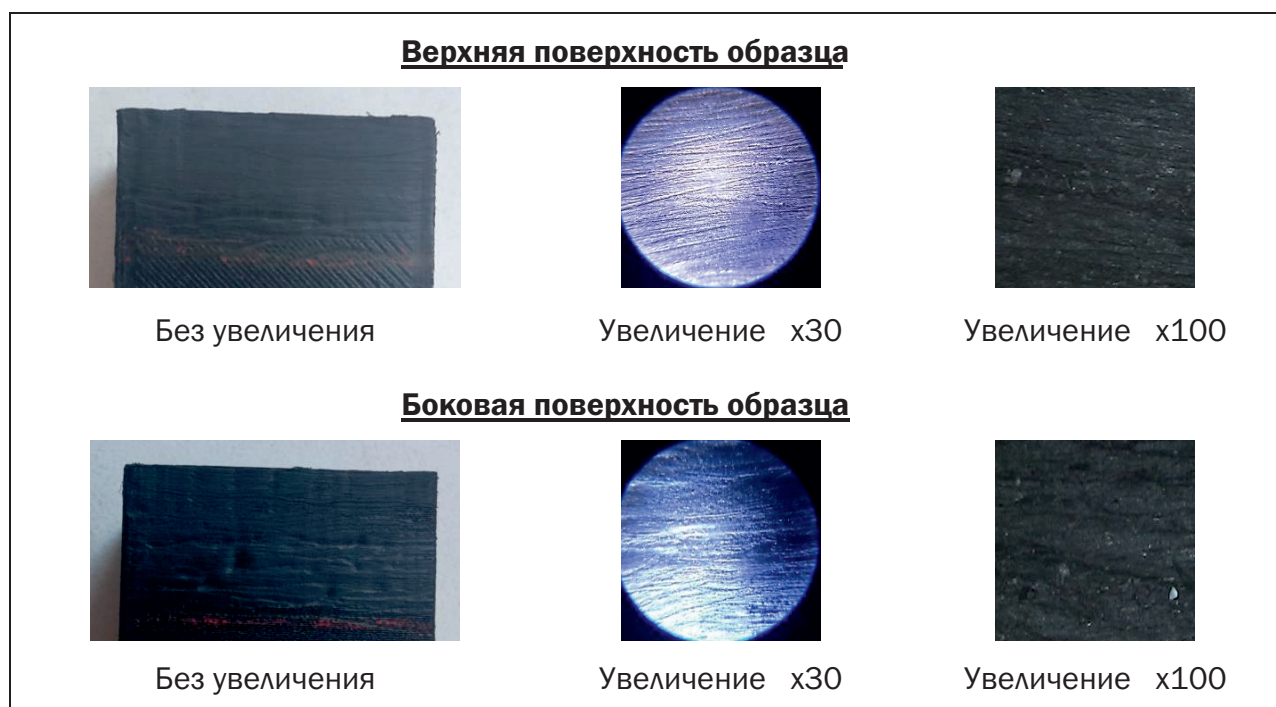


Рис. 7. Заготовка, обработанная борфрезой

Fig. 7. Burr cutter-machined workpiece

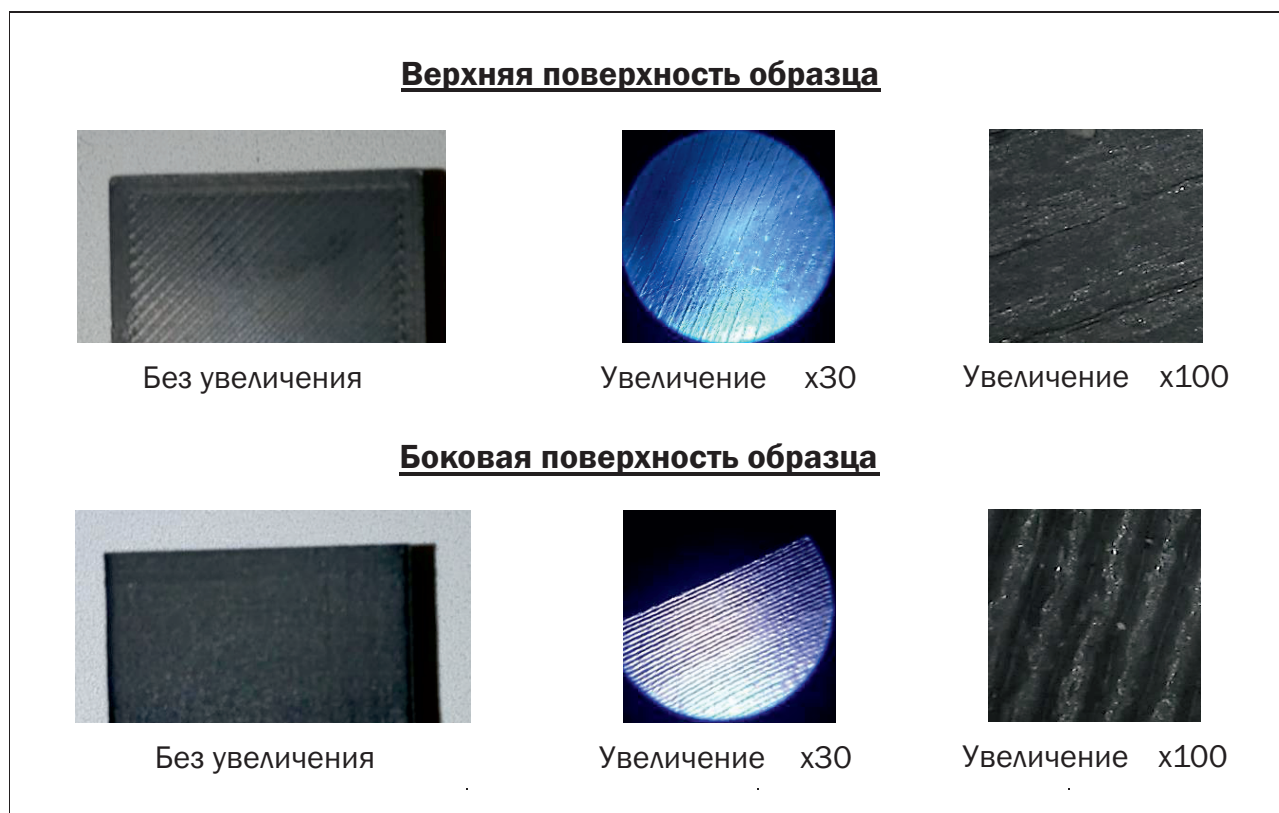


Рис. 8. Заготовка, обработанная ацетоном
Fig. 8. Acetone-treated workpiece

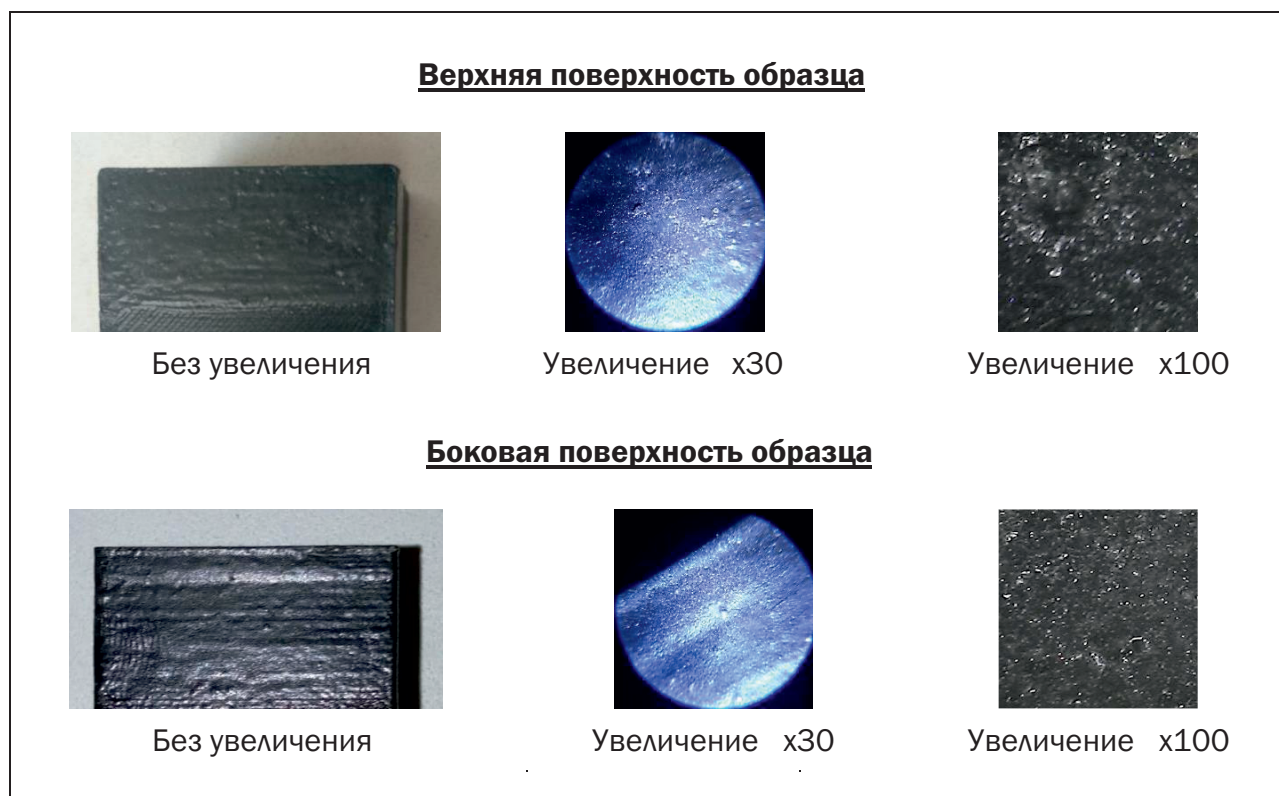
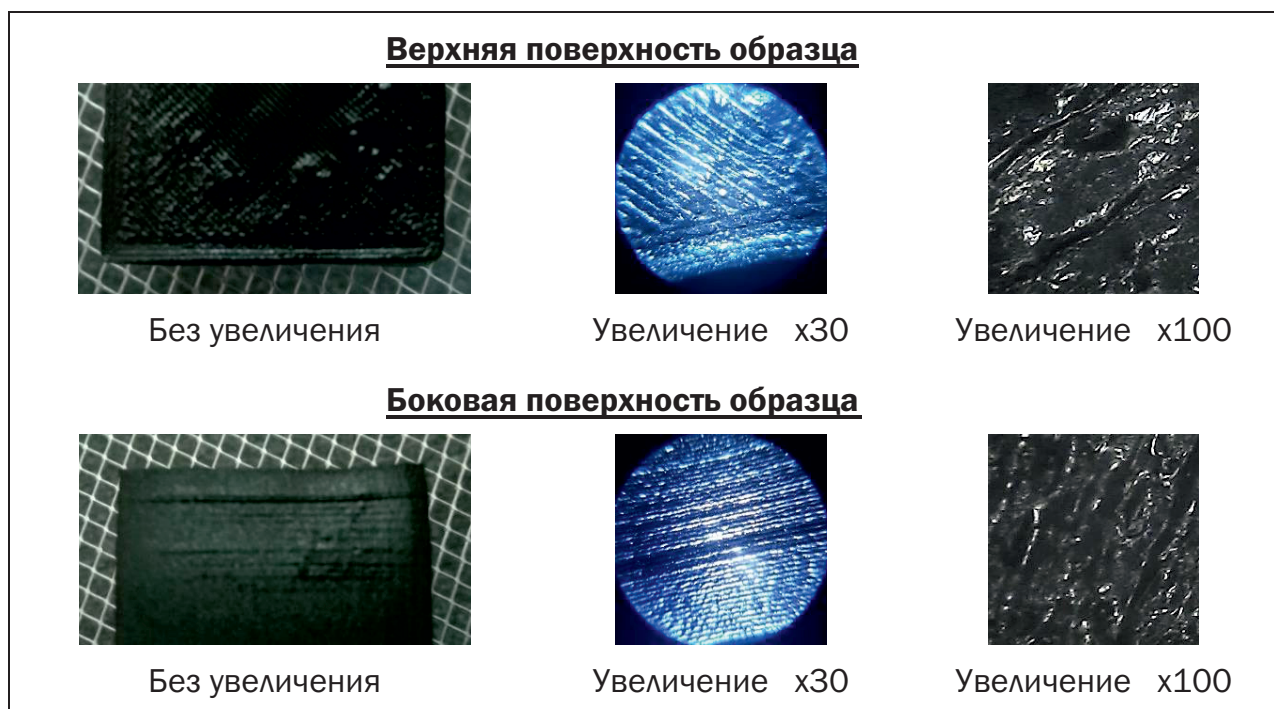


Рис. 9. Заготовка, обработанная дихлорметаном
Fig. 9. Dichloromethane-treated workpiece

**Рис. 10.** Заготовка, обработанная термически**Fig. 10.** Heat-treated workpiece

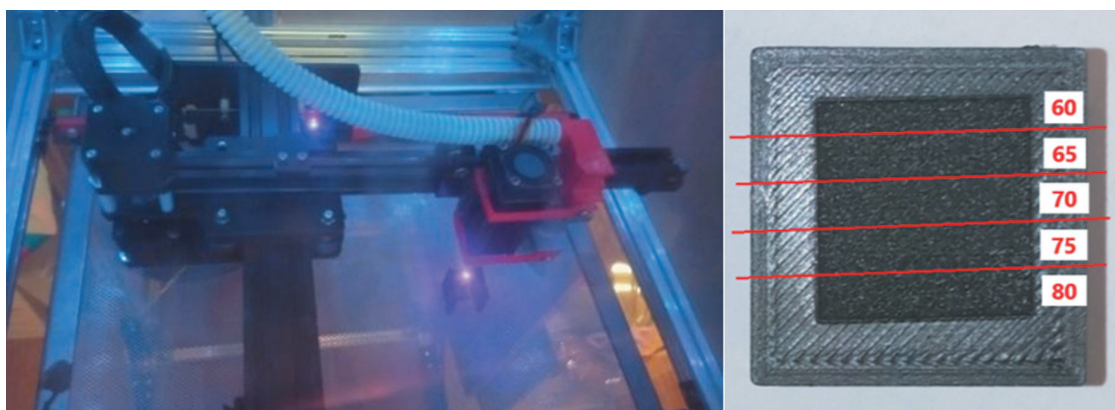
ного излучения. Была выбрана область 16×16 мм, на ней проводилась серия экспериментов. Проводился эксперимент с изменением мощности лазерного излучения (рис. 11). Выбран диапазон 60–80 Вт с шагом в 5 Вт.

В ходе эксперимента было выявлено, что изменение мощности лазера оказывает незначительное влияние на поверхность. Глубина снятого слоя во всех вариантах в пределах одной величины с незначительными отклонениями, поэтому была выбрана максимальная мощность в 80 Вт.

Следующий эксперимент заключался в изменении скорости прохода лазера с по-

стоянной мощностью в 80 Вт (рис. 12). Диапазон скорости прохода лазера был выбран 6–10 мс с шагом в 1 мс.

Эксперимент показал, что скорость прохода лазера влияет на глубину снимаемого слоя, начиная от времени воздействия 8 мс на точку, что соответствует скорости около 9 мм/с; величина углубления увеличивается значительно и составляет примерно 0,2 мм. Проходы со временем воздействия 6 и 7 мс на точку (примерно 12,5 и 11 мм/с, соответственно) не отличаются, величина снятого слоя составляет примерно 0,1 мм. В итоге было выбрано время воздействия 7 мс на

**Рис. 11.** Эксперимент с изменением мощности лазерного излучения**Fig. 11.** Experiment with laser power variation

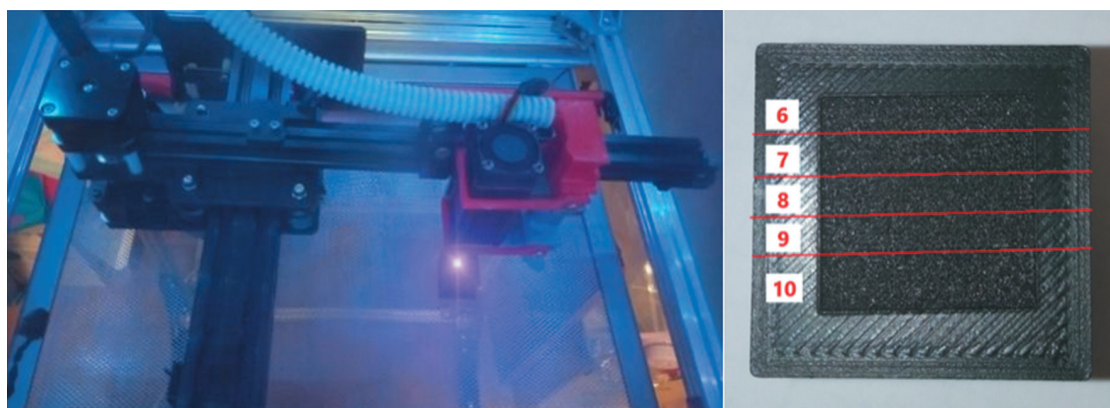


Рис. 12. Эксперимент с изменением скорости прохода лазера
Fig. 12. Experiment with laser pass velocity variation

точку, так как визуально это показало лучший результат.

После проведения экспериментов была произведена обработка поверхностей заготовки с мощностью лазера в 80% от максимальной (2800 мВт) и временем воздействия лазера в 7 мс на точку. Полученные поверхности представлены на рис. 13.

Обработанные лазерным излучением поверхности однородны, без четко выраженной слоистости.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проделанного сравнительного анализа методов обработки поверхностей изделий из ABS была проведена визуальная оценка по следующим критериям:

- тип поверхности;
- четкость слоев;
- однородность поверхности;
- степень деформации;
- наличие царапин/трещин;
- наличие раковин;



Рис. 13. Заготовка, обработанная лазерным излучением
Fig. 13. Laser treated workpiece

Таблица 2. Оценка методов обработки поверхностей
Table 2. Evaluation of surface treatment methods

Метод обработки	Критерии визуальной оценки							
	Тип поверхности	Четкость слоев	Однородность поверхности	Деформация	Царапины и трещины	Раковины	Наплывы	Пузырения
Без обработки	полуматовая	выс.	низ.	низ.	низ.	низ.	низ.	низ.
Обработка абразивным кругом крупной зернистости	матовая	низ.	сред.	сред.	выс.	низ.	низ.	низ.
Обработка абразивным кругом мелкой зернистости	матовая	низ.	выс.	сред.	сред.	низ.	низ.	низ.
Обработка полировальным кругом	матовая	низ.	сред.	сред.	низ.	выс.	сред.	низ.
Обработка полировальным кругом с абразивной пастой	матовая	низ.	сред.	сред.	низ.	выс.	сред.	низ.
Обработка ацетоном	матовая	выс.	низ.	низ.	низ.	низ.	низ.	низ.
Обработка дихлорметаном	матовая	сред.	выс.	сред.	низ.	низ.	низ.	сред.
Термическая обработка	глянец	выс.	сред.	выс.	выс.	низ.	низ.	выс.
Лазерная обработка	матовая	низ.	выс.	низ.	низ.	низ.	низ.	низ.

- наличие наплывов;
- наличие вздутий.

Оценка методов по вышеописанным критериям представлена в табл. 2.

Используя предложенную таблицу, есть возможность провести сравнительную оценку методов, итоги которой приведены ниже.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно отметить по визуальной оценке, что все методы имеют свои положительные

и отрицательные стороны. Самый лучший результат показала обработка поверхности при помощи лазерного излучения, но основной минус метода заключается в предварительной настройке лазера и потенциальной сложности обработки объемных деталей. Наряду с этим для рассмотренных методов имеет место их использования в комбинации, что позволит нивелировать ряд недостатков.

Список источников

1. Ouazzani K., Jai M.E., Akhrif I., Radouani M., Fahime B.E. An experimental study of FDM parameter effects on ABS surface quality: roughness analysis // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. Vol. 127. P. 151–178. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11435-9>. EDN: MJUJUL.
2. Mathew A., Kishore S.R., Tomy A.T., Sugavaneswaran M., Scholz S.G., Elkaseer A., Wilson V.H., Rajan A.J. Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts // Progress in Additive Manufacturing. 2023. Vol. 8. P. 1161–1178. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00391-7>. EDN: ASYRUS.
3. Yuan Chai, Rachel W. Li, Diana M. Perriman, Song Chen, Qing-Hua Qin, Paul N. Smith. Laser polishing of thermoplastics fabricated using fused deposition modelling // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 96. P. 4295–4302. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1901-5>. EDN: YHUSYH.
4. Levin D., Kuzovkin A. Laser polishing as method of improving surface quality of fused deposition modeling (FDM) parts made by metal-filled plastic // Антропоцентрические науки в образовании: вызовы, трансформации, ресурсы: сб. науч. ст. Междунар. форума профессионального образования (г. Воронеж, 9–10 апреля 2024 г.). Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2024. P. 350–353. EDN: LXPTJB.
5. Кэнесс Э., Фонда К., Дзеннаро М. Доступная 3D печать для науки, образования и устойчивого развития / пер. с итал. Триест: Международный центр теоретической физики Абдуса Салама, 2013. 192 с.
6. He Feiyang, Alshammari Yo.L.A., Khan M. The effect of printing parameters on crack growth rate of FDM ABS cantilever beam under thermo-mechanical loads // Procedia Structural Integrity. 2021. Vol. 34. P. 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.009>.

7. Запольский И.С., Левин Д.Ю., Рябинина О.А. Анализ проблем, возникающих при эксплуатации настольных 3D-принтеров с открытым типом конструкции // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения «АПИР-28»: сб. науч. тр. Национальной науч.-техн. конф. с междунар. участием (г. Тула, 13–15 ноября 2023 г.). Тула: Тульский государственный университет, 2023. С. 249–252. EDN: FKOCZF.
8. Kumar R., Sharma H., Saran C., Tripathy T.S., Sangwan K.S., Herrmann C. A comparative study on the life cycle assessment of a 3D printed product with PLA, ABS & PETG materials // *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 107. P. 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.003>.
9. Сивова А.Н., Паня А., Душечкина Е.А. Производство пластика для 3D печати из вторичных ПЭТ, ABS и PLA // Студенческая научная весна: сборник тезисов докладов Всерос. студ. конф. (г. Москва, 1–30 апреля 2021 г.). М.: Научная библиотека, 2021. С. 27–28. EDN: GKNTNA.
10. Corapi D., Morettini G., Pascoletti G., Zitelli C. Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by fused deposition modeling (FDM) technology // *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 24. P. 289–295. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.02.026>.
11. Alarifi I.M. A performance evaluation study of 3d printed nylon/glass fiber and nylon/carbon fiber composite materials // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 21. P. 884–892. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.085>.
12. Agarwal K.M., Shubham P., Bhatia D., Sharma P., Vaid H., Vajpeyi R. Analyzing the impact of print parameters on dimensional variation of ABS specimens printed using fused deposition modelling // *Sensors International*. 2022. Vol. 3. P. 100149. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>.
13. Потапов А.А., Говоров И.С., Гнидина И.В., Малахо А.П. Влияние технологических режимов FDM-печати и методов постобработки на физико-механические свойства образцов из ABS пластика // Новые полимерные композиционные материалы: матер. XX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Нальчик, 4–10 июля 2024 г.). Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2024. С. 92. EDN: BYVD0V.
14. Рябинина О.А., Левин Д.Ю., Свиридов Д.А., Алешина А.Э. Проблемы, возникающие в процессе литья по выглаваемым моделям с применением 3D печати методом FDM // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. ст. II Всерос. науч.-техн. конф. (г. Воронеж, 11–12 апреля 2024 г.). Воронеж: Университетская книга, 2024. С. 304–308. EDN: NNOYIB.
15. Распопина В.Б., Мартынова В.В., Ступина Е.А. Влияние направления печати по FDM-технологии на механические свойства изделия // *iPolytech Journal*. 2024. Т. 28. № 4. С. 477–487. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-477-487>. EDN: GFOMXF.
16. Joch R., Šajgalík M., Drbúl M., Holubják J., Czán A., Bechný V., et al. The application of additive composites technologies for clamping and manipulation devices in the production process // *Materials*. 2023. Vol. 16. Iss. 10. P. 3624. <https://doi.org/10.3390/ma16103624>.
17. Birosz M.T., Ledenyák D., Andó M. Effect of FDM infill patterns on mechanical properties // *Polymer Testing*. 2022. Vol. 113. P. 107654. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107654>.
18. Редькин Д.С., Левин Д.Ю., Рябинина О.А. Проблемы использования третьей координаты в лазерно-гравировальных станках // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. 2024. Т. 1. С. 303–307. EDN: VKHXXE.
19. Левин Д.Ю., Рябинина О.А., Кузовкин А.В. Оптимизация и унификация в процессе проектирования и производства универсального корпуса для лазерного гравера // Технологии и техника: пути инновационного развития: сб. науч. ст. II Междунар. науч.-техн. конф. (г. Воронеж, 14 июня 2024 г.). Воронеж: Университетская книга, 2024. С. 303–308. EDN: PZBZOK.
20. Ryabinina O.A., Boldyrev A.I. Digital twins of machining facilities application at mechanical industry // Антропоцентрические науки в образовании: вызовы, трансформации, ресурсы: сб. тр. конф. (г. Воронеж, 9–10 апреля 2024 г.). Воронеж: Университетская книга, 2024. С. 373–375. EDN: JKZDSU.

References

1. Ouazzani K., Jai M.E., Akhrif I., Radouani M., Fahime B.E. An experimental study of FDM parameter effects on ABS surface quality: roughness analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;127:151-178. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11435-9>. EDN: MJUJUL.
2. Mathew A., Kishore S.R., Tomy A.T., Sugavaneswaran M., Scholz S.G., Elkaseer A., Wilson V.H., Rajan A.J. Vapour polishing of fused deposition modelling (FDM) parts: a critical review of different techniques, and subsequent surface finish and mechanical properties of the post-processed 3D-printed parts. *Progress in Additive Manufacturing*. 2023;8:1161-1178. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00391-7>. EDN: ASYRUS.
3. Yuan Chai, Rachel W. Li, Diana M. Perriman, Song Chen, Qing-Hua Qin, Paul N. Smith. Laser polishing of thermoplastics fabricated using fused deposition modelling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;96:4295-4302. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1901-5>. EDN: YHUSYH.
4. Levin D., Kuzovkin A. Laser polishing as method of improving surface quality of fused deposition modeling (FDM) parts made by metal-filled plastic. In: *Antropocentricheskie nauki v obrazovanii: vyzovy, transformacii, resursy: sbornik nauchnykh statej Mezhdunarodnogo foruma professional'nogo obrazovaniya = Anthropocentric sciences in education: challenges, transformations, resources: Collected scientific articles of the International forum of*

professional education. 9–10 April 2024, Voronezh. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2024, p. 350-353. EDN: LXPTJB.

5. Keness E., Fonda K., Dzennaro M. Low cost 3D printing for science, education and sustainable development. Trieste: The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics; 2013, 192 p. (Russ. ed.: *Dostupnaya 3D pechat' dlya nauki, obrazovaniya i ustojchivogo razvitiya*).

6. He Feiyang, Alshammari Yo.L.A., Khan M. The effect of printing parameters on crack growth rate of FDM ABS cantilever beam under thermo-mechanical loads. *Procedia Structural Integrity*. 2021;34:59-64. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.009>.

7. Zapol'skiy I.S., Levin D.Yu., Ryabinina O.A. Analysis of problems arising during operation of desktop 3D printers with an open type of design. In: *Vestnik Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Avtomatizaciya: problemy, idei, resheniya «APIR-28»: sbornik nauchnyh trudov Nacional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Bulletin of Tula State University. Automation: problems, ideas, solutions «APIR-28»* Collected scientific works of the National scientific and technical conference with international participation 13–15 November 2023, Tula. Tula: Tula State University; 2023, p. 249-252. (In Russ.). EDN: FKOCZF.

8. Kumar R., Sharma H., Saran C., Tripathy T.S., Sangwan K.S., Herrmann C. A comparative study on the life cycle assessment of a 3D printed product with PLA, ABS & PETG materials. *Procedia CIRP*. 2022;107:15-20. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.003>.

9. Sivova A.N., Panya A., Dushechkina E.A. Production of plastic for 3D printing from recycled PET, ABS and PLA. In: *Studencheskaya nauchnaya vesna: sbornik tezisev dokladov Vserossijskoj studencheskoj konferencii = Student Scientific Spring: collection of abstracts of reports of the All-Russian Student Conference*. 1–30 April 2021, Moscow. Moscow: Nauchnaya biblioteka; 2021, p. 27-28. (In Russ.). EDN: GKNTNA.

10. Corapi D., Morettini G., Pascoletti G., Zitelli C. Characterization of a polylactic acid (PLA) produced by fused deposition modeling (FDM) technology. *Procedia Structural Integrity*. 2019;24:289-295. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.02.026>.

11. Alarifi I.M. A performance evaluation study of 3d printed nylon/glass fiber and nylon/carbon fiber composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;21:884-892. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.085>.

12. Agarwal K.M., Shubham P., Bhatia D., Sharma P., Vaid H., Vajpeyi R. Analyzing the impact of print parameters on dimensional variation of ABS specimens printed using fused deposition modelling. *Sensors International*. 2022;3:100149. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>.

13. Potapov A.A., Govorov I.S., Gnidina I.V., Malakho A.P. Influence of FDM printing technological modes and post-processing methods on the physical and mechanical properties of ABS plastic samples. In: *Novye polimernye kompozicionnye materialy: materialy XX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = New polymer composite materials: Proceedings of the 20th International scientific and practical conference*. 4–10 July 2024, Nal'chik. Nal'chik: Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; 2024, p. 92. (In Russ.). EDN: BYVD0V.

14. Ryabinina O.A., Levin D.Yu., Sviridov D.A., Aleshina A.E. Problems arising in the process of casting by the lost-wax process with 3D printing using the FDM method. In: *Perspektivy razvitiya tekhnologij obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii: sbornik nauchnyh statej II Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Development prospects of the processing technology and equipment in mechanical engineering: Collected scientific articles of the 2nd All-Russian scientific and technical conference*. 11–12 April 2024, Voronezh. Voronezh: Universitetskaya kniga; 2024, p. 304-308. (In Russ.). EDN: NNOYIB.

15. Raspopina V.B., Martynova V.V., Stupina E.A. Effect of FDM printing direction on the mechanical properties of products. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):477-487. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-477-487>. EDN: GFOMXF.

16. Joch R., Šajgalík M., Drbúl M., Holubják J., Czán A., Bechný V., et al. The application of additive composites technologies for clamping and manipulation devices in the production process. *Materials*. 2023;16(10):3624. <https://doi.org/10.3390/ma16103624>.

17. Birosz M.T., Ledenyák D., Andó M. Effect of FDM infill patterns on mechanical properties. *Polymer Testing*. 2022;113:107654. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107654>.

18. Redkin D.S., Levin D.Yu., Ryabinina O.A. Problems of using the third coordinate in laser engraving machines. *Innovacionnye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika*. 2024;1:303-307. (In Russ.). EDN: VKHXXE.

19. Levin D.Yu., Ryabinina O.A., Kuzovkin A.V. Optimization and unification in the process of design and fabrication of universal housing for laser engraver. In: *Tekhnologii i tekhnika: puti innovacionnogo razvitiya: sbornik nauchnyh statej II Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Technologies and equipment: innovative development trends: collected scientific articles of the 2nd international scientific and technical conference*. 14 June 2024, Voronezh. Voronezh: Universitetskaya kniga; 2024, p. 303-308. (In Russ.). EDN: PZBZOK.

20. Ryabinina O.A., Boldyrev A.I. Digital twins of machining facilities application at mechanical industry. In: *Antropocentricheskie nauki v obrazovanii: vyzovy, transformacii, resursy: sbornik trudov konferencii = Anthropocentric sciences in education: challenges, transformations, resources: collected papers of the conference*. 9–10 April 2024, Voronezh. Voronezh: Universitetskaya kniga; 2024, p. 373–375. EDN: JKZDSU.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Левин Дмитрий Юрьевич,
старший преподаватель,
кафедра графики, конструирования
и информационных технологий
в промышленном дизайне,
Воронежский государственный
технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14, Россия
✉ levin_du@cst-eg.ru

Подшибякин Максим Евгеньевич,
магистрант,
Воронежский государственный
технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14, Россия
yashirosh.kun@gmail.com

Рябинина Ольга Алексеевна,
аспирант,
Воронежский государственный
технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14, Россия
ryabinina_olya@mail.ru

Болдырев Александр Иванович,
д.т.н., профессор,
профессор кафедры технологии машиностроения,
Воронежский государственный
технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский просп., 14, Россия
aiboldyrev@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Болдырев Александр Иванович является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.06.2025 г.; одобрена после рецензирования 15.07.2025 г.; принята к публикации 30.07.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitrii Yu. Levin,
Senior Lecturer,
Department of Graphics, Design and
Information Technologies in Industrial Design,
Voronezh State Technical University,
14 Moskovsky Prospekt, Voronezh 394026, Russia
✉ levin_du@cst-eg.ru

Maksim E. Podshibyakin,
Master's Degree Student,
Voronezh State Technical University,
14 Moskovsky Prospekt, Voronezh 394026, Russia
yashirosh.kun@gmail.com

Olga A. Riabinina,
Postgraduate Student,
Voronezh State Technical University,
14 Moskovsky Prospekt, Voronezh 394026, Russia
ryabinina_olya@mail.ru

Aleksander I. Boldyrev,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Mechanical
Engineering Technology,
Voronezh State Technical University,
14 Moskovsky Prospekt, Voronezh 394026, Russia
aiboldyrev@mail.ru

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

Aleksander I. Boldyrev has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but she was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 06.06.2025; approved after reviewing 15.07.2025; accepted for publication 30.07.2025.



Повышение надёжности подшипника скольжения с керамической вкладкой

И.М. Панова^{1✉}, Ю.В. Синицына²

^{1,2}Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Резюме. Цель – поиск конструктивного решения, обеспечивающего надежную и долговременную работу узла трения с керамическим подшипником скольжения, которая достигается с помощью анализа и оптимизации напряженно-деформированного состояния керамической вкладки подшипника с учетом реальных условий нагружения подшипника скольжения. Конструирование подшипникового узла проводилось с учетом особенностей свойств керамических материалов, обладающих низкой прочностной надежностью при действии напряжений растяжения. Для повышения точности решения проводился учет неравномерности нагрузки в подшипнике скольжения и определение реальной площади контакта. Также учитывается то, что поверхность вкладыша находится в сложном напряженном состоянии, и поэтому расчет идет по эквивалентным напряжениям. Критерием является минимизация эквивалентных напряжений, что соответствует оптимальному натягу и обосновывает его выбор. Для анализа использован дискретно-континуальный способ метода конечных элементов с использованием вариационного принципа по методу Лагранжа. Программа для расчета позволяет получить значения эквивалентных напряжений в зависимости от натяга и выбрать его оптимальное значение. Анализ полученных результатов приводит к оптимизации геометрической формы керамической вкладки. Установлено, что в предложенной оригинальной конструкции подшипника скольжения возможно преодоление (в значительной степени) хрупкости, присущей керамическим материалам за счет минимизации растягивающих напряжений. Надежность работы подшипника скольжения и его долговечность повышены. Предложена оригинальная конструкция подшипника скольжения с керамической вкладкой. Данная конструкция позволяет использовать усовершенствованные керамические конструкционные материалы в подшипниках скольжения, что расширяет параметры эксплуатации узлов трения современных устройств. Преодоление хрупкости керамических материалов требует разработки специальных конструктивных приемов – по преодолению растягивающих напряжений за счет оптимально выбранных натягов, создающих напряжения сжатия во вкладке. Выбор оптимальных натягов может быть выполнен с помощью применения численных методов анализа напряженно-деформированного состояния, в частности метода конечных элементов.

Ключевые слова: триботехника, подшипник скольжения, керамические материалы, износ керамики, разрушение керамики, контактные напряжения

Для цитирования: Панова И.М., Синицына Ю.В. Повышение надёжности подшипника скольжения с керамической вкладкой // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 336–344. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-336-344>. EDN: SRHOPU.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Improving the reliability of a ceramic plain bearing

Irina M. Panova^{1✉}, Yulia V. Sinitsyna²

^{1,2}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. In this study, we search for a design solution to ensure a reliable and long-term operation of a friction unit with a ceramic plain bearing. To that end, the stress-strain state of the ceramic insert is optimized with respect to actual loading conditions. The bearing unit is designed accounting for the properties of ceramic materials, which show low strength reliability under the action of tensile stresses. To improve the solution accuracy, we determine the actual contact area, taking into account the load unevenness in the bearing. In addition, since the insert surface is assumed to be complexly stressed, the calculation is based on equivalent stresses. The criterion is to minimize equivalent stresses, which corresponds to the optimal tension justifying the bearing application. The analysis involves the discrete-continuous option of the finite element method with the variational principle according to the

Lagrange method. The calculation software provides for the values of equivalent stresses depending on tension and selects its optimal value. As a result of the performed analysis, the geometric shape of the ceramic insert is optimized. In the proposed design, the brittleness inherent in ceramic materials can almost be compensated by minimizing tensile stresses. Thus, the reliability and durability of the plain bearing increase. An original design of a plain bearing with a ceramic insert is proposed. This design allows advanced ceramic structural materials to be used in plain bearings, which extends the operational range of friction units. In order to overcome the fragility of ceramic materials, special design techniques should be developed to withstand tensile stresses through optimally selected tensions creating compressive stresses in the insert. Optimal tension parameters can be selected using numerical methods of stress-strain state analysis, in particular, the finite element method.

Keywords: tribotechnics, plain bearing, ceramic materials, ceramic wear, ceramic failure, contact stress

For citation: Panova I.M., Sinitsyna Yu.V. Improving the reliability of a ceramic plain bearing. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):336-344. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-336-344>. EDN: SRHOPU.

ВВЕДЕНИЕ

Безотказность и долговечность машин и механизмов напрямую связаны с работоспособностью подшипников. Подшипники скольжения часто эксплуатируются в тяжелых условиях: без смазки, в агрессивных средах и при повышенных температурах, а также высоких частотах вращения. Все эти факторы способствуют разрушению и увеличению коррозионно-механического износа подшипников и, следовательно, ведут к снижению показателей надежности и ресурса.

Однако, благодаря появлению новых видов износостойких материалов, в частности керамических, диапазон параметров эксплуатации подшипников расширяется.

Техническая керамика из материалов на основе карбидов, нитридов, оксидов металлов и неметаллов в ряде случаев является конкурентом традиционных металлических материалов, используемых в узлах трения. Вместе с тем отметим, что использование керамических материалов может быть успешным только при соблюдении ряда условий, выявлению и учету которых и посвящена данная работа. Самым решающим условием можно считать поиск конструктивного решения, обеспечивающего долговременную работу узла трения. В данной статье представлена оригинальная конструкция подшипника скольжения с керамической вкладкой, разработанная с учетом напряженно-деформированного состояния керамической вкладки.

Известно, что керамические материалы отличаются высокими показателями характеристик твердости и жесткости, имеют низкий коэффициент трения в паре со сталью и высокую устойчивость к коррозионно-механическому износу, а также обладают диэлектрическими свойствами и отсутствием намагничивания. Отметим, что эти харак-

теристики сохраняются как при максимально высоких температурах, так и при максимально низких. Кроме того, следует отметить высокую коррозионную стойкость в разных агрессивных средах и возможность работы при высоких скоростях вращения.

Реализация перечисленных свойств в узлах трения многих устройств могла стать возможной при отсутствии существенного недостатка технической керамики – низкой прочностной надежности [1–22]. Повышенная хрупкость керамики связана с неспособностью выдерживать незначительные растягивающие напряжения, поскольку на распространение трещины в керамике требуется примерно в тысячу раз меньше энергии, чем в металлах. Керамика относится к материалам, которые по-разному сопротивляются напряжениям растяжения и сжатия; так напряжения сжатия в керамике могут быть в 2-3 раза больше напряжений растяжения, но при этом не будет признаков разрушения. Указанной особенностью поведения керамических материалов под нагрузкой и следует воспользоваться.

Можно сделать вывод, что при работе детали в близких к всестороннему сжатию условиях является возможным в значительной мере преодоление существенного ограничения при использовании технической керамики [2].

Целью настоящей работы является разработка оригинальной конструкции подшипника скольжения, обладающего повышенной нагрузочной способностью за счет создания преобладающих напряжений сжатия в керамическом вкладыше подшипника.

УЧЕТ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ

Отметим, что в настоящее время известно о применении целого ряда относительно новых керамических материалов в узлах трения. Материалы на основе карбида и

нитрида кремния (SiC , Si_3N_4), являющиеся представителями традиционной неоксидной, химически инертной керамики, предпочтительно использовать для работы в агрессивных средах. Согласно данным, приведенным в работе [3], где описаны некоторые преимущества керамических материалов, они обладают достаточной прочностью при изгибе 300–500 МПа при достаточно малой плотности – 3,0–3,25 г/см³. Однако низкая трещиностойкость этого вида материалов не позволяет использовать их в высоконагруженных узлах трения.

Лучшими триботехническими характеристиками и более высокой нагрузочной способностью обладают гибридные керамические материалы на основе ZrO_2 и Al_2O_3 с добавками Y_2 [4].

Безусловно, перспективными являются циркониевые керамические материалы с наноструктурированными кристаллами, частично стабилизированными диоксидом циркония, которые легируют с редкоземельными элементами, что позволяет получать материалы с очень низкой пористостью. Благодаря данному свойству повышаются триботехнические характеристики и, что особенно значимо, вязкость разрушения, а также нагрузочная способность.

В качестве актуальных на сегодняшний день следует отметить керамоматричные композиты (КМК), в которых керамическая матрица армирована высокопрочными углеродными волокнами, успешно применяемыми ООО «Virial» для подшипников.

На рис. 1 показан подшипник скольжения с керамической вкладкой компании Virial, специализирующейся на выпуске износостойких подшипников скольжения из современных керамических материалов. Данные материалы отличаются высокой стойкостью к тепловым ударам, которая примерно в пять раз больше, чем у вышеупомянутых материалов. Ударная вязкость составляет 14–17 кДж/м, в то время как у SiC она всего 3–4 кДж/м. В работе [5] также отмечается, что пористая структура матрицы материала может удерживать смазку и способствует охлаждению КМК при работе в условиях повышенного трения. Вариантом использования КМК является материал с покрытием из монолитной керамики Virial. Для повышения износостойкости применяют нанесение покрытий,

легирование и модификацию поверхностного слоя. Следует отметить, что уже при изготовлении керамики в нее можно добавить твердые смазки, улучшающие работу подшипника скольжения. Для улучшения триботехнических свойств керамических материалов применяют формирование слоистой структуры поверхностного слоя. В работе [6] предложено насыщать поверхность трения парами селена (Se) и политетрафторэтилена (ПТФЭ) на основе теплостойкого тетрафторэтилена, что осуществляют при температуре 820°C в защитной камере. Такая обработка позволила снизить момент трения в подшипнике на 26–40%. Чаще всего разница в коэффициентах трения в металлических подшипниках и в подшипниках с применением керамических материалов может достигать 20–25%.

Особое внимание следует уделить точности изготовления и чистоте обработки поверхностей вала и вкладыша, что существенно снижает износ.

Таким образом, можно заключить, что на сегодняшний день существует целый ряд керамических конструкционных материалов, обладающих хорошими триботехническими свойствами, по многим показателям превосходящих традиционные подшипниковые материалы.

Подшипники скольжения бывают разными по конструкции, при этом величина зазора между валом и вкладышем влияет на положение вала [6] и его центрирование, значит,



Рис. 1. Подшипник скольжения с керамической вкладкой Virial

Fig. 1. Plain bearing with Virial ceramic insert

и на точность работы механизма. В случае использования керамических материалов зазор может быть минимальным. Проанализируем особенности трения в подшипнике скольжения. Трение в подшипнике сопровождается совокупностью поверхностных явлений в тонких слоях вала и керамической вкладки. Поверхность трения разрушается от многократно повторяющихся циклов деформирования, приводящих к зарождению усталостных трещин. Вместе с тем сохраняется положительный градиент механических свойств вглубь от поверхности, что и позволяет дольше сохранять работоспособность материала. Также отметим, что напряжения сжатия препятствуют развитию усталостных трещин. Сила трения в подшипнике может быть оценена по выражению:

$$F_{TP} = f(R + A_0 p_0) \quad (1)$$

где f – коэффициент трения в паре сталь–керамика; R – радиальная нагрузка в подшипнике; A_0 – реальная площадь контакта в начальный момент; p_0 – удельная сила молекулярного сцепления по выступам микронеровностей. Понятно, что эти параметры носят приближенный характер.

Как уже отмечено, поверхность керамического вкладыша разрушается от повторяющихся циклов деформирования, что является следствием циклически изменяющихся напряжений сдвига. В работе [7] отмечается, что хорошая износостойкость керамики обусловлена наличием перенесенного слоя (transfer layer), защищающего керамическую втулку при высоких скоростях скольжения. Это обстоятельство, а также наличие зазора в подшипнике позволяют пренебрегать силами межмолекулярного, адгезионного взаимодействия. В работе [8] установлено, что основной причиной износа являются напряжения сдвига, возникающие в локальных областях. Определение реальной площади зоны контакта затруднительно. Известны работы Штаермана [9] и других ученых, посвященные этой теме. Точных результатов получить в данный момент не удастся, т.к. исследование в данной области продолжается, однако можно воспользоваться приближенными оценками. На рис. 2 показано, что зона контакта ограничена некоторыми значениями углов контакта, а эпюра контактных напряжений носит серповидный характер.

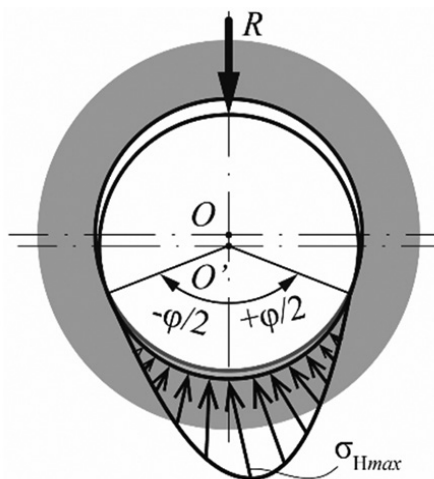


Рис. 2. Эпюра распределения контактных напряжений
 Fig. 2. Contact stress distribution diagram

Контактные напряжения, действующие на керамическую вставку в локальных областях контакта в радиальном направлении, а также сопутствующие им касательные напряжения создают сложное напряженное состояние в поверхностных слоях материала. Приведенный здесь анализ позволяет лишь приближенно оценить величину действующих напряжений. Расчет по формуле Ламе основан на уподоблении керамического вкладыша толстостенной трубе. Учитывая повышенную хрупкость керамических материалов, целесообразно иметь более точную картину напряженно-деформированного состояния, что позволит разработать конструкцию вкладыша и выбрать оптимальный натяг. Такой анализ может быть выполнен с применением численных методов теории упругости, в частности метода конечных элементов (МКЭ).

При этом потеря прочности поверхностного слоя наступает при достижении эквивалентным напряжением значений, близких к допускаемым, согласно выражению:

$$\sigma_{экв} = \frac{1-\gamma}{2} \sigma_H + \frac{1+\gamma}{2} \sqrt{(\sigma_H^2 + 4\tau^2)} \leq [\sigma], \quad (2)$$

где σ_i – контактные напряжения, МПа; τ – касательные напряжения, МПа; $[\sigma]$ – допускаемое контактное напряжение, МПа; γ – отношение:

$$\gamma = \frac{\sigma_{изг}}{\sigma_{сж}},$$

где $\sigma_{изг}$ – изгибающие напряжения, МПа; $\sigma_{сж}$ – напряжения сжатия, МПа.

Определить допускаемое напряжение можно по приближенной зависимости:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{сж}}{2,9} \quad (3)$$

Учитывая то обстоятельство, что усталостное разрушение начинается с поверхности керамической вставки, можно утверждать, что допускаемое напряжение зависит от твердости поверхности. Таким образом, механическая прочность керамических изделий, подвергаемых износу, помимо чистоты обработки поверхности, в значительной мере определяется твердостью поверхности [9]. Как правило, твердость керамики определяется по методу Виккерса с ограничением давления индентора, однако более приемлемым с целью исключения образования микротрещин следует считать метод Кнупа. При этом в качестве индентора используют алмазную пирамиду с ромбическим основанием, благодаря чему получается отпечаток, у которого продольная диагональ в 7 раз больше, чем поперечная, ее можно измерить достаточно точно; глубина внедрения меньше, что позволяет применить метод Кнупа для определения твердости покрытий из керамики. Заметим, что испытание на твердость керамики – это косвенная оценка стойкости поверхности к абразивному износу³⁻⁵. Поэтому допускаемое напряжение в формуле (1) рекомендуем также определять через твердость по Кнупу (3):

$$[\sigma] = C_1 C_2 HK, \quad (4)$$

где коэффициенты C_1 и C_2 зависят от вида керамики и условий смазки; HK – значение твердости по Кнупу. Из результатов выражений (3) и (4) будем ориентироваться на меньшее значение.

КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ХРУПКОСТИ

Ресурс работы подшипника может быть существенно повышен за счет правильно

выбранного натяга, с которым керамическая втулка установлена в стальную обойму, так как снижается усталостное трещинообразование, а контактное давление становится более равномерным. На рис. 3 представлена конструкция подшипника скольжения, в котором керамическая вставка установлена с натягом в стальную обойму и зажимается стальными клиньями с двух сторон.

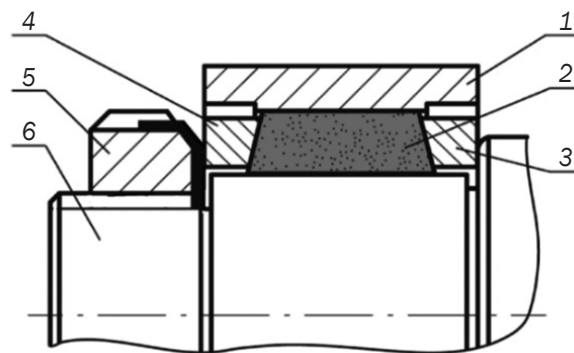


Рис. 3. Подшипник скольжения с керамической вставкой
Fig. 3. Plain bearing with ceramic insert

На рис. 3 в стальную обойму 1 установлена керамическая вставка 2 с оптимальным, рассчитанным натягом. Упомянутая вставка 2 сжимается с двух сторон клиньями 3 и 4 с помощью регулировочной шлицевой гайки 5, навинченной на резьбовой участок вала 6.

Учитывая действие контактного давления со стороны вала, можно ожидать, что при оптимальном натяге во вкладыше будут преобладать напряжения сжатия. Критерием оптимальности натяга является минимизация эквивалентных напряжений в поверхностном слое. Эквивалентные напряжения зависят от рабочих нагрузок, вызывающих действие контактных напряжений в локальных областях поверхности керамического вкладыша.

Для решения задачи нахождения оптимального натяга в зависимости от рабочих нагрузок следует использовать МКЭ. При использовании МКЭ наибольшее распространение имеет дискретно-континуальный подход. Керамическая втулка разбивается на систему некоторых элементов, контак-

³Проблемы определения твердости керамических материалов. Режим доступа: <https://www.qatm.com/ru/> (дата обращения: 10.05.2025).

⁴Преимущества технической керамики и твердых сплавов при применении в подшипниках. Режим доступа: <https://www.virial.ru/upload/medialibrary/48e/CerBearing.pdf> (дата обращения: 18.05.2025).

⁵Все о керамических подшипниках. Режим доступа: <https://www.bearing-spb.ru/articles/news/keramicheskie?ysclid=mf2t4jymxr356331224> (дата обращения: 18.05.2025).

тирующих друг с другом в дискретном множестве узловых точек. Материал при этом представляется изотропным. Можно представить втулку в виде набора торообразных элементов с меридиональным сечением в виде треугольников. Не останавливаясь на детальном изложении применения МКЭ для анализа напряженно-деформированного состояния керамического вкладыша, отметим, что согласно принципу минимума потенциальной энергии (\mathcal{E}_n) системы вектор перемещений \bar{U} , относящийся к равновесному состоянию и принимающий на поверхности вкладыша заданные значения, сообщает минимум функционалу энергии \mathcal{E}_n .

Из курса сопротивления материалов известно определение функционала энергии деформирования твердых тел, согласно которому полная энергия равна сумме потенциальной энергии деформации внутренних объемных сил и энергии внешних поверхностных сил. Полную энергию деформированного тела можно рассматривать как функционал, зависящий от функций, определяющих перемещения точек тела. Согласно вариационному принципу возможных перемещений Лагранжа, сумма работ внешних сил на малых перемещениях равна нулю.

Отсюда следует, что из всех возможных перемещений удовлетворяют условиям только те, при которых функционал энергии принимает минимальное значение. При этом необходимым условием минимума является равенство нулю частных производных по компонентам перемещений. Получаем систему линейных уравнений, количество которых в два раза превышает число узлов. После анализа результатов решения можно определить оптимальный натяг, уточнить размеры и форму керамического вкладыша исходя из характеристик механических свойств выбранного материала.

Таким образом, повышение надежности предложенного подшипника достигается за счет повышения вероятности безотказной работы при повышении износостойкости поверхности керамического вкладыша, по-

скольку в нем минимизированы растягивающие напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность применения керамических материалов в подшипниках скольжения связана с повышением требований к условиям эксплуатации узлов трения, в частности, при высоких температурах и в агрессивных средах. В статье приведены сведения о современных керамических материалах и их преимуществах перед традиционными металлическими материалами.

Вместе с тем широкому применению этих материалов препятствует их недостаточно высокая надежность, поскольку ее главным показателем является вероятность безотказной работы, которая напрямую связана с такими критериями работоспособности подшипника, как прочность и износостойкость. Низкая прочность изделий из керамики связана с хрупкостью под действием напряжений растяжения. Однако сопротивление керамики разрушению при напряжениях сжатия достаточно ощутимое.

В предложенной оригинальной конструкции подшипника скольжения керамический вкладыш находится в сложном напряженном состоянии с преобладанием напряжений сжатия. Анализ напряженно-деформированного состояния по методу МКЭ позволяет выбрать диапазон значений оптимального натяга при заданных значениях контактного давления в подшипнике и характеристиках выбранного материала, который обеспечит преобладание напряжений сжатия над напряжениями растяжения.

Таким образом, за счет минимизации растягивающих напряжений во вкладыше в предложенной конструкции при расчетном оптимальном натяге мы обеспечиваем преобладание напряжений сжатия над растяжением, тем самым повышается надежность подшипника за счет увеличения вероятности безотказной работы по главному критерию работоспособности подшипника скольжения – износостойкости.

Список источников

1. Панов А.Д., Панова И.М. Определение срока службы гибридных подшипников // Главный механик. 2019. № 2. С. 17–25. EDN: YWAIST.
2. Панова И.М. Особенности конструирования изделий из керамических материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 4. С. 45–50. EDN: PYMCPB.

3. Куличков С.В. Применение керамических материалов для повышения надежности узлов трения технологического оборудования // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: матер. III Междунар. науч.-техн. конф. (г. Петропавловск-Камчатский, 26 ноября 2020 г.). Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2021. С. 93–95. EDN: GAVGOP.
4. Алисин В.В. Циркониевые керамические материалы триботехнического назначения // Развитие науки и образования: монография. Чебоксары: Среда, 2019. Вып. 4. С. 5–16. <https://doi.org/10.31483/r-22125>. EDN: ZBSRYL.
5. Кулик В.И., Нилов А.С. Перспективы применения керамических материалов в узлах трения оборудования горнодобывающей промышленности // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2020. № 9. С. 52–57. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-9-52-57>. EDN: GNVXEZ.
6. Нуралин Б.Н., Куанышев С.М., Куанышев К.М., Куанышев М.К. Применение твёрдого антифрикционного композитного материала в конструкции подшипников скольжения // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 6. С. 61–64. EDN: XSLAHP.
7. Рошин М.Н. Исследование возможности уменьшения момента трения в подшипниках скольжения из циркониевой керамики // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2020. № 6. С. 11–14. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-6-11-14>. EDN: JMCJIS.
8. Савченко Н.А., Саблина Т.Ю., Кульков С.Н. Особенности трибологического поведения керамики на основе диоксида циркония в условиях высокоскоростного трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4-3. С. 857–862. EDN: PCLSVR.
9. Панова И.М., Синицына Ю.В. Анализ факторов, влияющих на ресурс керамических подшипников скольжения // Вестник науки. 2024. Т. 4. № 4. С. 697–708. EDN: CGYTVF.
10. Шевченко В.Я., Терещенко Г.Ф. Исследования, разработки и инновации в области керамических и стекло-материалов // Вестник Российской академии наук. 2000. Т. 70. № 1. С. 50–56.
11. Гаршин А.П. Керамика для машиностроения. М.: Научтехлитиздат, 2003. 384 с.
12. Шаталин А.С., Ромашин А.Г. Новые конструкционные материалы на основе керамики и композитов с керамической матрицей. Ч. 1. Конструкционные керамические материалы // Перспективные материалы. 2001. № 4. С. 5–16.
13. Лукин Е.С., Попова Н.А., Ануфриева Е.В., Сафина М.Н., Горелик Е.И., Сабурова И.Н. [и др.] Современная оксидная керамика и области ее применения // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. 2014. № 2. С. 30–39. EDN: TDOTYP.
14. Баринов С.М., Шевченко В.Я. Прочность технической керамики. М.: Наука, 1996. 159 с.
15. Эванс А.Г., Лэнгдон Т.Г. Конструкционная керамика: монография / пер. с англ. Л.П. Карпиловского, Б.И. Поляка; под ред. А.С. Власова. М.: Металлургия, 1980. 256 с.
16. Вовк М.Ю., Кулалаев В.В., Свонин П.А., Зюлькова М.В. Облик матричного керамического подшипника скольжения с пористой структурой для опоры ротора перспективного газотурбинного двигателя // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: сборник докладов Международной научно-технической конференции (г. Самара, 23–25 июня 2021 г.). Самара: Самарский нац. исследовательский ун-т им. акад. С.П. Королева, 2021. Т. 1. С. 207–208. EDN: DHJDWP.
17. Чернавский С.А. Подшипники скольжения. М.: Машгиз, 1963. 245 с.
18. Зубко А.И., Донцов С.Н. Исследование условий работоспособности и разработка диагностики керамических подшипников нового поколения // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. № 74. С. 16. EDN: SDZCFL.
19. Durazo-Cardenas I.S., Corbett J., Stephenson D.J. The performance of a porous ceramic hydrostatic journal bearing // Journal of Engineering Tribology. 2010. Vol. 224. Iss. 1. P. 81–89. <https://doi.org/10.1243/13506501JET570>.
20. Рошин М.Н. Исследование возможности уменьшения момента трения в подшипниках скольжения из циркониевой керамики // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2020. № 6. С. 11–14. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-6-11-14>. EDN: JMCJIS.
21. Сергерлинд Л. Применение метода конечных элементов: монография / пер. с англ. А.А. Шестакова; под ред. Б.Е. Победри. М.: Мир, 1979. 392 с.
22. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация / пер. с англ. Б.И. Квасова; под ред. Н.С. Бахвалова. М.: Мир, 1986. 318 с.

References

1. Panov A.D., Panova I.M. Determining service life of hybrid bearings. *Chief Mechanical Engineer*. 2019;2:17-25. (In Russ.). EDN: YWAIST.
2. Panova I.M. Design characteristics of ceramic materials products. *Proceedings of Higher Educational Institutions*. 2013;4:45-50. (In Russ.). EDN: PYMCPB.
3. Kulichkov S.V. Application of ceramic materials to improve the reliability of friction units of technological equipment. In: *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya: materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Technical operation of water transport: problems and development trends: Proceedings of the 3^d International scientific and technical conference*. 26 November 2020, Petropavlovsk-Kamchatskii: Kamchatka State Technical University; 2021, p. 93-95. (In Russ.). EDN: GAVGOP.
4. Alisin V.V. Zirconium ceramic materials for tribotechnical purposes. In: *Razvitie nauki i obrazovaniya = Development of science and education*. Cheboksary: Sreda; 2019, iss. 4, p. 5-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.31483/r-22125>. EDN: ZBSRYL.

5. Kulik V.I., Nilov A.S. Prospects for the use of ceramic materials in friction units of equipment in the mining industry. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2020;9:52-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-9-52-57>. EDN: GNVXEZ.
6. Nuralin B.N., Kuanyshev S.M., Kuanyshev K.M., Kuanyshev M.K. Application of solid antifriction composite material in the design of slide bearings. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2016;6:61-64. (In Russ.). EDN: XSLAHP.
7. Roshchin M.N. Investigation of the possibility of reducing the friction moment in sliding bearings made of zirconium ceramics. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2020;6:11-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-6-11-14>. EDN: JMCJIS.
8. Savchenko N.L., Sablina T.Yu., Kulkov S.N. Wear behavior of zirconia-based ceramics under high-speed friction. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(4-3):857-862. (In Russ.). EDN: PCLSVR.
9. Panova I.M., Sinitsyna Yu.V. Analysis of factors affecting service life of ceramic plain bearings. *Vestnik nauki*. 2024;4(4):697-708. (In Russ.). EDN: CGYTVE.
10. Shevchenko V.Ya., Tereshchenko G.F. Research, development and innovation in the field of ceramic and glass materials. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2000;70(1):50-56. (In Russ.).
11. Garshin A.P. *Ceramics for mechanical engineering*. Moscow: Nauchtekhizdat; 2003, 384 p. (In Russ.).
12. Shatalin A.S., Romashin A.G. New structural materials on the base of ceramics and composites with ceramic matrix. *Perspektivnye materialy*. 2001;4:5-16. (In Russ.).
13. Lukin E.S., Popova N.A., Anufrieva E.V., Safina M.N., Gorelik E.I., Saburina I.N., et al. Novel oxide ceramics and fields of its application. *News Academy of Engineering Sciences A.M. Prokhorov*. 2014;2:30-39. (In Russ.). EDN: TDOTYP.
14. Barinov S.M., Shevchenko V.Ya. *Technical ceramics strength*. Moscow: Nauka; 1996, 159 p. (In Russ.).
15. Evans A.G., Langdon T.G. *Structural ceramics*. California: Pergamon Press Ltd; 1976. (Russ. ed.: *Konstrukcionnaya keramika*. Moscow: Metallurgiya; 1980, 256 p.)
16. Vovk M.Y., Kulalayev V.V., Svodin P.A., Zulkova M.V. The appearance of a matrix ceramic journal bearing with a porous structure for the rotor support of a promising gas turbine engine. *Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya: sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii = Problems and Development Prospects of Engine Manufacturing: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. 23–25 June 2021, Samara. Samara: Samara National Research University named after academician S.P. Korolev; 2021, vol. 1, p. 207-208. (In Russ.). EDN: DHJDWP.
17. Chernavsky S.A. *Plain bearings*. Moscow: Mashgiz; 1963, 245 p. (In Russ.).
18. Zubko A.I., Dontsov S.N. Studying performance conditions and development of diagnostics for new generation ceramic bearings *Elektronnyj zhurnal "Trudy MAI"*. 2014;74:16. (In Russ.). EDN: SDZCFL.
19. Durazo-Cardenas I.S., Corbett J., Stephenson D.J. The performance of a porous ceramic hydrostatic journal bearing. *Journal of Engineering Tribology*. 2010;224(10):81-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.1243/13506501JET570>.
20. Roshchin M.N. Investigation of the possibility of reducing the friction moment in sliding bearings made of zirconium ceramics. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2020;6:11-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-6-11-14>. EDN: JMCJIS.
21. Segerlind L.J. *Applied finite element analysis*. New York; London; Sydney; Toronto: John Wiley and Sons; 1976. (Russ. ed.: *Primenenie metoda konechnykh elementov*. Moscow: Mir; 1979, 392 p.)
22. Zienkiewicz O., Morgan K. *Finite elements and approximation*. New York; Chichester; Toronto; Singapore: John Wiley and Sons; 1983. (Russ. ed.: *Konechnye elementy i approksimaciya*. Moscow: Mir; 1986, 318 p.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Панова Ирина Михайловна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры основ
конструирования машин,
Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана,
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул.,
д. 5, стр. 1, Россия
✉ pim-07@mail.ru

Синицына Юлия Владимировна,

к.т.н.,
доцент кафедры основ
конструирования машин,
Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана,
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул.,
д. 5, стр. 1, Россия
js.werris@bmstu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina M. Panova,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Machine
Design Fundamentals,
Bauman Moscow State Technical University,
5, 2nd Baumanskaya St., bld. 1, Moscow 105005,
Russia
✉ pim-07@mail.ru

Yulia V. Sinitsyna,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Machine
Design Fundamentals,
Bauman Moscow State Technical University,
5, 2nd Baumanskaya St., bld. 1, Moscow 105005,
Russia
js.werris@bmstu.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 25.06.2025 г.; одобрена после рецензирования 02.08.2025 г.; принята к публикации 17.08.2025 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 25.06.2025; approved after reviewing 02.08.2025; accepted for publication 17.08.2025.



Исследование возможностей концевых монокристаллических твердосплавных фрез для обработки заготовок деталей, имеющих градиент твердости

О.Е. Сысоев^{1✉}, Б.Я. Мокрицкий², А.В. Космынин³, Е.О. Сысоев⁴

¹⁻⁴Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия

Резюме. Цель – исследовать период стойкости концевых монокристаллических твердосплавных фрез при фрезеровании материалов заготовок деталей с твердостью основы HRC 40 при твердости поверхностного слоя HRC 65 и выше. Для обработки заготовок использовали концевые монокристаллические четырехзубые и девятизубые фрезы; контрольные фрезы были без покрытия. На исследуемых фрезах покрытия выполнялись многослойными, наноструктурированными толщиной до 5 мкм, которые наносили методом конденсации с ионной бомбардировкой на установке серии Булат. Были изучены покрытия трех видов. Первое выполнено из карбонитрида титана и слоя нитрида титана (TiCN+TiN); второе – смеси титана с алюминием и слоя оксида алюминия, смеси нитрида титана с алюминием и слоя оксида алюминия ((TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃). Третий вид покрытия состоял из карбонитрида титана со слоем нитрида смеси титана и алюминия, слоев оксида алюминия и карбида титана (TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC). Обрабатываемые заготовки имели наплавку поверхностного слоя твердостью выше HRC 61. Наплавку наносили с помощью установки дуговой сварки модели TST 350, дополненной сварочным полуавтоматом модели ПДГО–527-4А при использовании порошковой проволоки марки ПП-АН167. Установлено, что период стойкости девятизубой фрезы без покрытия и с покрытием превышает аналогичные периоды стойкости четырехзубой фрезы. По результатам экспериментов отмечено, что на девятизубой фрезе покрытие состава TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC более рационально, и по периоду стойкости превосходит покрытие (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃ во всем диапазоне скоростей резания. Получены зависимости периода стойкости от скорости резания отдельно для концевых монокристаллических твердосплавных девятизубых фрез и концевых монокристаллических твердосплавных четырехзубых фрез с различными многослойными наноструктурированными покрытиями. По выявленным зависимостям можно установить наиболее рациональные условия эксплуатации этих фрез. Результаты исследований могут использоваться при создании технологий изготовления деталей с твердостью поверхностного слоя выше HRC 65.

Ключевые слова: высокотвердый наплавленный слой, монокристаллические концевые фрезы с покрытиями, период стойкости концевых фрез, скорость резания

Для цитирования: Сысоев О.Е., Мокрицкий Б.Я., Космынин А.В., Сысоев Е.О. Исследование возможностей концевых монокристаллических твердосплавных фрез для обработки заготовок деталей, имеющих градиент твердости // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 345–352. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-345-352>. EDN: VBZSRP.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Study of solid carbide end mills for machining workpieces with hardness gradient

Oleg E. Sysoev^{1✉}, Boris Ya. Mokritskii², Alexander V. Kosmyinin³,
Evgeny O. Sysoev⁴

¹⁻⁴Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. The present paper sets out to investigate the service life of solid carbide end mills for machining workpieces with an HRC 40 base hardness and a surface layer hardness of HRC 65 and greater. For machining, solid carbide end mills with four and nine teeth were used; control mills were uncoated. The studied mills were coated with 5 µm thick multilayer nanostructured coatings applied using the condensation method with ion bombardment in a Bulat unit. Three types of coatings were studied, including titanium carbonitride with titanium nitride layer (TiCN+TiN);

a mixture of titanium and aluminum with aluminum oxide, mixed titanium and aluminum nitride, and aluminum oxide layers ($\text{TiAl}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$); titanium carbonitride with mixed titanium and aluminum nitride, aluminum oxide, and titanium carbide layers ($\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$). The surface layer hardness of workpieces exceeded HRC 61. The surfacing was applied using a TST 350 arc welding machine equipped with a PDGO-527-4A semiautomatic welding device with a PP-AN167 flux-cored wire. The service life of a nine-tooth mill, both coated and uncoated, was found to exceed that of a four-tooth mill. Experimental results show that $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ coating is more appropriate for a nine-tooth mill. This coating surpasses the $(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$ coating for the resistance period in the entire range of milling speeds. The dependencies of the tool life on the milling speed were separately obtained for solid carbide nine- and four-tooth end mills with various multilayer nanostructured coatings. The identified dependencies can be used to establish the most appropriate operating conditions for these mills. The research results can be used to develop technologies for manufacturing parts with a surface layer hardness above HRC 65.

Keywords: weld high-hard deposit, coated solid end milling cutters, service life of end milling cutters, cutting speed

For citation: Sysoev O.E., Mokritskii B.Ya., Kosmynin A.V., Sysoev E.O. Study of solid carbide end mills for machining workpieces with hardness gradient. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):345-352. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-345-352>. EDN: VBZSRP.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастание требований к условиям эксплуатации изделий в экстремальных условиях привело к необходимости разработки материалов, имеющих существенный градиент твердости от основного материала к тому, который находится на поверхности детали. Особенно это востребовано [1, 2] в космической технике и оборонной промышленности. Градиент твердости материала таких деталей может быть значительным.

В работе исследована обработка фрезерованием материалов заготовок деталей, твердость основы которых находится по шкале твердости Роквелла на уровне HRC 40, а твердость поверхностного слоя составляет HRC 65 и выше.

Испытаниям подвергали монокристаллические фрезы четырехзубые и девятизубые с покрытиями и без покрытий. Покрытия выполнены многослойными наноструктурированными, толщиной до 5 мкм. Их наносили методом конденсации с ионной бомбардировкой на установке серии Булат.

Покрытия были трех видов:

1) карбонитрид титана плюс слой нитрида титана $\text{TiCN}+\text{TiN}$;

2) смесь титана с алюминием плюс слой оксида алюминия плюс нитрид смеси титана с алюминием плюс слой оксида алюминия $(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$;

3) карбонитрид титана плюс слой нитрида смеси титана и алюминия плюс слой оксида алюминия плюс слой карбида титана $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$.

Далее показано, что влияние покрытий на период стойкости фрез различное. В том чис-

ле представлено, что период стойкости девятизубой фрезы без покрытия и с покрытием превышает аналогичные периоды стойкости четырехзубой фрезы. По результатам экспериментов было отмечено, что на девятизубой фрезе покрытие $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ более рационально, чем покрытие $(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$ во всем диапазоне скоростей резания. По периоду стойкости покрытие $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ превосходит покрытие $(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$.

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения экспериментальных данных были изготовлены и испытаны концевые монокристаллические твердосплавные четырехзубые и девятизубые фрезы. Четырехзубые фрезы имели длину 90 мм при длине цилиндрического хвостовика 50 мм и длине режущей части 25 мм. Диаметр режущей части – 10 мм. Радиус при вершине – 0,05 мм. Шаг винтовой линии – 315 мм, спираль правая, угол 30°. Затылок зубьев выполнен двойным, а именно под углом 12° на длине 0,8 мм и далее под углом 20°. Поднутрение у торца фрезы равно 2°, угол при перемычке составил 35°. Девятизубые фрезы имели длину 110 мм при длине цилиндрического хвостовика 70 мм и длине режущей части 30 мм. Диаметр режущей части – 21 мм. Радиус при вершине – 0,07 мм. Шаг винтовой линии – 315 мм, спираль правая, угол 30°. Затылок зубьев выполнен двойным, а именно под углом 10° на длине 0,9 мм и далее под углом 22°. Поднутрение у торца фрезы равно 3°, угол при перемычке – 30°.



Рис. 1. Фото фрез (США): а – двухзубая фреза с винтовой канавкой (модель T73748QTA Z161A 10mm16c 50L0751RTA 4FL STUB Z-CARB); б – четырехзубая фреза с крутой винтовой канавкой (модель 9FL GUTTER 16mm x 92mm 30RTA)

Fig. 1. An image of milling cutters (USA): a – two-tooth milling cutter with a helical flute (model T73748QTA Z161A 10mm16c 50L0751RTA 4FL STUB Z-CARB); b – four-tooth milling cutter with a steep helical flute (model 9FL GUTTER 16mm x 92mm 30RTA)

Внешне эти фрезы похожи на те, которые показаны на рис. 1. Отличаются диаметрами, числом зубьев, геометрическими параметрами и покрытиями.

Концевые монолитные твердосплавные фрезы были испытаны на образцах, содер-

жащих на поверхности высокотвердый слой. На рис. 2 показаны примеры наплавленного высокотвердого слоя и его обработки четырехзубой фрезой диаметром 10 мм.

Высота наплавленного слоя составляла 8–10 мм, твердость слоя – от HRC 65 до HRC 68.

Для наплавки использовали порошковую проволоку марки ПП-АН167. Наплавку осуществляли на установке дуговой сварки модели TST 350, дополненной сварочным полуавтоматом модели ПДГО – 527-4А (производитель ООО ПКФ «Кристалл», диаметр проволоки 1,8 мм).

Измерение величины износа фрез выполняли на мультисенсорном измерительном центре (видеоизмерительной системе) модели Микро Vu Sol 161, обеспечивающей точность измерения до 0,001 мм. Принята допустимой величина износа фрез 0,5 мм по задней грани.

На фрезы наносили покрытия, отличающиеся друг от друга. Покрытия наносили методом физического осаждения, а именно методом конденсации с ионной бомбардировкой (метод КИБ) на установке серии Булат (Россия). Общая толщина покрытий не превышала 5 мкм, покрытия выполнены многослойными наноструктурированными [3–5]. Скорость резания составляла 50 м/мин. А также 100, 150 и 200 м/мин при разных покрытиях на режущей части фрезы. Глубину резания применяли 0,5 мм, 1,0 мм и 1,5 мм последовательно. Подача во всех случаях составляла 0,05 мм на зуб.

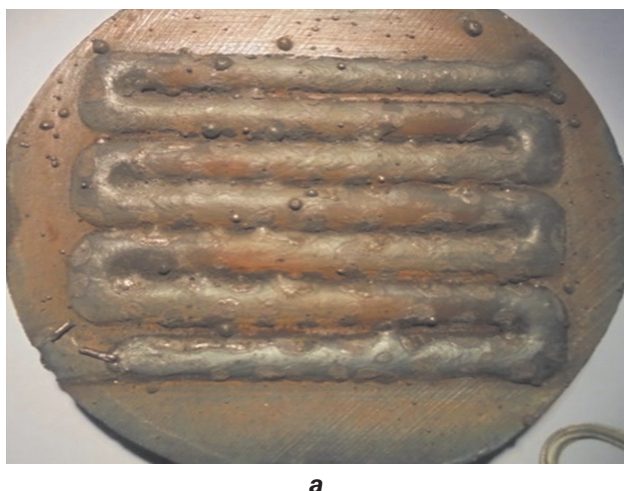


Рис. 2. Фото заготовки детали с наплавленным высокотвердым слоем (а) и фото обработки высокотвердого слоя с глубиной резания 1,5 мм четырехзубой монолитной твердосплавной фрезой диаметром 10 мм (б)

Fig. 2. An image of the workpiece with a weld high-hard deposit (a) and an image of high-hard deposit processing with the cutting depth of 1.5 mm using a four-tooth solid carbide milling cutter with the diameter of 10 mm (b)

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В общем виде полученные результаты приведены на рис. 3 и 4. На них графически иллюстрированы зависимости времени работы разработанных фрез от скорости резания. Показаны примеры для фрезы с четырьмя и девятью зубьями. Каждая из фрез имела одинаковые наноструктурированные многослойные покрытия, а именно:

1) слой карбонитрида титана плюс слой нитрида титана $\text{TiCN}+\text{TiN}$;

2) слой нитрида смеси титана с алюминием плюс слой оксида алюминия плюс нитрид смеси титана с алюминием плюс слой оксида алюминия $(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$;

3) слой карбонитрида титана плюс слой нитрида смеси титана и алюминия плюс слой оксида алюминия плюс слой карбида титана $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$.

Сведения об особенностях используемых покрытий содержатся в работах [6–8].

Анализ данных, приведенных на этих рисунках, позволяет заключить следующее:

1. Период стойкости девятизубой фрезы без покрытия и с покрытием превышает аналогичные периоды стойкости четырехзубой

фрезы. Это не противоречит работам [9–11]. Период стойкости фрезы без покрытия вырос с 4 до 9 мин при скорости 50 м/мин, т.е. в 2,25 раза. Период стойкости фрезы с покрытием $\text{TiCN}+\text{TiN}$ вырос с 6,5 до 13 мин, т.е. в 2 раза. Данное покрытие принято считать одним из востребованных типовых покрытий благодаря простоте его нанесения и, соответственно, низкой стоимости процесса нанесения.

Период стойкости фрезы с покрытием $(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$ вырос с 9 до 13 мин, т.е. в 1,4 раза. Период стойкости фрезы с покрытием $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ вырос с 14 до 20 мин, т.е. в 1,5 раза.

2. При скорости резания 50 м/мин влияние покрытия $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ на период стойкости оказалось более значимым, чем влияние иных покрытий. С увеличением скорости резания уровень влияния именно этого покрытия изменяется. При максимально использованной скорости резания 200 м/мин влияние покрытий минимизируется.

3. В отношении четырехзубой фрезы установлено, что покрытие $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ более рационально, чем покрытие $(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$ во всем

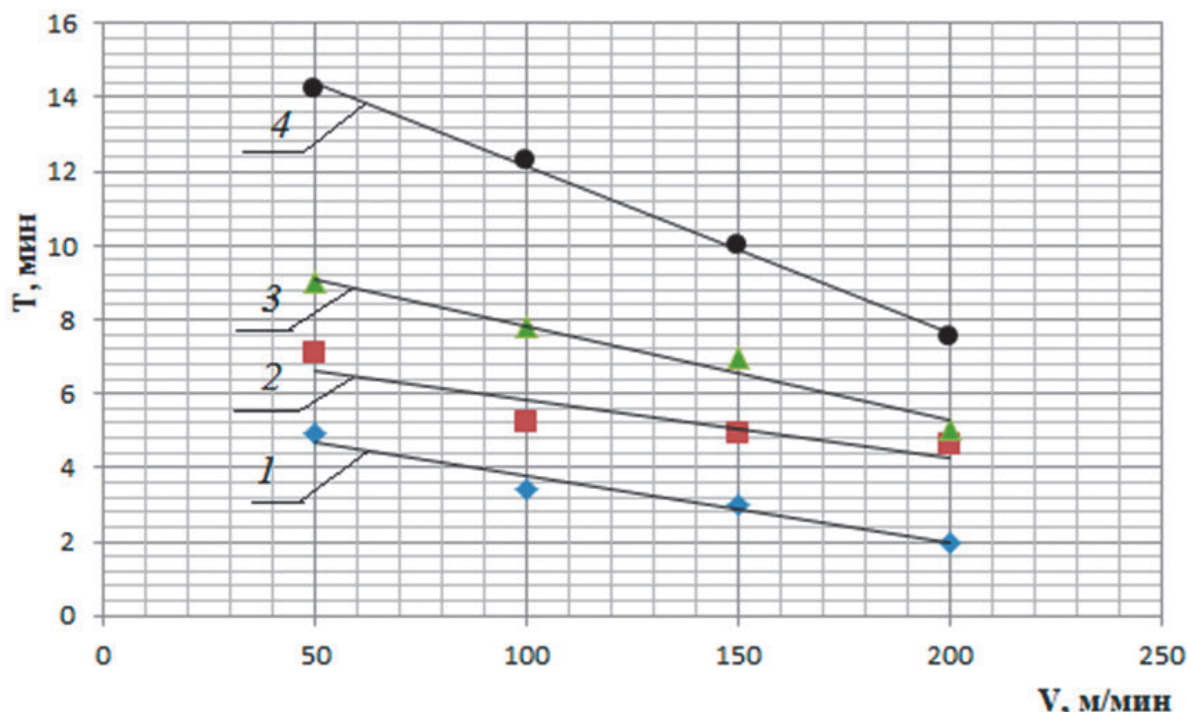


Рис. 3. График зависимости периода стойкости (T, мин) четырехзубой фрезы от скорости резания (V, м/мин): 1 – фреза без покрытия; 2 – фреза с покрытием $\text{TiCN}+\text{TiN}$; 3 – фреза с покрытием $(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$; 4 – фреза с покрытием $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$

Fig. 3. Graph of the four-tooth milling cutter life period (T, min) as a function of the cutting speed (V, m/min): 1 – uncoated milling cutter; 2 – $\text{TiCN}+\text{TiN}$ coated milling cutter; 3 – $(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3$ coated milling cutter; 4 – $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ coated milling cutter

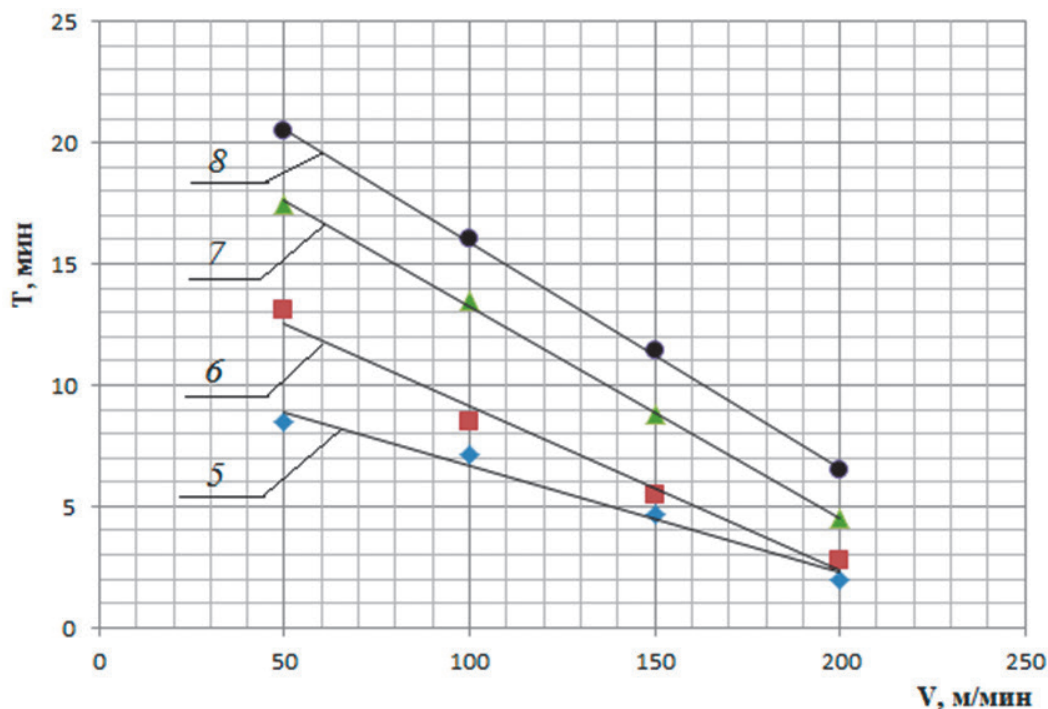


Рис. 4. График зависимости периода стойкости (T, мин) девятизубой фрезы от скорости резания (V, м/мин): 5 – фреза без покрытия; 6 – фреза с покрытием TiCN+TiN; 7 – фреза с покрытием (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃; 8 – фреза с покрытием TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC

Fig. 4. Graph of the nine-tooth milling cutter life period (T, min) as a function of the cutting speed (V, m/min): 5 – uncoated milling cutter; 6 – TiCN+TiN coated milling cutter; 7 – (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃ coated milling cutter; 8 – TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC coated milling cutter

диапазоне скоростей резания. По периоду стойкости покрытие TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC превосходит покрытие (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃ от 1,3 до 1,5 раза, причем с ростом скорости резания это превосходство растет.

4. В отношении девятизубой фрезы установлено, что покрытие TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC более рационально, чем покрытие (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃ во всем диапазоне скоростей резания. По периоду стойкости покрытие TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC превосходит покрытие (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃ от 1,5 до 3 раз, причем с ростом скорости резания это превосходство растет. Это не противоречит работам^{6,7} [12–14].

Соотношение периодов стойкости инструмента с разными покрытиями при различных скоростях резания представлено в таблице.

Из таблицы следует, что инструмент с покрытием TiCN+(TiAl)N+Al₂O₃+TiC превосходит инструмент с покрытием (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃ от 1,6 до 3 раз. Это объясняется тем, что в покрытии (TiAl)N+Al₂O₃+(TiAl)N+Al₂O₃ верхний слой выполнен из алмазоподобного материала Al₂O₃. Указанный материал отличается высокой твердостью. Когда истекает его работоспособность, то он, разрушаясь по механизму хрупкого межзеренного скола, разрушает и нижерасположенные слои покрытия.

Соотношение периодов стойкости инструмента с разными покрытиями при различных скоростях резания
 Correlation of different coating tool life periods and different cutting speeds

Скорость резания, м/мин	50	100	150	200
Соотношение видов покрытий фрез TiCN+(TiAl)N+Al ₂ O ₃ +TiC: (TiAl)N+Al ₂ O ₃ +(TiAl)N+Al ₂ O ₃	1,6	1,7	2,2	3,0

⁶Петрушин С.И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами: учеб. пособ. Томск: ТПУ, 2004. 204 с.

⁷Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник. М.: Машиностроение, 2009. 368 с.

В покрытии $\text{TiCN}+(\text{TiAl})\text{N}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ верхним слоем является карбид титана TiC . Этот материал TiC более устойчив к знакопеременным нагрузкам, при исчерпании работоспособности он разрушается по вязкому механизму, что более длительно. Кроме того, данный материал при вязком разрушении предохраняет нижерасположенный алмазоподобный слой Al_2O_3 от хрупкого разрушения и даже «заделывает» в нем образующиеся микротрещины, что также продлевает ресурс работоспособности инструмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные результаты исследования рациональности приме-

нения разработанных монокристаллических твердосплавных концевых фрез при обработке высокотвердых слоев, нанесенных на материал заготовки детали. При этом установлено, что период стойкости четырехзубой фрезы существенно ниже периода стойкости девятизубой фрезы. Вместе с тем эффект влияния разных покрытий для четырехзубой и девятизубой фрез аналогичен, а именно покрытия повышают период стойкости, и с ростом скорости резания эта эффективность увеличивается. Данный факт не противоречит сведениям, приведенным в работах [15–17].

Использование результатов и рекомендаций, указанных в статье, позволит развить знания, изложенные в работах [18–20].

Список источников

1. Киричек А.В., Лазуткин А.Г., Соловьёв Д.Л. Статико-импульсная обработка и оснастка для её реализации // СТИН. 1999. № 6. С. 20–24. EDN: SGDUUH.
2. Лазуткин А.Г., Киричек А.В., Степанов Ю.С., Соловьёв Д.Л. Механика нагружения поверхности волной деформации: монография. М.: Машиностроение, 2005. 150 с. EDN: QKZOGЕ.
3. Мокрицкий Б.Я., Мокрицкая Е.Б. Лезвийная обработка упрочненных материалов. Часть 3. Обработка заготовок деталей, упрочнённых наплавками высокой твёрдости // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17. № 11. С. 495–497. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-11-495-497>. EDN: KQMJLK.
4. Мокрицкий Б.Я., Скрипилёв А.А. Управление фрезерованием высокотвердых заготовок // Вестник машиностроения. 2022. № 12. С. 72–75. <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-12-72-75>. EDN: NIHITM.
5. Верещака А.А., Верещака А.С., Григорьев С.Н. Многослойно-композиционные наноструктурированные покрытия режущего инструмента, работающего в тяжелых условиях // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 12. С. 3–11. EDN: PUUJFF.
6. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями: монография. М.: Машиностроение, 1986. 192 с. EDN: PJARET.
7. Табаков В.П., Порохин С.С. Использование многослойных покрытий для повышения работоспособности режущего инструмента, работающего в стесненных условиях // Металлообработка. 2010. № 3. С. 40–44.
8. Chen Huajie, Zhou Aihui. Orbital-free density functional theory for molecular structure calculations // Numerical Mathematics Theory Methods and Applications. 2008. Vol. 1. Iss. 1. P. 1–28.
9. Барбышев Б.В., Путилова У.С., Некрасов Р.Ю., Некрасов Ю.И., Харитонов Д.А. Механика деформирования и разрушения при резании. Т. I. Нестационарный процесс резания: монография. Тюмень: ТюмГНГУ, 2012. 212 с. EDN: SXNHSZ.
10. Кабалдин Ю.Г., Киле А.А., Тараев С.П. Разрушение твердосплавного инструмента с покрытием при прерывистом резании // Вестник машиностроения. 1991. № 7. С. 32–35.
11. Wang Nina, Zhang Guangpeng, Ren Lijuan, Pang Wanqing, Wang Yupeng. Vision and sound fusion-based material removal rate monitoring for abrasive belt grinding using improved LightGBM algorithm // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 66. P. 281–292. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.014>. EDN: TWSEFS.
12. Криворучко Д.В., Залогов В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография. Сумы: Университетская книга, 2012. 496 с.
13. Григорьев С.Н., Метель А.С., Исайков А.Н., Мельник Ю.А. Осаждение упрочняющих покрытий с помощью универсальных источников ускоренных частиц и металлического пара // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 9. С. 36–40. EDN: PVJNKV.
14. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Fedorov S.V., Okunkova A.A., Pivkin P.M., Peretyagin P.Y., et al. Development of DLC-coated solid SiAlON/TiN ceramic and mills for nickel alloy machining: problems and prospects // Coatings. 2021. Vol. 11. Iss. 5. P. 532. <https://doi.org/10.3390/coatings11050532>. EDN: BSLLQF.
15. Vereschaka A.A., Mokritskii B.Ya., Sitnikov N.N., Oganyan G.V., Aksenenko A.Y. Study of mechanism of failure and wear of multi-layered composite nano-structured coating based on system $\text{Ti-TiN}-(\text{ZrNbTi})\text{N}$ deposited on carbide substrates // Journal of Nano Research. 2017. Vol. 45. P. 110–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110>. EDN: YUZOIN.
16. Vereschaka A., Oganyan M., Bublikov Yu., Sitnikov N., Deev K., Pupchin V., et al. Increase in efficiency of end milling of titanium alloys due to tools with multilayered composite nano-structured $\text{Zr-ZrN}-(\text{Zr,Al})\text{N}$ and $\text{Zr-ZrN}-(\text{Zr,Cr,Al})\text{N}$ coatings // Coatings. 2018. Vol. 8. Iss. 11. P. 395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>. EDN: KNRXMU.

17. Zhang Hua, Deng Zhaohui, Fu Yahui, Lv Lishu, Yan Can. A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 148. P. 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.077>.
18. Мокрицкий Б.Я., Верещагин В.Ю. Оценка напряженного состояния режущих элементов концевых твердосплавных составных фрез с покрытиями // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 421–434. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-421-434>. EDN: ODIAXA.
19. Fox-Rabinovich G.S., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Kovalev A.I., Dosbaeva G.K. Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions // *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 200. Iss. 5–6. P. 1804–1813. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.057>. EDN: LJEETH.
20. Chawla G., Kumar V., Sharma R. Neural simulation of surface generated during magnetic abrasive flow machining of hybrid Al/SiC/B₄C-MMCs // *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 2021. Vol. 7. Iss. 4. P. 153. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00587-4>. EDN: EMIASN.

References

1. Kirichek A.V., Lazutkin A.G., Soloviev D.L. Static-pulse processing and its implementation tooling. *Machines and Tooling*. 1999;6:20-24. (In Russ.). EDN: SGDUUH.
2. Lazutkin A.G., Kirichek A.V., Stepanov Yu.S., Soloviev D.L. *Mechanics of surface loading by a deformation wave: monograph*. Moscow: Mashinostroenie; 2005, 150 p. (In Russ.). EDN: QKZOG.
3. Mokritsky B.Ya., Mokritskaya E.B. Blade processing of hardened materials (in parts). Part 3. Processing of workpieces of parts hardened by high-hardness surfacing. *Strengthening technologies and coatings*. 2021;17(11):495-497. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-11-495-497>. EDN: KQMJLK.
4. Mokritskiy B.Ya., Skripilev A.A. Control of milling of highly hard workpieces. *Russian Engineering Research*. 2022;12:72-75. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2022-12-72-75>. EDN: NIHITM.
5. Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Grigoriev S.N. Nano-scale multilayered composite coatings for cutting tools used in heavy cutting conditions. *Strengthening technologies and coatings*. 2012;12:3-11. (In Russ.). EDN: PUUJFF.
6. Vereshchaka A.S., Tretiakov I.P. *Cutting tools with wear-resistant coatings: monograph*. Moscow: Mashinostroenie; 1986, 192 p. (In Russ.). EDN: PJARET.
7. Tabakov V.P., Porokhin S.S. Using multilayer coatings to improve the performance of cutting tools operating in confined spaces. *Metallrobrabotka*. 2010;3:40-44. (In Russ.).
Deformation and fracture mechanics when cutting. Vol. I. *Non-stationary cutting process: monograph*. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University; 2012, 212 p. (In Russ.). EDN: SXNHSZ.
10. Kabaldin Yu.G., Kile A.A., Taraev S.P. Coated carbide tool failure under intermittent cutting. *Russian Engineering Research*. 1991;7:32-35. (In Russ.).
11. Wang Nina, Zhang Guangpeng, Ren Lijuan, Pang Wanjin, Wang Yupeng. Vision and sound fusion-based material removal rate monitoring for abrasive belt grinding using improved LightGBM algorithm. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;66:281-292. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.014>. EDN: TWSEFS.
12. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A. *Cutting process modeling using the finite element method: methodological foundations: monograph*. Sumy: Universitetskaya kniga; 2012, 496 p. (In Russ.).
13. Grigoriev S.N., Metel' A.S., Isaikov A.N., Mel'nik Yu.A. Deposition of hardening coatings using universal sources of accelerated particles and metal vapor. *Strengthening technologies and coatings*. 2005;9:36-40. (In Russ.). EDN: PVJNKV.
14. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Fedorov S.V., Okunkova A.A., Pivkin P.M., Peretyagin P.Y., et al. Development of DLC-coated solid SiAlON/TiN ceramic and mills for nickel alloy machining: problems and prospects. *Coatings*. 2021;11(5):532. <https://doi.org/10.3390/coatings11050532>. EDN: BSLLQF.
15. Vereschaka A.A., Mokritskii B.Ya., Sitnikov N.N., Oganyan G.V., Aksenenko A.Y. Study of mechanism of failure and wear of multi-layered composite nano-structured coating based on system Ti-TiN-(ZrNbTi)N deposited on carbide substrates. *Journal of Nano Research*. 2017;45:110-123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.45.110>. EDN: YUZOIN.
16. Vereschaka A., Oganyan M., Bublikov Yu., Sitnikov N., Deev K., Pupchin V., et al. Increase in efficiency of end milling of titanium alloys due to tools with multilayered composite nano-structured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N coatings. *Coatings*. 2018;8(11):395. <https://doi.org/10.3390/coatings8110395>. EDN: KNRXMU.
17. Zhang Hua, Deng Zhaohui, Fu Yahui, Lv Lishu, Yan Can. A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*. 2017;148:174-184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.077>.
18. Mokritskii B.Ya., Vereshchagin V.Yu. Evaluation of the stressed state of cutting elements of coated end- milling hard-alloy combined cutters. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):421-434. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-421-434>. EDN: ODIAXA.
19. Fox-Rabinovich G.S., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Kovalev A.I., Dosbaeva G.K. Tribological adaptability of TiAlCrN PVD coatings under high performance dry machining conditions. *Surface and Coatings Technology*. 2005;200(5-6): 1804-1813. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.057>. EDN: LJEETH.
20. Chawla G., Kumar V., Sharma R. Neural simulation of surface generated during magnetic abrasive flow machining of hybrid Al/SiC/B₄C-MMCs. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 2021;7(4):153. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00587-4>. EDN: EMIASN.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сысоев Олег Евгеньевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры «Строительство и архитектура»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
✉ fks@knastu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5932-8893>

Мокрицкий Борис Яковлевич,

д.т.н., профессор,
профессор кафедры «Машиностроение»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
boris@knastu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

Космынин Александр Витальевич,

д.т.н., профессор,
проректор по науке и инновационной работе,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
avkosm@knastu.ru

Сысоев Евгений Олегович,

к.э.н., доцент,
профессор кафедры «Строительство и архитектура»,
Комсомольский-на-Амуре государственный
университет,
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,
пр. Ленина, 27, Россия
jonpochta@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 03.03.2025 г.; одобрена после рецензирования 16.04.2025 г.; принята к публикации 12.05.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg E. Sysoev

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Construction and Architecture
Department,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur
681013, Russia
✉ fks@knastu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5932-8893>

Boris Ya. Mokritskii,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Mechanical Engineering Department,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur
681013, Russia
boris@knastu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4727-9873>

Alexander V. Kosmynin,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Vice-Rector for Research and Innovation,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur
681013, Russia
avkosm@knastu.ru

Evgeny O. Sysoev,

Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor,
Professor of the Construction and Architecture
Department,
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin Prospect, Komsomolsk-on-Amur
681013, Russia
jonpochta@mail.ru

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 03.03.2025; approved after reviewing 16.04.2025; accepted for publication 12.05.2025.



Методика приведения исходных данных по ветроизмерениям к однородным в условиях местности со сложным рельефом

Н.В. Алиходжина^{1✉}, Д.А. Титов², М.Г. Тягунов³

¹⁻³Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Резюме. Цель – разработать методику, позволяющую привести исходные данные по ветроизмерениям, полученные с метеостанций, к условиям расположения ветроустановки или ветроэлектростанции с учетом рельефа местности. Для решения поставленной задачи предлагается использовать численное решение системы дифференциальных уравнений для условий турбулентной среды нижнего приземного слоя атмосферы (высота от поверхности земли не превышает 1000 м). В качестве объекта-аналога используется ветроустановка фирмы Kamai 300 кВт, установленная в пос. Усть-Камчатск. Используется упрощенная система уравнений, которая из-за специфики доступных исходных данных сводится к учету рельефа местности для определения величины скорости ветра на площадке ветроэлектростанции. Для определения рельефа используются спутниковые карты и известные таблицы приведенной шероховатости местности. Оценка применимости разработанной авторами методики, а также оценка влияния точности исходных данных для прогноза выработки ветроэлектростанции проводится на примере ветроресурсов в пос. Оссора, п-ов Камчатка. Показано, что предлагаемый подход позволяет снизить ошибку последующего прогноза выработки ветроэлектростанции до 15%. Кроме этого, предложенная методика не требует наличия большого числа лет наблюдений за суточным и годовым ходом изменения скорости ветра, что является актуальным для новых ветроэлектростанций. В связи с тем, что метеорологическая сеть предоставляет данные, актуальные для региона и описывающие его характеристики в целом, усложняется задача определения ресурса в конкретной точке региона с интервалом времени до 3-х ч. Предложенное решение касается как процесса проектирования, так и процесса эксплуатации ветроэлектростанции, т.к. позволяет получить распределение скорости ветра на площадке даже при условии использования данных, относящихся к региону большей площади.

Ключевые слова: модели прогнозирования скорости ветра, ветроэнергетика, возобновляемые источники энергии, метеорология, ветроизмерительный комплекс, эксплуатация ветроэлектростанции

Для цитирования: Алиходжина Н.В., Титов Д.А., Тягунов М.Г. Методика приведения исходных данных по ветроизмерениям к однородным в условиях местности со сложным рельефом // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 353–362. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-353-362>. EDN: XPQDFV.

POWER ENGINEERING

Original article

Method for normalizing initial data of wind measurements in complex terrain areas

Nadezhda V. Alikhodzina^{1✉}, Dmitry A. Titov², Michail G. Tyagunov³

¹⁻³National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia

Abstract. We set out to develop a method for normalizing the initial data of wind measurements obtained from meteorological stations for the terrain conditions of the wind turbine or power plant location. To solve the problem, we propose a numerical solution of a system of differential equations for the conditions of a turbulent environment in the lower surface layer of atmosphere at a height of 1000 m and less from the earth surface. The analogous object is a 300 kW Kamai wind turbine installed in Ust-Kamchatsk, Russian Federation. We use a simplified system of equations, which accounts for the terrain to determine the wind velocity at the wind power plant site. Satellite maps and well-known tables of reduced landscape roughness are used to determine the terrain. The feasibility of this method, as well as the effect of initial data accuracy on the forecast output of the wind power plant are assessed using the example of wind resources in Oссора, Kamchatka Peninsula, Russian Federation. The proposed approach reduces the error of the subsequent forecast for the wind power plant output to 15%. Moreover, the proposed method requires no long-term observations of daily and annual changes in wind

velocity, which is of particular importance for newly built wind power plants. The meteorological network provides data relevant for the region and describes its characteristics as a whole, thus complicating the determination of the resource at a specific point of the region with a time interval of up to 3 h. The proposed solution concerns both the design and operation of a wind power plant by allowing the site distribution of wind velocity to be obtained even when data for a larger region are used.

Keywords: wind speed forecasting models, wind energy, renewable energy sources, meteorology, wind measuring complex, wind farm operation

For citation: Alikhodzhina N.V., Titov D.A., Tyagunov M.G. Method for normalizing initial data of wind measurements in complex terrain areas. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):00-362. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-353-362>. EDN: XPQDFV.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях активного развития ветроэнергетики в России⁴, особенно для регионов с децентрализованным энергоснабжением, особое внимание следует обратить на совершенствование методик проведения ветроэнергетических расчетов. Долгое время при проведении подобных расчетов полагались на зарубежное программное обеспечение, которое давало удовлетворительные результаты, но не описывало каким образом они были получены [1]. На сегодняшний день по объему исследований в области составления прогнозов как скорости ветра на территории ветростанции, так и выдачи мощности самой ветростанции отечественные исследования сильно отстают от зарубежных. Этому способствовало несколько причин, одна из главных – особенности созданных расчетных моделей. Из-за специфики рельефа, отсутствию большого периода наблюдений, а также доступных данных все модели справедливы в регионах, для которых они созданы. В других же условиях они работают хуже или неприменимы вовсе. Исходными данными для ветроэнергетических расчетов всегда являются ветроресурсы конкретной области и региона в целом, т.к. выдаваемая ветроэлектрической установкой мощность зависит от скорости ветра. Расчет выработки в рамках технико-экономического обоснования строительства ветроэлектрической установки (ВЭУ) или графика выдачи мощности уже существующей ВЭУ ветроэлектростанции (ВЭС) начинается с определения скорости ветра на высоте ветроколеса и построения прогноза на различные временные интервалы.

Любые прогнозы ветра основываются на данных предыдущих наблюдений, которые

могут быть получены из открытых специализированных климатических баз данных^{5,6} [2]. В различных базах данных сведения о скорости ветра приведены для стандартной высоты флюгера на наземных метеостанциях (МС), которая составляет около 10 м. Чаще всего МС расположены в населенных пунктах или аэропортах, а местоположение предполагаемой площадки ВЭС не всегда совпадает с местом расположения МС. В этом случае возникает необходимость приведения ветровых ресурсов по данным ближайших МС с учетом ландшафтных особенностей местности к условиям площадки ВЭУ и дальнейшего их пересчета на высоту установки ветроколеса ВЭУ. На сегодняшний день в мировой практике отсутствует единая методика пересчета скорости ветра как по высоте, так и по ландшафту местности [3, 4].

В целом исследователи сошлись на том, что все методы прогноза мощности ВЭУ можно классифицировать на физические, статистические и с применением нейронных сетей [5]. По своей сути все методы делятся на два типа: статистические и с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) и машинного обучения. Данные приведены в табл. 1.

Однако мало где упоминается, на каких данных строились и проверялись модели. Прогноз выработки ВЭУ состоит из двух этапов: сначала определяется потенциальная выработка – на основе ветроресурсов, далее накладываются ограничения по режиму работы энергосистемы или дизельной станции, если ВЭУ работает в изолированной энергосистеме.

В данной статье рассматриваются вопросы влияния качества исходных данных на

⁴Global Wind Report for 2022. Режим доступа: <https://gwec.net/global-wind-report-2022> (дата обращения: 28.04.2025).

⁵Российский метеорологический сайт «Расписание погоды». Режим доступа: <http://www.rp5.ru> (дата обращения: 28.04.2025).

⁶The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. 2007. Режим доступа: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/documents/SSE6Methodology.pdf> (дата обращения: 29.04.2025).

Таблица 1. Классификация методик прогнозирования выработки ветроустановок
Table 1. Classification of methods for wind farm power generation prediction

Название группы методов	Примеры некоторых моделей	Наиболее подходящее применение
Статические модели [6–8]	ARMA (Auto-Regressive Moving Average)	от 1 до 10 ч
	ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving Average)	2,5 ч
Статистические методы и искусственные нейронные сети [9–12]	нейронная сеть высшего порядка RHONN (Recurrent High-Order Neural Networks)	от секунд до 3-х ч
	адаптивная нейро-нечеткая система вывода ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)	2,5 мин
Физические модели	численный прогноз погоды	среднесрочный и долгосрочный прогноз

ошибки прогноза мощности выработки ВЭУ при использовании моделей, основанных на ИНС. Также описывается методика приведения исходных данных с МС в точку расположения ветроизмерительного комплекса (ВИК) в условиях сложного рельефа местности.

Оценка применимости предлагаемой авторами методики проводится на примере данных по ветроресурсам в пос. Оссора, п-ов Камчатка. В связи с тем, что данный поселок не обладает установленным ветродизельным комплексом, но потенциально рассматривается для его установки, согласно программе развития региона, то в качестве объекта-аналога используется ВЭУ фирмы Камаі 300 кВт, установленная в пос. Усть-Камчатск.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В табл. 2 приводится информация по анализируемым ВИК и МС. Представлен общий период наблюдений на МС и ВИК, удаленность МС от площадки ВИК определялась по кратчайшему расстоянию по спутниковым картам. Данные МС предоставлены с интервалом 3 ч, т.е. всего 8 измерений в сутки, а на ВИК – с интервалом в 10 мин. Данные наблюдений МС и ВИК приведены к одинаковым интервалам времени. Также ввиду

разного расположения МС и ВИК данные первой приводятся к географическим условиям расположения ВИК, т.е. выполняется моделирование данных МС с учетом рельефа местности.

С учетом особенностей исходной информации и небольшого общего периода наблюдений прогноз выработки ВЭУ базируется на прогнозе ветра. Так как имеются данные по ВИК, то прогноз строится по трем моделям:

- данные с МС приводятся (пересчитываются) к условиям рельефа местности, где располагается ВИК или ВЭУ;

- смоделированные данные поднимаются по степенной зависимости [1] на высоту ветроколеса. Показатель степени определяется по модели турбулентной зависимости от скорости ветра. Построение данной модели описано в [13], здесь приводится только построенная зависимость;

- с помощью ИНС на фактических данных обучается модель, после чего по прогнозным данным по скорости ветра с МС строит прогноз мощности в точке расположения ВЭУ.

В случае отсутствия ВИК модели корректируются, и в качестве исходной информации берутся пересчитанные в необходимую точку данные с МС.

Таблица 2. Сведения по ветроизмерительному комплексу и метеостанции, расположенных в Оссоре на Камчатке России

Table 2. Information on the wind measuring complex and weather station located in Ossora in Kamchatka, Russia

Название	ВИК		Общий период наблюдений	Удаленность МС от ВИК, км
	широта	долгота		
Оссора ВИК	59° 13'	163° 03'632»	18.02.2011-04.07.2013	8
Оссора МС	59° 15'	163° 04'		

Для упрощения дальнейших расчетов строятся корреляционные зависимости, которые позволяют автоматизировать все этапы построения прогноза, а также легко корректируются по мере увеличения сроков наблюдений.

Модель суточного прогнозирования скорости ветра на площадке ВЭС с учетом турбулентности нижнего приземного слоя атмосферы. В практике планирования выработки ВЭС на кратковременный промежуток времени принято использовать данные по прогнозу скорости ветра с ближайшей метеостанции [14]. Чаще всего метеостанция расположена в десятках километров от ВЭС, кроме того, их разделяют различные объекты, которые оказывают существенное влияние на аэродинамику местности. В связи с этим для повышения точности прогнозирования выработки ВЭС требуются более точные данные по скорости ветра в точке расположения ВЭС.

Предлагается использовать данные метеостанций, приведенные к условиям рельефа местности, в котором располагается ВЭС, т.е. пересчитывать данные МС на условия точки расположения ВЭС.

Пересчет данных проводится по следующему алгоритму:

1) данные ближайшей метеостанции с часовым интервалом приводятся к условиям рельефа площадки расположения ВЭС с учетом турбулентности нижнего приземного слоя атмосферы (высота до 1000 м);

2) строится корреляционная зависимость между смоделированными данными с МС и местными данными с ВИК.

Рассмотрим более подробное описание каждого пункта алгоритма.

Моделирование данных ближайших МС на площадку расположения ВЭС и приведение их к условиям рельефа площадки с учетом турбулентности нижнего приземного слоя атмосферы. На формирование скорости и направления ветра влияет огромное количество факторов. На сегодняшний день нет модели, которая бы четко описала влияние каждого фактора [15]. В течение последних лет различные исследователи пытаются создать модель для учета всех факторов, влияющих на формирование профиля ветра, однако получаемые модели применимы только в конкретных условиях

и с рядом допущений [16–18]. Ранее была предпринята попытка построить модель, основанную на авторегрессии скользящего среднего (ARIMA), а также модель на основе статистическо-вероятностного подхода. Полученные модели эффективно работают на долгосрочных и среднесрочных прогнозах, однако для краткосрочных прогнозов они непригодны.

В связи с этим предлагается использовать готовое решение из гидротермодинамической метеорологии для приземного слоя атмосферы [19].

Система решаемых уравнений, которые используются для описания состояния атмосферных параметров, с учетом применяемых граничных условий, имеет вид (1)–(4) [19]:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial u}{\partial z}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$u \frac{\partial b}{\partial x} + \omega \frac{\partial b}{\partial z} = k \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - C \frac{b^2}{k} \quad (3)$$

$$k = -\chi c^{\frac{1}{4}} \sqrt{b} \frac{\frac{\partial u}{\partial z}}{\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}}, \quad (4)$$

где b – турбулентность; χ – постоянная Кармана.

Допущения, принятые с учетом исходных данных и для упрощения решаемой системы уравнений:

1) при работе в нижних слоях атмосферы (высота до 1000 м над уровнем земли) можно пренебречь лучистыми и фазовыми притоками тепла и упорядоченными вертикальными токами, поскольку их влияние в нижнем слое значительно меньше, чем влияние турбулентного и адвективного переноса;

2) ввиду того, что все ветроустановки располагаются на высоте ниже 300 м, следует, что высота $z \ll 1000$ м;

3) ось ox всегда сонаправлена с направлением ветра, значит, при $x < 0$ шероховатость поверхности z'_0 , а при $x > 0$ шероховатость поверхности z''_0 . Ось oy направлена вдоль границы раздела.

По результатам анализа численного решения системы уравнений (1)–(4) было выявлено, что:

- изменение скорости ветра в условиях сложного рельефа местности пропорционально логарифму шероховатости местности [19–22];
- в связи с особенностями исходных данных, которые есть в распоряжении ветроэнергетиков, решить численно систему (1)–(4) невозможно, поэтому авторы предлагают ввести сетку коэффициентов, которые будут учитывать изменения рельефа местности, и по ним проводить расчеты.

Метод приведения данных о скорости ветра МС в точку расположения ВИК основан на определении шероховатости местно-

сти и построения сетки поправочных коэффициентов. Шероховатость определяется по табл. 3 [23] на основании описания местности, если оно есть, либо по спутниковым картам.

Общий вид модели для приведения данных МС к условиям рельефа ВИК:

$$V_{\text{МС}}^{\text{ВИК}} = V_{\text{МС}} + \alpha \sum \ln\left(\frac{z_0'}{z_0''}\right), \quad (5)$$

где z_0' – шероховатость по табл. 3 для рельефа местности, с которого пересчитываем;

z_0'' – шероховатость по табл. 3 для рельефа местности, на который пересчитываем; α – коэффициент, учитывающий

Таблица 3. Классификация неровностей поверхности и рельефа
Table 3. Classification of surface and relief irregularities

№	Вид рельефа	Размер шероховатости Z_0 , см
1	Водная поверхность (море, озеро)	0,02
2	Снежная поверхность	0,05–0,1
3	Полностью открытый рельеф с гладкой поверхностью (взлетные полосы, ровные поля, скошенная трава)	0,24–0,5
4	Открытые области с небольшими лесозащитными полосами (равнины или небольшие холмы, пашня, травяные поля). Могут быть небольшие фермерские постройки, отдельно стоящие деревья или кустарники	1–3
5	Ровная, слегка холмистая местность, сельскохозяйственные угодья (поле с высокой растительностью, пшеничное поле) с несколькими зданиями и навесами высотой до 8 м, расположенными друг от друга на расстоянии около 1250 м	5
6	Ровная или слегка холмистая территория, хозяйственные земли с разбросанными областями построек и небольшими лесозащитными полосами, среднее расстояние между которыми составляет 1000 м	10
7	Сельскохозяйственные угодья с большим количеством зданий или навесами высотой до 8 м, с деревьями и кустарниками, расположенными друг от друга на расстоянии около 250 м	20–25
8	Территории с очень неровным рельефом, городские застройки, леса или сельскохозяйственные земли с многочисленными близкорасположенными лесозащитными полосами, среднее расстояние между которыми составляет несколько сотен метров	40
9	Болота с растительностью	60
10	Города с высокими зданиями	80–150
11	Большие города, мегаполисы с высокими зданиями и небоскребами	160–200

направление ветра. Определяется следующим способом: берутся ряды известных измерений скорости ветра на МС и ВИК, выбирается общий период наблюдений (в том числе часовые интервалы), затем сравниваются:

- если $V_{МС} < V_{ВИК}$, то $\alpha = -1$;
- иначе $\alpha = 1$.

Измеренные направления ветра не учитываются, потому что воздушный поток формируется климатическими параметрами, начиная с верхних слоев атмосферы, рельефом местности в целом, а также местными турбулентными потоками, поэтому данные с МС не учитывают часть параметров приходящего потока воздуха. Направление неучтенных потоков определить крайне сложно. К тому же все ВЭУ оборудованы механизмом поворота гондолы по направлению потока.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет проводился для известного периода времени, параметры расчета и зависимости приводятся в табл. 4. Указывается коэффициент корреляции для каждой модели, определенный относительно фактических измерений по скорости ветра или расчета мощности по мощностной характеристике ВЭУ по фактическим данным наблюдений на высоте ветроколеса.

Результаты сравнения полученного прогноза по двум моделям приведены в табл. 5. Скорость ветра, смоделированная по модели 1, обозначена $V_{ВИК}^{МОД}$ по МКП, а скорость ветра, смоделированная по модели 2, – $V_{ВИК}^{МОД}$ по ЛОГ (лог. – по логарифму).

Графическое отображение фактических данных и рассчитанных по предложенной модели представлено на рис. 1 и 2.

Таблица 4. Используемые для прогноза выработки ветроэлектрической установки зависимости
Table 4. Dependencies used to predict wind turbine power generation

Вид зависимости	Уравнение	Коэффициент корреляции
$V_{ВИК} = f(V_{МС}^{ВИК})$ (модель 1)	$V_{iВИК} = 0,8727 \cdot V_{iМС}^{ВИК} + 0,5817$	0,86
$V_{ВИК} = f(V_{МС}^{ВИК} \text{ мод.})$ (модель 2)	$V_{iВИК} = 0,9376 \cdot V_{iМС}^{ВИК} + 0,3168$	0,92
$m(I, V) = a(I) \cdot V^{b(I)}$	$I = 0,245 \cdot V_0^{(-0.35)} + 0,3168$ $a = -13,17I^5 + 38,96I^4 - 41,23I^3 + 18,25I^2 - 2,675I + 0,296$ $b = 32,26I^5 - 100,8I^4 + 112,0I^3 - 51,73I^2 + 8,470I - 0,492$ $m = a \cdot V^b$	0,95

Таблица 5. Сравнение показателей двух моделей по скорости ветра и по выработке
Table 5. Comparison of indicators of two models in terms of wind speed and power generation

Модель	Максимальная ошибка, %	Минимальная ошибка, %	Среднеквадратичное отклонение	Среднее отклонение
$V_{iВИК} = 0,8727 \cdot V_{iМС}^{ВИК} + 0,5817$	918	0,02	2,01 м/с	0,71 м/с
$V_{iВИК} = 0,9376 \cdot V_{iМС}^{ВИК} + 0,3168$	783	0,01	1,64 м/с	0,56 м/с
$N_{iВИК} = F(V_{iВИК}^{МОД} \text{ по МКП})$	850	0	32,5 кВт	25,8 кВт
$N_{iВИК} = F(V_{iВИК}^{МОД} \text{ по ЛОГ})$	380	0	30,2 кВт	19,9 кВт

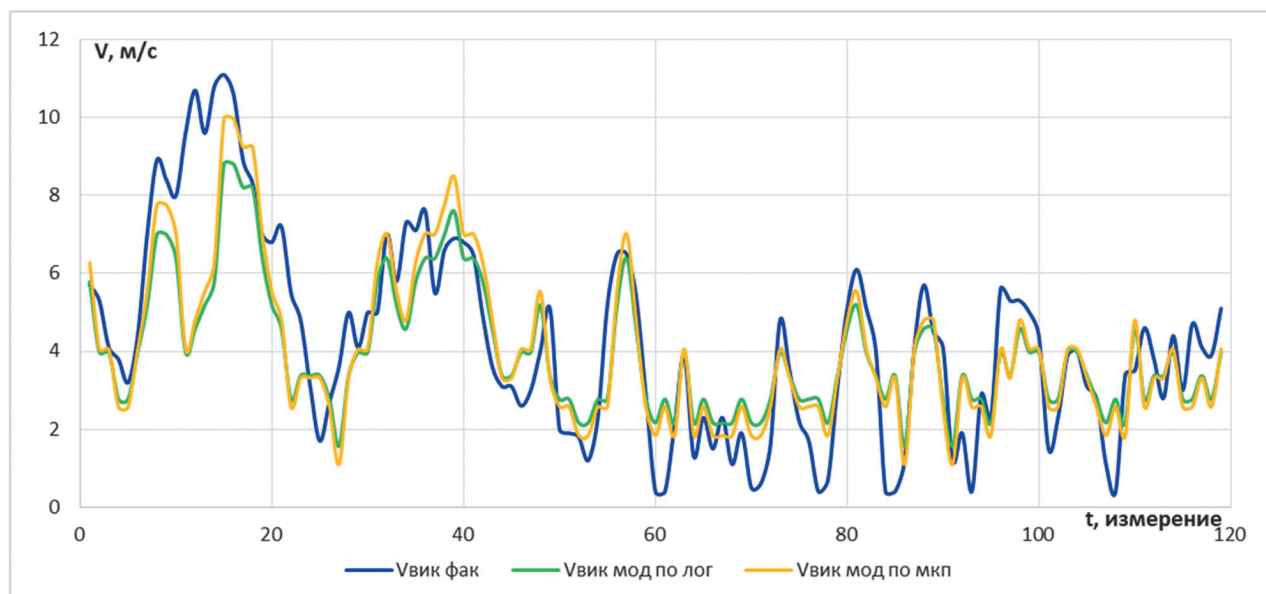


Рис. 1. Сравнение полученных результатов прогноза скорости ветра в точке расположения ВИК по моделям с фактическими данными

Fig. 1. Comparison of the obtained results of wind speed forecast in the wind measuring complex location using actual data models

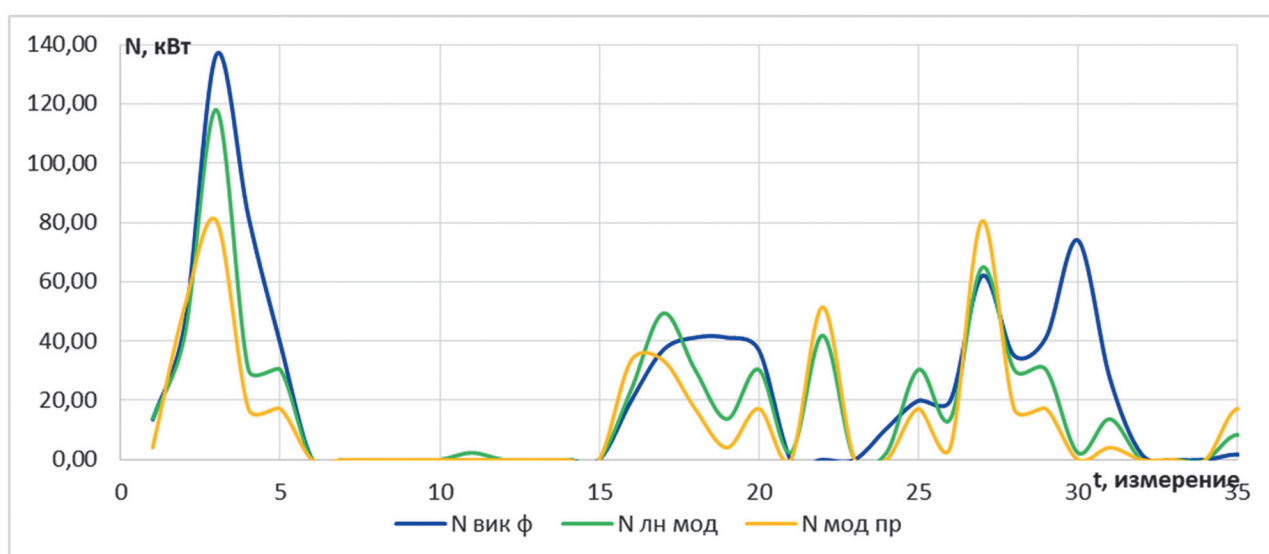


Рис. 2. Сравнение полученных результатов прогноза выработки ветроэлектрической установки по моделям с фактическими данными

Fig. 2. Comparison of the obtained results of wind turbine power generation forecast using actual data models

На графиках под временем t подразумевается порядковый номер измерения, сделанный в определенный период времени (точная привязка по дате и времени). Приводить реальную дату измерения нецелесообразно, т.к. данные взяты из истории измерений и сделаны в данном случае с интервалом в 3 ч. При наличии информации интервал между t_i и t_{i+1} могут составлять 1 ч или, например, 10 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам сравнения моделей было выявлено, что построение корреляционной зависимости при условии приведения данных к одним условиям рельефа дает приемлемые результаты: снижается среднеквадратичное отклонение и размах минимальных и максимальных ошибок. Анализ рабочих значений скорости ветра для ветроустановок от 3,5 до 22 м/с показал, что корреляционная

зависимость, построенная по приведенным данным в условиях сложного рельефа местности, дает лучшие результаты по сравнению с корреляционным предсказанием без учета указанных факторов.

По итогам проведенного анализа результатов расчетов и моделирования можно сделать следующие выводы:

- влияние качества моделей по опреде-

лению ветроресурсов в точке расположения ВЭУ на последующий прогноз ее выработки ощутимое;

- при высоком коэффициенте вариации нельзя гарантировать какие-либо результаты;
- необходимо увеличивать качество и объем исходной информации, чтобы совершенствовать системы обучения ИНС и модели прогноза.

Список источников

1. Дерюгина Г.В., Игнатьев Е.В., Метт В.Д. Апробация программного комплекса «Wind Turbine» // Вестник Московского энергетического института. 2023. № 4. С. 80–90. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2023-4-80-90>. EDN: IUCQQE.
2. Mortensen N.G., Landberg L., Troen I., Lundtang Petersen E. Wind Atlas analysis and application program (WASP) // User's guide. Risø National Laboratory, 1993. Vol. 2. No. 666. 134 p.
3. Зубарев В.В., Минин В.А., Степанов И.Р. Использование энергии ветра в районах Севера: состояние, условия эффективности, перспективы: монография. Л.: Наука, 1989. 208 с. EDN: AHDKIG.
4. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. М.: Атмограф, 2008. 581 с. EDN: QTFSXD.
5. Zhang Yagang, Kong Xue, Wang Jingchao, Wang Hui, Cheng Xiaodan. Wind power forecasting system with data enhancement and algorithm improvement // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2024. Vol. 196. P. 114349. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114349>.
6. Karasu S., Altan A., Saraç Z., Hacıoglu R. Prediction of wind speed with non-linear autoregressive (NAR) neural networks // Ağları ile Tahmini: 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (Antalya, 15–18 May 2017). Antalya: IEEE, 2017. P. 128703. <https://doi.org/10.1109/SIU.2017.7960507>.
7. Алиходжина Н.В., Дерюгина Г.В., Крупин Г.В. Суточный прогноз выработки ВЭС по данным наземной МС // Фёдоровские чтения – 2019 (г. Москва, 20–22 ноября 2019 г.). М.: МЭИ, 2019. С. 318–323. EDN: QVSESZ.
8. Niu Xinsong, Wang Jiyang. A combined model based on data preprocessing strategy and multi-objective optimization algorithm for short-term wind speed forecasting // Applied Energy. 2019. Vol. 241. P. 519–539. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.097>.
9. Kariniotakis G.N., Stavrakakis G.S., Nogaret E.F. Wind power forecasting using advanced neural networks models // IEEE Transactions on Energy Conversion. 1996. Vol. 11. No. 4. P. 762–767. <https://doi.org/10.1109/60.556376>.
10. Potter C.W., Negnevitsky M. Very short-term wind forecasting for Tasmanian power generation // IEEE Transactions on Power Systems. 2006. Vol. 21. No. 2. P. 965–972. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.873421>.
11. Ribeiro M.H.D.M., Da Silva R.G., Moreno S., Mariani V.C. Efficient bootstrap stacking ensemble learning model applied to wind power generation forecasting // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022. Vol. 136. P. 107712. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107712>.
12. Jiang Zheyong, Che Jinxing, Wang Lina. Ultra-short-term wind speed forecasting based on EMD-VAR model and spatial correlation // Energy Conversion and Management. 2021. Т. 250. Iss. 1-2. P. 114919. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114919>.
13. Дерюгина Г.В., Чернов Д.А., Тягунов М.Г., Алиходжина Н.В. Модели вертикального профиля ветра по данным ветроизмерительных комплексов полуострова Камчатка // Вестник Московского энергетического института. 2019. № 1. С. 35–42. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2019-1-35-42>. EDN: YWTSJV.
14. Дерюгина Г.В., Игнатьев Е.В., Голубков У.Ф. Методика разработки модели краткосрочного прогнозирования скорости ветра и выработки ветроэлектрической установки // Новое в российской электроэнергетике. 2024. № 10. С. 6–21. EDN: DJKAPZ.
15. Алиходжина Н.В., Тягунов М.Г., Шестопалова Т.А. Обзор существующих моделей и методов расчета основных характеристик ветра в определенной точке // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 3. С. 76–93. EDN: UXVION.
16. Зубакин В.А. Краткосрочное прогнозирование выработки ветровой электростанции // Энергетическая политика. 2022. № 8. С. 20–27. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2022_8174_20. EDN: VFNJCH.
17. Соловьев Б.А., Гамисония Г.К. Методы прогнозирования мощности ветра для шельфовых ветроэлектростанций // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. Т. 18. № 3-4. С. 108–120. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-108-120>. EDN: VUQXCF.
18. Lv Sheng-Xiang, Wang Lin. Deep learning combined wind speed forecasting with hybrid time series decomposition and multi-objective parameter optimization // Applied Energy. 2022. Vol. 311. Iss. 5. P. 118674. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118674>. EDN: IIPCWS.
19. Лайхтман Д.А., Юдин М.И. Трансформация нижнего слоя воздуха под влиянием подстилающей поверхности // Доклад АН СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1953. Т. 93. № 2. С. 249–252.

20. Орленко Л.Р. Строение планетарного пограничного слоя. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 270 с.
21. Надежина Е.Д. К вопросу о влиянии скачка шероховатости подстилающей поверхности на режим турбулентного пограничного слоя // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 1970. Вып. 257. С. 109–116.
22. Радикович В.М. Трансформация динамических характеристик воздушного потока под влиянием изменения шероховатости подстилающей поверхности // Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1971. Т. 7. № 12. С. 1241–1250.
23. Дербенцева А.М. Эрозия и охрана почв. Владивосток: Дальневосточный университет, 2006. 85 с.

References

1. Deryugina G.V., Ignatiev E.V., Mett V.D. Approbation of the wind turbine software package. *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2023;4:80-90. (In Russ). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2023-4-80-90>. EDN: IUCQOE.
2. Mortensen N.G., Landberg L., Troen I., Lundtang Petersen E. Wind Atlas analysis and application program (WASP). In: *User's guide*. Risø National Laboratory; 1993, vol. 2, no. 666, 134 p.
3. Zubarev V.V., Minin V.A., Stepanov I.R. *The use of wind energy in the North: state, efficiency conditions, prospects: monograph*. Leningrad: Nauka; 1989, 208 p. (In Russ). EDN: AHDKIG.
4. Nikolaev V.G., Ganaga S.V., Kudryashov Yu.I. *National inventory of wind energy resources of Russia and methodological principles for their determination*. Moscow: Atmosgraf; 2008, 581 p. (In Russ). EDN: QTFSXD.
5. Zhang Yagang, Kong Xue, Wang Jingchao, Wang Hui, Cheng Xiaodan. Wind power forecasting system with data enhancement and algorithm improvement. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2024;196:114349. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114349>.
6. Karasu S., Altan A., Saraç Z., Hacıoglu R. Prediction of wind speed with non-linear autoregressive (NAR) neural networks. In: *Ağları ile Tahmini: 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. 15–18 May 2017, Antalya. Antalya: IEEE; 2017, p. 128703. <https://doi.org/10.1109/SIU.2017.7960507>.
7. Alikhodzhina N.V., Deryugina G.V., Krupin G.V. Daily forecast of wind power generation based on ground-based MS data. In: *Fedorovskie chteniya – 2019 = Fedorov's Readings – 2019*. 20–22 November 2019, Moscow. Moscow: MEI; 2019, p. 318-323. (In Russ). EDN: QVSESZ.
8. Niu Xinsong, Wang Jiyang. A combined model based on data preprocessing strategy and multi-objective optimization algorithm for short-term wind speed forecasting. *Applied Energy*. 2019;241:519-539. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.097>.
9. Kariniotakis G.N., Stavrakakis G.S., Nogaret E.F. Wind power forecasting using advanced neural networks models. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1996;11(4):762-767. <https://doi.org/10.1109/60.556376>.
10. Potter C.W., Negnevitsky M. Very short-term wind forecasting for Tasmanian power generation. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2006;21(2):965-972. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.873421>.
11. Ribeiro M.H.D.M., Da Silva R.G., Moreno S., Mariani V.C. Efficient bootstrap stacking ensemble learning model applied to wind power generation forecasting. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022;136:107712. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107712>.
12. Jiang Zheyong, Che Jinxing, Wang Lina. Ultra-short-term wind speed forecasting based on EMD-VAR model and spatial correlation. *Energy Conversion and Management*. 2021;250(1-2):114919. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114919>.
13. Deryugina G.V., Chernov D.A., Tyagunov M.G., Alikhodzhina N.V. Wind shear profile models derived from the Kamchatka peninsula meteorological masts data. *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2019;1:35-42. (In Russ). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2019-1-35-42>. EDN: YWTSJV.
14. Deryugina G.V., Ignatiev E.V., Golubkov U.F. Methodology for developing a model for short-term wind speed forecasting and wind turbine power generation. *Novoe v rossijskoj elektroenergetike*. 2024;10:6-21. (In Russ). EDN: DJKAPZ.
15. Alikhodzhina N.V., Tyagunov M.G., Shestopalova T.A. An overview of existing models and methods for calculating the main characteristics of the wind at a certain point. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2024;16(3):76-93. (In Russ). EDN: UXVION.
16. Zubakin V.A. Short-term forecasting of wind farm generation. *Energy policy*. 2022;8:20-27. (In Russ). https://doi.org/10.46920/2409-5516_2022_8174_20. EDN: VFNJCH.
17. Solovev B.A., Gamisonia G.K. Wind power prediction methods for shelf wind power plants. *Electrical and data processing facilities and systems*. 2022;18(3-4):108-120. (In Russ). <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-108-120>. EDN: VUQXCF.
18. Lv Sheng-Xiang, Wang Lin. Deep learning combined wind speed forecasting with hybrid time series decomposition and multi-objective parameter optimization. *Applied Energy*. 2022;311(5):118674. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118674>. EDN: IIPCWS.
19. Laikhtman D.L., Yudin M.I. Lower air layer transformation under the influence of underlying surface. In: *Doklad AN SSSR = Report of the USSR Academy of Sciences*. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1953, vol. 93, no. 2, p. 249-252. (In Russ).
20. Orlenko L.R. *The structure of the planetary boundary layer*. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1979, 270 p. (In Russ).

21. Nadezhina E.D. Influence of a roughness jump of the underlying surface on the turbulent boundary layer mode. *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voejkova*. 1970;257:109-116. (In Russ).
22. Radikevich V.M. Transformation of air flow dynamic characteristics under the influence of underlying surface roughness variation. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fizika atmosfery i okeana*. 1971;7(12):1241-1250. (In Russ).
23. Derbentseva A.M. Soil erosion and protection. Vladivostok: Dal'nevostochnyj universitet; 2006, 85 p. (In Russ).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**Алиходжина Надежда Василевна,**

ассистент кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, Россия

✉ alikhojinanv@mpei.ru

Титов Дмитрий Анатольевич,

доцент кафедры математического и компьютерного моделирования, Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, Россия

titovda@mpei.ru

Тягунов Михаил Георгиевич,

д.т.н., профессор, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, Национальный исследовательский университет «МЭИ», 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, Россия

tiagunovmg@mpei.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**Nadezhda V. Alikhodzhina,**

Assistant Professor of the Department of Hydropower and Renewable Energy Sources, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 14/1, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

✉ alikhojinanv@mpei.ru

Dmitry A. Titov,

Associate Professor of the Department of Mathematical and Computer Modeling, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 14/1, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

titovda@mpei.ru

Mikhail G. Tyagunov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Hydropower and Renewable Energy Sources, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 14/1, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia

tiagunovmg@mpei.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 24.04.2025 г.; одобрена после рецензирования 30.05.2025 г.; принята к публикации 13.06.2025 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 24.04.2025; approved after reviewing 30.05.2025; accepted for publication 13.06.2025.



Analysis of the effectiveness of relative methods for power cable fault detection

Evgenii V. Zhilin¹, Daniil D. Levin²✉

^{1,2}University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

Abstract. The aim is to evaluate the effectiveness of relative methods used to locate faults of 6–10 kV power cables operated at an industrial enterprise. To achieve this goal, the reflectograms obtained on damaged power lines were compared with the reference ones. The research object is represented by three 6–10 kV power cables with paper-oil insulation, 900–3000 m long, and with a service life of more than 30 years. The type of damage to all power lines was a single-phase creeping discharge. The study employed various methods (TDR, ARC, ICE/Decay) to locate faults in the lines and the test rigs. The equipment used to detect cable fault locations included a REIS-305 reflectometer, a GVI 24.3000IDM high-voltage pulse generator, and a SDC50 current sensor. Multiple soundings of the power lines under study were performed to obtain reflectograms containing information about the distance to the fault location. As a result of the conducted research, varying in informativeness reflectograms of power cables were taken. We managed to select the true ones from them. Serious discrepancies in the shape of the displayed sounding pulse in the reflectograms were identified in comparison with the reference ones given in relevant technical literature. The article highlights issues concerning the application of the ARC method. The challenges consist in the breakdown voltage limitation at the cable faults. Each cable fault is shown to have its own characteristics. However, their causes are difficult to identify since it is impossible to establish the process of and the prerequisites for electric current passage when a short circuit arises. Drawing on the results of the undertaken study, a recommended algorithm was developed to determine the distance to the location of a power cable fault. However, due to the small amount of scientific research on this subject matter, no absolutely universal approach to this problem exists at present; its creation requires further investigation.

Keywords: fault location, cable line, reflectometer, reflectogram, creeping discharge, TDR, ICM, ARM

For citation: Zhilin E.V., Levin D.D. Analysis of the effectiveness of relative methods for power cable fault detection. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):363-375. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-363-375>. EDN: MCXLIB.

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 621.315

Анализ эффективности относительных методов поиска повреждений кабельных линий

Е.В. Жилин¹, Д.Д. Лёвин²✉

^{1,2}Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия

Резюме. Цель – оценить эффективность применения относительных методов определения мест повреждений кабельных линий 6/10 кВ, эксплуатируемых на промышленном предприятии, на основе сравнения рефлектограмм, полученных на поврежденных кабельных линиях, с эталонными. Объектом исследования служили три кабельные линии 6/10 кВ с бумажно-масляной изоляцией длиной 900–3000 м и со сроком эксплуатации более 30 лет. Тип повреждения всех кабельных линий – однофазный заплывающий пробой. В работе использовались различные методы поиска мест повреждений линий и применяемых испытательных установок: импульсный, импульсно-дуговой, метод колебательного разряда по току. В качестве оборудования для поиска мест повреждений выступали рефлектометр РЕИС-305, ударная установка ГВИ 24.3000ИДМ и присоединительное устройство по току SDC50. Производились многократные зондирования исследуемых кабельных линий с целью получения рефлектограмм, имеющих информацию о расстоянии до места повреждения. В результате проведенных исследований были сняты рефлектограммы кабельных линий различной информационной ценности, среди которых удалось отобрать истинные. Выявлены серьезные расхождения в форме отображаемого зондирующего импульса в рефлектограммах по сравнению с эталонными, приведенными в технической литературе. Отмечены проблемы при применении импульсно-дугового метода, заключающиеся в ограничении по напряжению пробоя в

месте повреждения. Также показано, что каждое место повреждения имеет свои особенности, причины которых являются сложными явлениями ввиду невозможности установить процесс и предпосылки протекания тока в момент возникновения короткого замыкания. По результатам проведенных исследований был составлен рекомендуемый алгоритм действий при определении расстояния до места повреждения кабельной линии. Однако ввиду малого количества научно-исследовательских работ по данной тематике абсолютно универсального подхода к определению мест повреждения кабельных линий в настоящий момент не существует, и его создание требует проведения дальнейших исследований.

Ключевые слова: определение места повреждения, кабельная линия, рефлектометр, рефлектограмма, запылающий пробой, TDR, ICM, ARM

Для цитирования: Жилин Е.В., Лёвин Д.Д. Анализ эффективности относительных методов поиска повреждений кабельных линий // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 363–375. (In Eng.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-363-375>. EDN: MCXLIB.

INTRODUCTION

One of the key issues in the operation of power cable lines (CL) is locating faults [1]. Currently, in the Russian Federation, the personnel of electrotechnical testing laboratories (ETL) use a specific set of absolute and relative methods to locate faults in CL [2]. When analyzing the configurations of modern mobile ETLs, as well as the market for fault location devices, it can be concluded that the relative method of impulse reflectometry is gaining popularity, while a number of methods such as the loop and capacitive methods are used extremely rarely or not used at all [3, 4]. Modern reflectometers are technically sophisticated devices that combine several methods for fault location in cable lines (CL) [5]. At the same time, ongoing improvements are being made in the methodology [6, 7], technology [8, 9], equipment [10, 11], and mathematical frameworks [12–14] methods used for fault location techniques. However, the primary method for identifying the fault zone in 6–10 kV CL remains the use of a reflectometer that implements the following techniques: Time-Domain Reflectometry (TDR), Impulse Current Method (ICM), Voltage Decay Method (Decay), and Arc Reflection Method (ARM) [4, 15]. The relevance of this study lies in the fact that current research scarcely addresses the problem

of the analysis of reflectograms for the relative determination of fault locations in operational CLs. Therefore, the aim of this study is to evaluate the efficiency of fault zone locating methods using 6–10 kV CL in operation at an urban industrial enterprise.

METHODS

The methods for determining the distance from the measurement point to the fault location are called relative methods. Relative methods do not guarantee high accuracy in pinpointing the fault location. However, they indicate the zone where the fault exists and enable the use of absolute methods within this zone. Absolute methods are those by which the fault location can be determined directly [2].

The paper considers reflectograms obtained using the following relative methods: TDR⁴, ICM⁵, ARM⁶. Relative methods for fault location are ways to determine the so-called fault zone. Their essence lies in determining the approximate distance to the fault in the cable line by connecting the instrument at one end of the line. Once the approximate fault zone is known, acoustic fault location techniques are applied within that zone. Preliminary identification of the fault zone is critically important, since 6–10 kV CL can be very long [15–22].

³RD 34.20.516-90. Guidelines for locating faults in power cables with voltage up to 10 kV. Moscow: ORGRES; 1991, 41 p. / РД 34.20.516-90. Методические указания по определению места повреждения силовых кабелей напряжением до 10 кВ. М.: ОРГРЭС, 1991. 41 с.

⁴Time-domain reflectometry (TDR) method. Theoretical foundations. Available from: <https://www.ersted.ru/stati/reflektometrija/osnovyi-reflektometrii/> [Accessed 1st March 2025] / Метод импульсной рефлектометрии (TDR). Теоретические основы. Режим доступа: <https://www.ersted.ru/stati/reflektometrija/osnovyi-reflektometrii/> (дата обращения: 01.03.2025).

⁵Impulse current method (ICE/Decay) for detecting high-resistance faults. Available from: <https://www.ersted.ru/stati/reflektometrija/metod-kolebatelnogo-razryada-ice-decay-opredeleniya-vysokoomnyih-povrezhdeniy/> [Accessed 1st March 2025] / Метод колебательного разряда (ICE/Decay) определения высокоомных повреждений. Режим доступа: <https://www.ersted.ru/stati/reflektometrija/metod-kolebatelnogo-razryada-ice-decay-opredeleniya-vysokoomnyih-povrezhdeniy/> (дата обращения: 01.03.2025).

⁶Arc reflection method (ARM) for detecting high-resistance faults. Available from: <https://www.ersted.ru/stati/reflektometrija/vyisokoomnyiy-defekt/> [Accessed 1st March 2025] / Импульсно-дуговой метод (ARM) определения высокоомных повреждений. Режим доступа: <https://www.ersted.ru/stati/reflektometrija/vyisokoomnyiy-defekt/> (дата обращения: 01.03.2025).

The object of study comprises three 10 kV CL with isolated neutral and paper oil insulation at a large enterprise located within an urban area of a metropolis. Cable lengths range from 900 m to 3000 m (Table).

All faults are single phase creeping discharges to ground, with transition resistance ranging from hundreds of k Ω to tens of M Ω and discharge voltages of 5–10 kV. These cable lines have been in service for over 30 years, which, according to GOST standards, exceeds the minimum service life⁷.

The equipment used for fault location included GVI 24.3000IDM units, the SDC50 current connection device, and the REIS 305 reflectometer. Connection diagrams for each

method and sample reflectograms are shown in Figs 1–3. For analysis and annotation of the reflectograms, we introduce a common marking to indicate pulse deviations: cursor 0 (the line start in ARM and TDR, and the start of the oscillatory interval in ICM) is marked by a green rhombus; cursor 1 (the fault location in ARM and TDR, and the end of the oscillatory interval in ICM) is marked by a red square; and the end of the cable line is marked by a blue circle.

TDR is the probing the CL with voltage pulses from the reflectometer, followed by receiving pulses reflected from the fault location and inhomogeneities in characteristic impedance, and determining the distance to the fault on the obtained reflectogram.

CL characteristics
Характеристики CL

No. CL	Length \approx , m	Approximate number of splices per km	Type of fault	Transition resistance, M Ω	Discharge voltage, kV	Distance to fault location, m
1	3000	16	Single phase creeping discharge	0,1–30 Fluctuating	5–10 Fluctuating	\sim 2400
2	2950	8				\sim 1800
3	920	10				\sim 430

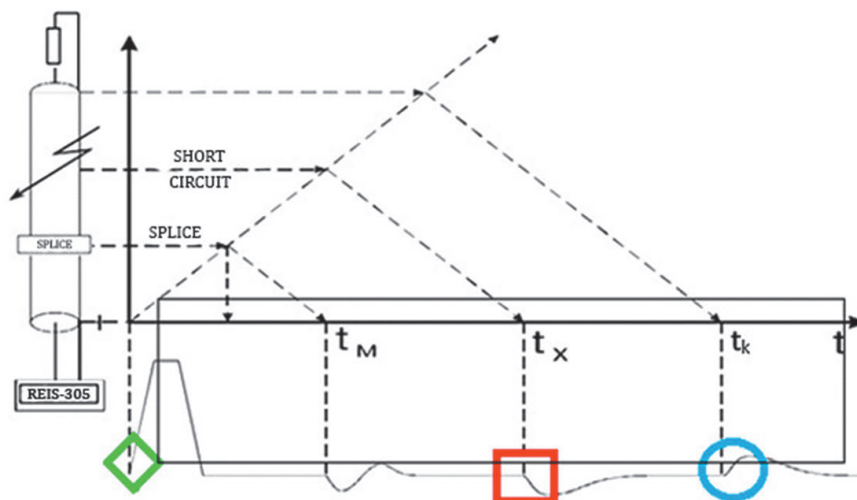


Fig. 1. Connection diagram and reflectogram of the TDR method

Рис. 1. Схема подключения и рефлектограмма TDR метода

⁷GOST 18410-73. Power cables with impregnated paper insulation. Specifications. Introduced on January, 1 1975 (replacing GOST 340-59, GOST 6515-55). Moscow: Publishing House of Standards, 1998. / ГОСТ 18410-73. Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией. Технические условия. Введ. 01.01.1975 (взамен ГОСТ 340-59, ГОСТ 6515-55.). М.: Изд-во стандартов, 1998.

A splice is displayed by alternating negative (down) and positive (up) pulse polarity (time t_m). A short circuit is displayed by a negative polarity pulse (time t_x). The end of the line or an “open circuit” type defect is displayed by a positive polarity pulse (time t_k). Only the REIS-305 is used for the implementation of this method.

ICM is a method when a discharge caused by a surge generator induces an oscillatory discharge process (decaying wave process). The device records these oscillations and outputs a current waveform (hereafter referred to as reflectograms in the text). The distance is measured between characteristic downward drops of the impulse, which represent the period of

the oscillatory process. Methodological guidelines recommend using the second period – between the second (green rhombus in Fig. 2) and third (red square in Fig. 2) downward drops. This interval reflects the distance to the damage location. This method employs the GVI-24.3000IDM in standard acoustic mode, the SDC50 current connection device, and the REIS-305 reflectometer.

ARM is a method when a discharge induced by a surge generator creates an electrical arc at the cable fault, the low impedance of which reflects the device probing impulse analogous to TDR. The method also involves comparing the reflectogram obtained by conventional TDR before the discharge with

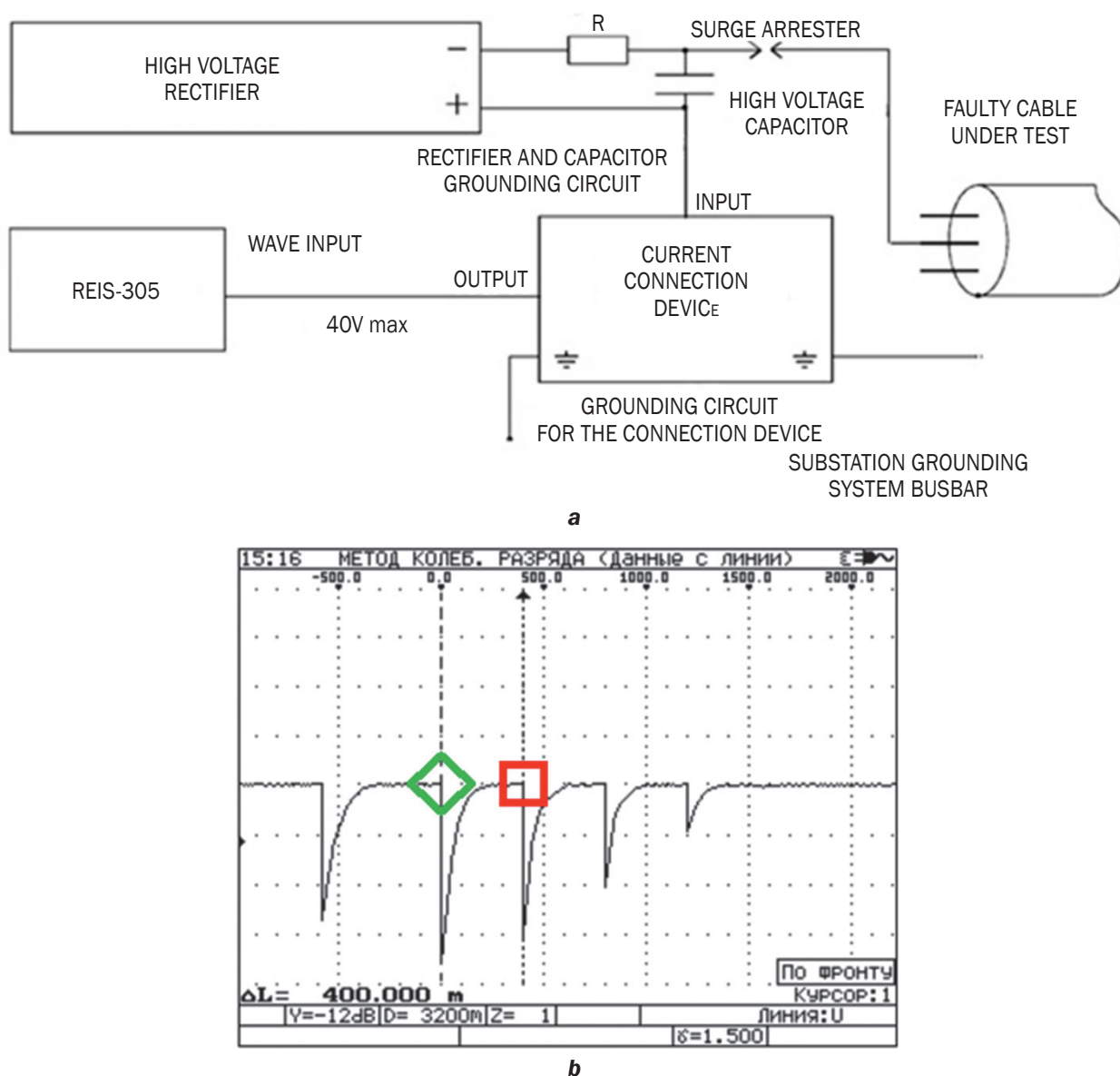


Fig. 2. Connection diagram and reflectogram for the ICM method: a – connection diagram; b – reflectogram

Рис. 2. Схема подключения и рефлектограмма ICM метода: а – схема подключения; б – рефлектограмма

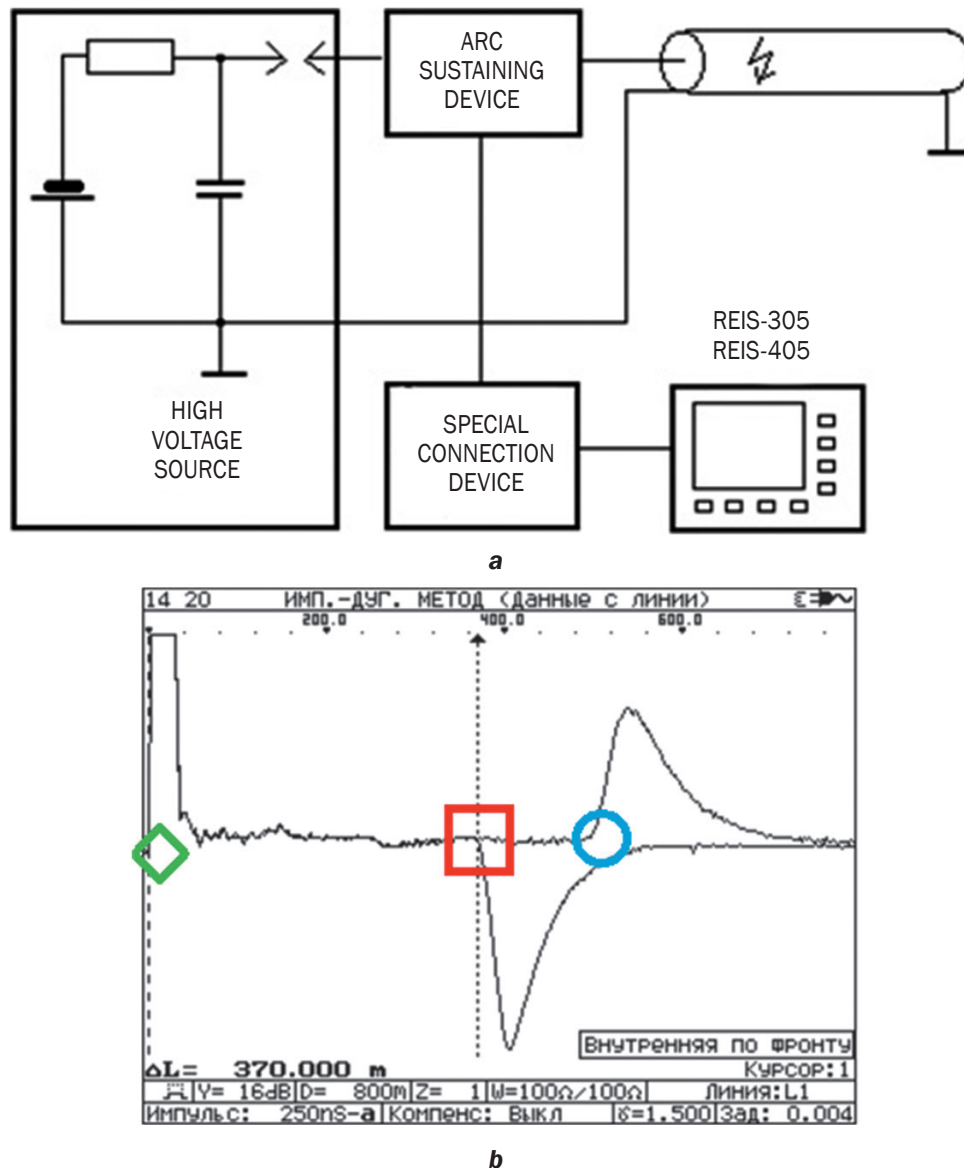


Fig. 3. Connection diagram and reflectogram for the ARM method: a – connection diagram; b – reflectogram

Рис. 3. Схема подключения и рефлектограмма ARM метода: а – схема подключения; б – рефлектограмма

the ARM reflectogram after the discharge, both displayed simultaneously on the device screen. The fault location is identified by the characteristic significant downward deflection of the pulse (red square in Fig. 3) relative to the pre discharge reflectogram. Because the arc extinguishes rapidly, an arc-sustaining choke is used as part of the surge generator to allow it to be detected by the probing signal. This method is implemented using a GVI 24.3000IDM unit in impulse arc mode and the REIS 305 reflectometer.

One feature of the REIS 305 in ARM mode is the ability to probe the CL with multiple pulses (up to ten), each with configurable start times and inter-pulse intervals.

Currently, ARM has become the predominant fault zone locating method due to its simplicity and high accuracy [16].

RESULTS

TDR on all investigated cable lines did not produce reflectograms that allowed determination of the distance to the fault location, which is due to high transition resistance and a large number of inhomogeneities in the CL.

On the first cable line (CL No.1), it was not possible to achieve a stable, readable reflectogram when working in ARM mode (Fig. 4), which shows two impulses – ARM and TDR respectively. Adjustments to signal gain and varying the timing intervals of the probing pulses

(measurements) also did not yield results. One of the conditions for confirming the validity of a reflectogram when working with this method is its multiple repetition during a series of discharges at the fault location. Besides the absence of a characteristic strong impulse reflection with negative polarity, a comparable positive polarity impulse can also be observed, as well as a series of inhomogeneities at the beginning of the line. It is impossible

to interpret this reflectogram unambiguously, so it was decided to utilize the ICM method; a stable, readable reflectogram was obtained through a series of discharges (Fig. 5).

It is worth noting that the appearance of the reflectogram differs significantly from the one provided in the device operating manual – downward peaks are followed by upward peaks⁸. However, considering the distinct downward drops at the location of the green

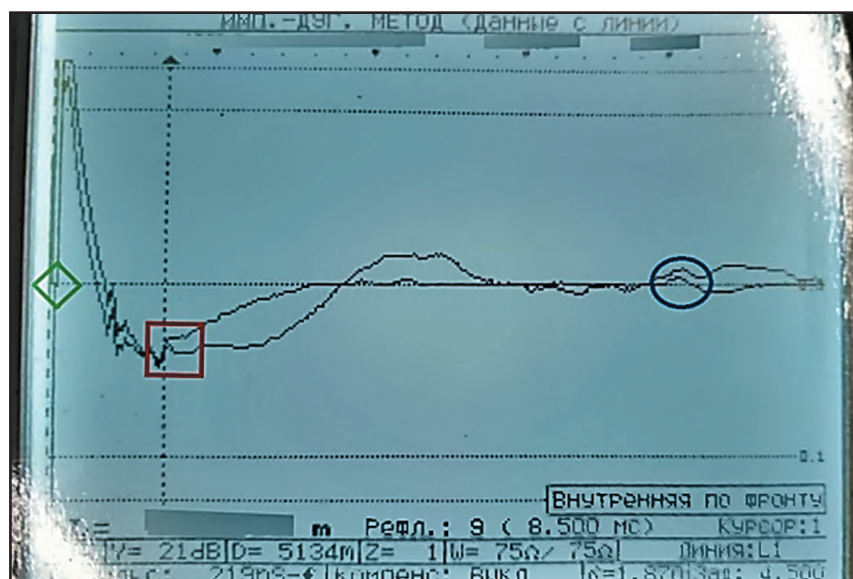


Fig. 4. Reflectogram when using ARM on CL No. 1

Рис. 4. Рефлектограмма при использовании ARM на CL № 1

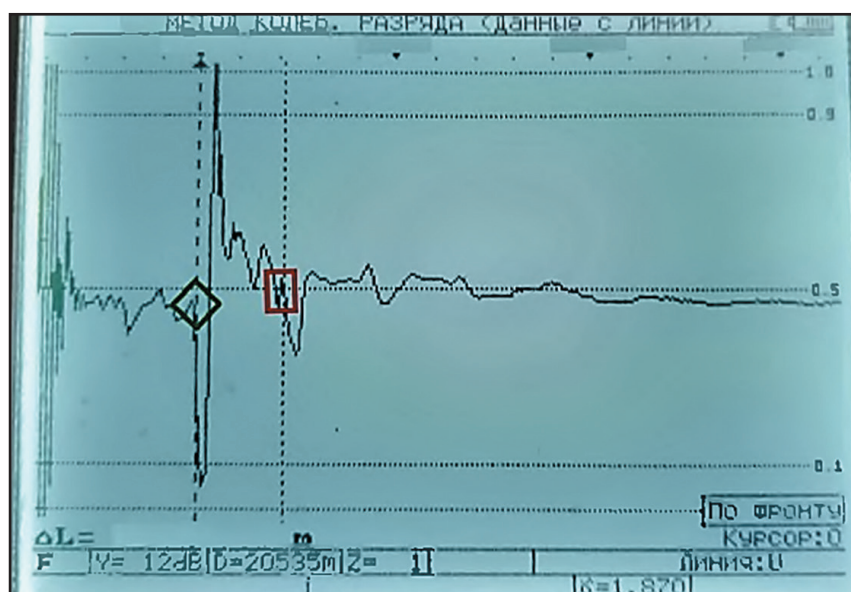


Fig. 5. Reflectogram when using ICM on CL No. 1

Рис. 5. Рефлектограмма при использовании ICM на CL № 1

⁸REIS-305 Reflectometer. Operation manual. Bryansk: Electrical line testing systems, 2014. 86 p./ Рефлектометр РЕЙС-305. Руководство по эксплуатации. Брянск: Системы тестирования электрических линий, 2014. 86 с.

rhombus and the red square, it was decided that this reflectogram was valid, after which the ARM method was applied again. The ICM made it possible to determine at what distance the correct negative polarity pulses are located.

Repeated application of the ARM method still did not yield a stable or accurate reflectogram; however, knowing the approximate distance from two previous discharges made it possible to obtain the reflectogram shown in Fig. 6.

It is worth noting that during the previous procedures, the discharge voltage in CL No.1 decreased to 5–6 kV. Based on the results in Figs. 5 and 6, a decision was made to define the fault zone. Further on-site determination using the acoustic method confirmed the results obtained from both the ARM and ICM methods. Notably, in this case, the readings from the two methods coincided within 0.1 meters.

For CL No. 2, series of repeated reflectograms were obtained using the ARM method. Fig. 7 shows three of the most stable and readable reflectograms for comparison with the ICM method. Based on the results, it was difficult to determine the fault location due to their inconsistency, as the presumed fault zone (red square) is located at different distances.

ICM in this situation had a less readable reflectogram; however, considering the shape

of the oscillatory process on the previous cable line and the stable repetition of the same curve, a suitable reflectogram was identified (Fig. 8). After analyzing the ICM results, it was concluded that the true ARM reflectogram is the one shown in Fig. 7(c), which was confirmed on-site using the acoustic fault location method. The difference in distance between the two methods on this cable line was 100 m. ARM showed the more accurate location of the fault. It should be noted that during the determination of the fault zone, the discharge voltage and transition resistance did not change.

On the third cable line (CL No. 3), ARM could not be applied. During the determination of the fault zone, the discharge voltage increased to 15 kV, and it was not possible to achieve stable arc burning at the fault location. In this situation, only the ICM method was applied, which almost immediately produced a form of oscillatory process that did not change during a series of discharges (Fig. 9).

Further on-site determination using the acoustic method confirmed the results of ICM. The discharge voltage and the value of the transition resistance did not change, and the discrepancy on site was no more than 7 m.

We should make an important note that the use of fault burning on these CL was not considered due to a prohibition on its application, which was caused by sections of the route passing through cable structures. Prior

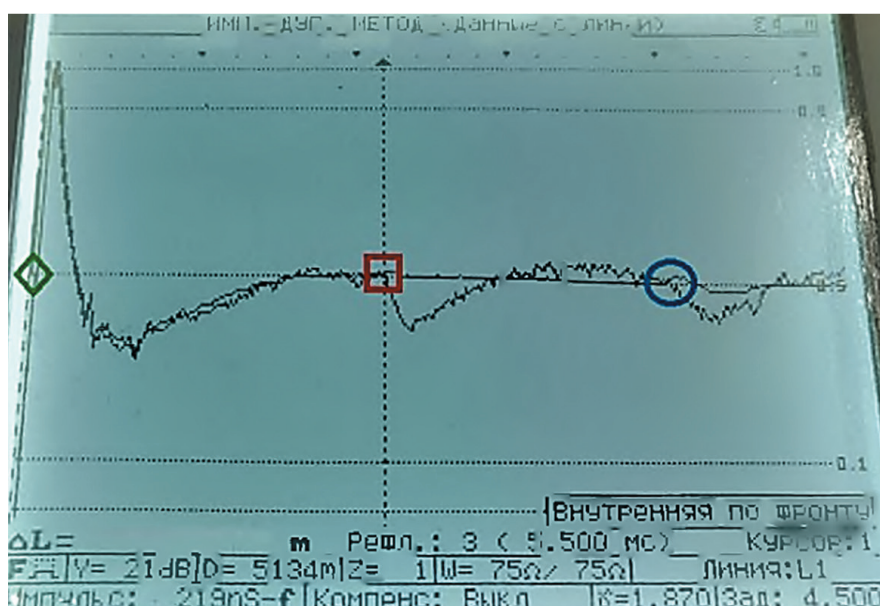
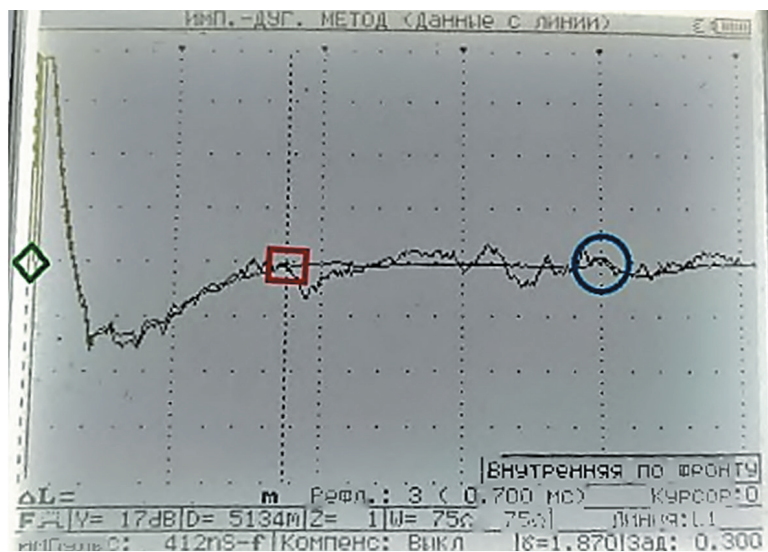
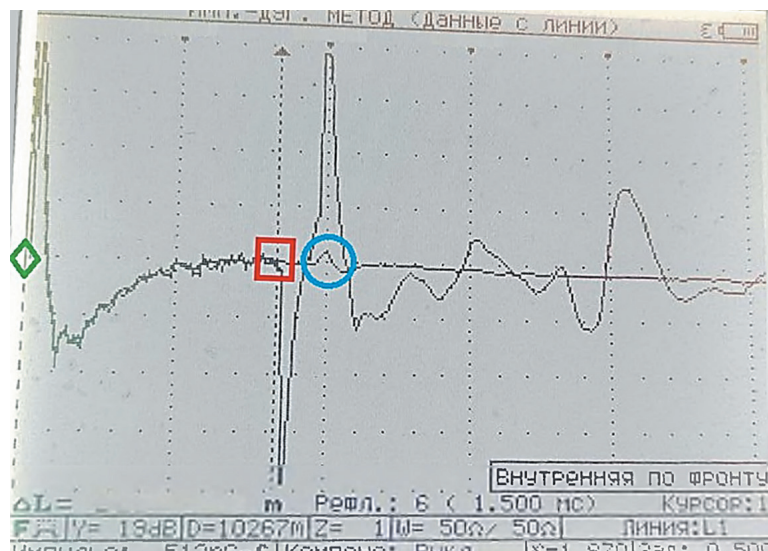


Fig. 6. Repeated reflectogram when using ARM on CL No. 1

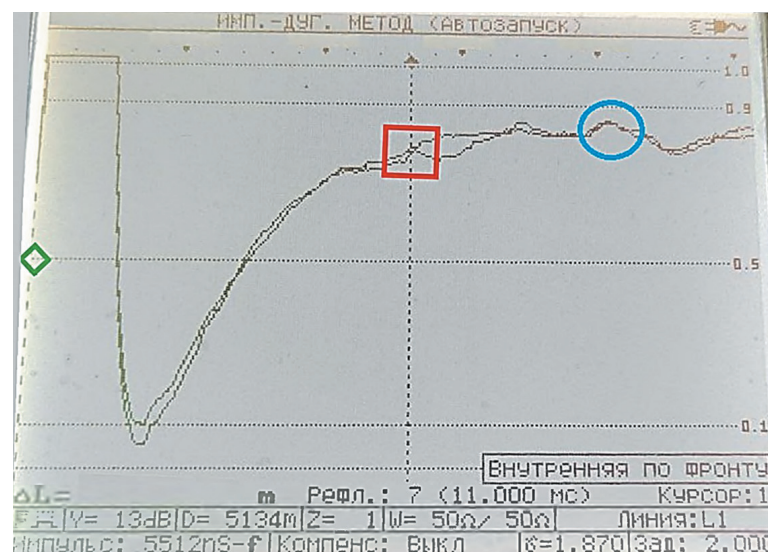
Рис. 6. Повторная рефлектограмма при использовании ARM на CL № 1



a



b



c

Fig. 7. Reflectograms when using ARM on CL No. 2

Рис. 7. Рефлектограммы при использовании ARM на CL № 2

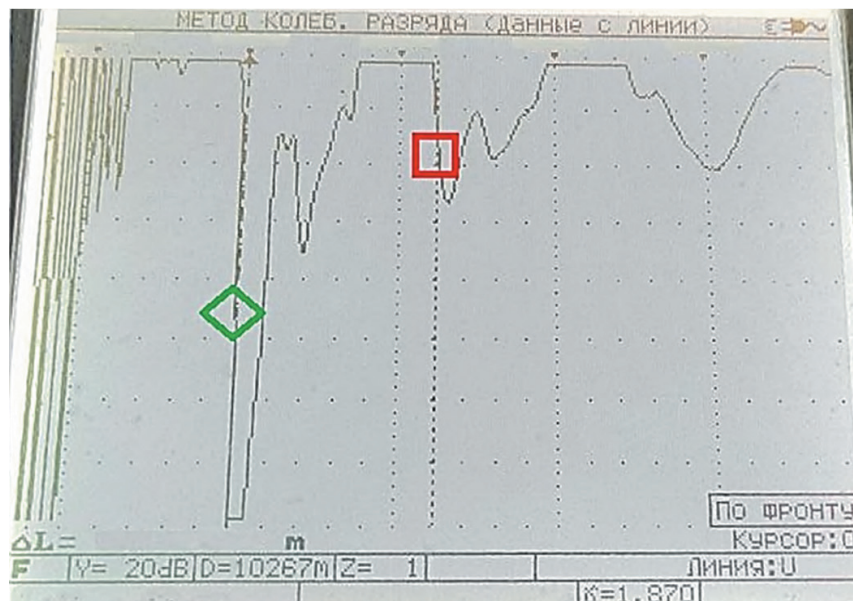


Fig. 8. Reflectogram when using ICM on CL No. 2

Рис. 8. Рефлектограмма при использовании ИСМ на CL №2

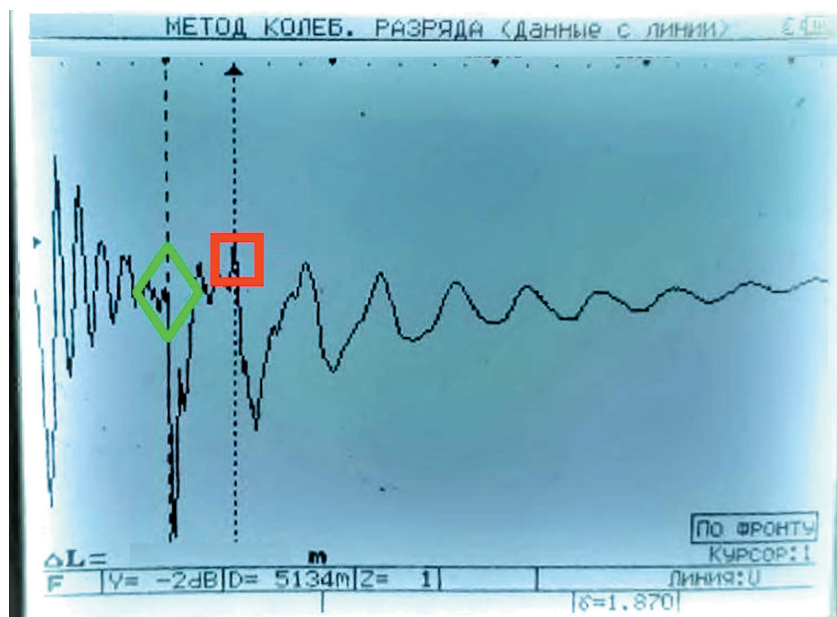


Fig. 9. Reflectogram when using ICM on CL No. 3

Рис. 9. Рефлектограмма при использовании ИСМ на CL № 3

to accurately identifying the fault zone, fault burning poses a high risk of fire if the fault is located within cable structures.

It should also be noted that the number of tests conducted were limited, and the results obtained are most applicable to this particular set and configuration of CLs. However, repeatable reflectometer traces were ensured for each CL, which still allows for the interpretation of results for other CLs as well.

CONCLUSION

The obtained results highlight specific challenges and complexities, as the captured reflectograms have a more complex appearance compared to those presented in operating manuals and literature. Moreover, it was revealed that the ARM method, which is positioned as the most effective, non-burning, and simple method for locating cable line faults, does not perform sufficiently well at high discharge voltages. Based

on the experience of several electrotechnical laboratories in Moscow, it was found that this method has a discharge voltage limitation of 5–8 kV for arc ignition and obtaining readable reflectograms, which makes it poorly applicable to creeping discharges. In a situation where the vast majority of faults are single-phase short circuits exhibiting creeping discharge, this limitation poses a significant obstacle to ARM implementation⁹ [17]. At the same time, ICM, previously considered difficult to use, is becoming more feasible with the advancement of semiconductor technology and it is a classical method used since the last century. Its main difficulty lies in the analysis of oscillograms and a large error in distance. Furthermore, its application is limited by transition resistance in the hundreds of kΩ. However, it was successfully implemented on the cable lines discussed above, where the resistance value reached tens of MΩ. The problem of distance error remains open and difficult to solve due to its operating principle. The most optimal way to solve these problems is a combination of the impulse current method and the impulse-arc method. Then, ICM serves as a marker of the fault zone for the ARM reflectogram, which in turn provides minimal on-site error.

It follows that the most optimal sequence of actions for efficiently determining the fault zone locating may be the following algorithm:

1. Insulation measurement with a megohmmeter to determine transition resistance and fault type. In case of creeping discharge, the megohmmeter may show normal insulation resistance; in such a case, it is recommended to check for fault using high-voltage tests.

2. Application of the TDR method to rule out CL breaks and faults with near-zero transition resistance.

3. Application of the ICM as a marker to estimate distance to the fault zone.

4. Application of the ARM to determine the fault zone with minimal error.

5. However, it must be understood that some methods may prove ineffective. In such a case, it is necessary to achieve greater consistency of identical reflectograms using other methods. If no method yields satisfactory results, proceed with cable burning (fault conditioning).

6. After fault zone identification, it is necessary to establish its geographical reference using cable route maps. If unavailable, conduct route tracing, then precisely locate the fault on-site using any possible absolute method.

However, it should not be forgotten that each new fault in a CL has its own characteristics, precluding universal solutions for fault locating.

References

1. Shaalan E.M., Ward S.A., Youssef A. Analysis of a practical study for under-ground cable faults causes. In: *22nd International Middle East Power Systems Conference*. 14–16 December 2021, Assiut. Assiut: IEEE; 2021, p. 208-215. <https://doi.org/10.1109/MEPCON50283.2021.9686288>.
2. Kharchenko A.V. Fault locating equipment for underground cable lines. In: *Vnedrenie sovremennykh tekhnologiy na ob"ektakh zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Minoborony Rossii: sbornik dokladov kruglogo stola v ramkakh nauchno-delovoj programmy Mezhdunarodnogo voenno-tekhnicheskogo foruma «Armiya-2022» = Implementation of modern technologies at the housing and communal services facilities of the Ministry of Defense of Russia: Collection of reports of the Round Table within the scientific and business program of the International Military and Technical Forum "Army-2022"*. 18, August 2022. Saint Petersburg: Military Logistics Academy named after the Army General Andrey Khrulev; 2022, p. 122-127. (In Russ.). EDN: XAXJVP.
3. Kondratieva O.E., Borovkova A.M., Ryabchitskiy M.V., Kravchenko M.V. Modern approaches to fault location in high-voltage cable lines. *Elektrichestvo*. 2022;12:59-66. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-12-59-66>. EDN: FHMGYT.
4. Diakonov V. Reflectometry and pulse reflectometers. *Components and technologies*. 2012;1:164-172. (In Russ.). EDN: OPOFPB.
5. Soldatov V.A., Fokin I.V. Criteria and errors for determining the fault location in 35 kV electric networks with transition resistance. *Agrarian Bulletin of the Non-Chernozem region*. 2022;1:36-42. (In Russ.). https://doi.org/10.52025/2712-8679_2022_01_36. EDN: CEZGLD.
6. Soldatov V.A., Zakharov V.C. Determination of failure location in the 35 kV network at transitional resistance in the location. *Bulletin Bashkir State Agrarian University*. 2021;1:119-123. (In Russ.). <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-57-1-119-123>. EDN: ECANCA.

⁹Donaghy R., Clasen G. Fault location on land and submarine links (AC and DC): Insulated cables (B1). CIGRE, 2019. 152 p. <https://doi.org/10.23723/1301:2018-1/22502>.

7. Gorbunov I.N., Zakharenko S.G., Zakharov S.A., Malakhova T.F. Application of neural networks for determining the location of damage to air and cable electrical transmission lines. *Mining equipment and electromechanics*. 2019;4:48-55. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-4-48-55>. EDN: FJSNCJ.
8. Sorokin A.V., Shabanov V.A. A two-way method for calculating the distance to a single-phase earth fault according to the parameters of emergency and pre-emergency modes. *Bulletin Nizhny Novgorod State Institute of Engineering and Economics*. 2024;11:58-69. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2024-11-58-69>. EDN: LBFQUG.
9. Kashin Ya.M., Kirillov G.A., Sidorenko V.S., Gaydamashko A.I. A promising method for improving accuracy of detecting the damage location in cable transmission lines and a device for its implementation. *The Bulletin of the Adyghe State University. Series: Natural-Mathematical and Technical Sciences*. 2020;3:52-58. (In Russ.). EDN: ZONFYR.
10. Maslov D.P. Review of cable fault locating devices. *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2022;92-12:117-118. (In Russ.). <https://doi.org/10.18411/trnio-12-2022-581>. EDN: JNZDCL.
11. Fedorov A.O., Petrov V.S., Razumov R.V., Petrov A.A. Features of traveling wave fault location on cable line. *Relay Protection and Automation*. 2023;4:36-45. (In Russ.). EDN: IWPEXS.
12. Zhang Ren, Liu Haoming. Fault section location in urban distribution network based on fault marking. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):117-127. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-117-127>. EDN: HISDEK.
13. Sorokin A.V. The combined application of the symmetric component method and the overlay method to determine the location of a single-phase earth fault in a network with an isolated neutral. *Bulletin Nizhny Novgorod State Institute of Engineering and Economics*. 2025;2:53-66. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2025-2-53-66>. EDN: NICKCB.
14. Azzag E.-B., Touaibia I. Cable fault location in medium voltage of Sonelgaz underground network. *Revue de Synthèse*. 2019;25(1):33-44.
15. Soldatov V.A., Smirnov N.V. Determination of the point of damage in networks 6 kV at clock through the transition resistance. *Bulletin Bashkir State Agrarian University*. 2023;2:140-145. (In Russ.). <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2023-66-2-140-145>. EDN: NXEODC.
16. Kotelenko S.V. Methods for fault location detection of cable lines. *Proceedings of the Tula State University. Technical Science*. 2021;12:81-84. (In Russ.). EDN: LOZDHH.
17. Aleksinsky S.O., Sharygin D.S. Study of influence of transient resistance on distance fault location based on one-sided method. *Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2023;3:25-33. (In Russ.). <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2023.3.025-033>. EDN: QEAPPA.
18. Gu Jyh-Cherng, Huang Zih-Jhe, Wang Jing-Min, Hsu Lin-Chen, Yang Ming-Ta. High impedance fault detection in overhead distribution feeders using a DSP-based feeder terminal unit. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021;57(1):179-186. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3029760>. EDN: VUIAUN.
19. Xu Biao, Yin Xianggen, Zhang Zhe, Pang Shuai, Li Xusheng. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm. *Automation of Electric Power System*. 2019;43(5):152-158. <https://doi.org/10.7500/AEPS20180115002>.
20. Sun Kongming, Chen Qing, Gao Zhanjun. An automatic faulted line section location method for electric power distribution systems based on multisource information. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2016;31(4):1542-1551. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2473681>.
21. Kong Pei, Liu Jianfeng, Zhou Jian, Zhou Yongliang, Song Ziheng. Fault-tolerant algorithm for fault location in distribution network based on integer linear programming. *Power System Protection and Control*. 2020;48(24):27-35. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.200073>.
22. Zheng Tao, Ma Wenlong, Li Wenbo. Fault section location of active distribution network based on feeder terminal unit information distortion correction. *Power System*. 2021;45(10):3926-3935. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1991>.

Список источников

1. Shaalan E.M., Ward S.A., Youssef A. Analysis of a practical study for under-ground cable faults causes // 22nd International Middle East Power Systems Conference (Assiut, 14–16 December 2021). Assiut: IEEE, 2021. P. 208–215. <https://doi.org/10.1109/MEPCON50283.2021.9686288>.
2. Харченко А.В. Оборудование для поиска повреждений подземных кабельных линий // Внедрение современных технологий на объектах жилищно-коммунального хозяйства Минобороны России: сб. докл. круглого стола в рамках науч.-деловой программы Междунар. воен.-техн. форума «Армия-2022» (г. Санкт-Петербург, 18 августа 2022 г.). СПб.: Воен. акад. матер.-техн. обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева, 2022. С. 122–127. EDN: XAXJVP.
3. Кондратьева О.Е., Боровкова А.М., Рябчицкий М.В., Кравченко М.В. Современные подходы к определению мест повреждения высоковольтных кабельных линий // Электричество. 2022. № 12. С. 59–66. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-12-59-66>. EDN: FHMGYT.
4. Дьяконов В. Рефлектометрия и импульсные рефлектометры // Компоненты и технологии. 2012. № 1. С. 164–172. EDN: OPOFPB.
5. Солдатов В.А., Фокин И.В. Критерии и погрешности определения места повреждения в электрических сетях 35 кВ при переходном сопротивлении // Аграрный вестник Нечерноземья. 2022. № 1. С. 36–42. https://doi.org/10.52025/2712-8679_2022_01_36. EDN: CEZGLD.

6. Солдатов В.А., Захаров В.С. Определение места повреждения в сети 35 кВ при переходном сопротивлении в месте замыкания // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2021. № 1. С. 119–123. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2021-57-1-119-123>. EDN: ECANCA.
7. Горбунов И.Н., Захаренко С.Г., Захаров С.А., Малахова Т.Ф. Применение нейронных сетей в целях определения места повреждения воздушных и кабельных линий электропередачи // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 4. С. 48–55. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2019-4-48-55>. EDN: FJSNCJ.
8. Сорокин А.В., Шабанов В.А. Двухсторонний метод вычисления расстояния до однофазного замыкания на землю по параметрам аварийного и доаварийного режимов // Вестник НГИЭИ. 2024. № 11. С. 58–69. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2024-11-58-69>. EDN: LBFQUG.
9. Кашин Я.М., Кириллов Г.А., Сидоренко В.С., Гайдамашко А.И. Перспективный способ повышения точности определения мест повреждения кабельных линий электропередачи и устройство по его реализации // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Естественно-математические и технические науки. 2020. № 3. С. 52–58. EDN: ZONFYR.
10. Маслов Д.П. Обзор устройств для определения мест повреждения кабельных линий // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 92-12. С. 117–118. <https://doi.org/10.18411/trnio-12-2022-581>. EDN: JNZDCL.
11. Петров В.С., Федоров А.О., Разумов Р.В., Петров А.А. Особенности волнового определения места повреждения кабельной линии электропередачи // Релейная защита и автоматизация. 2023. № 4. С. 36–45. EDN: IWPEXS.
12. Чжан Жэнь, Лю Хаомин. Локализация поврежденного участка в городской распределительной сети на основе маркировки повреждения // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 117–127. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-117-127>. EDN: HISDEK.
13. Сорокин А.В. Совместное применение метода симметричных составляющих и метода наложения для определения места однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью // Вестник НГИЭИ. 2025. № 2. С. 53–66. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2025-2-53-66>. EDN: NICKCB.
14. Azzag E.-B., Touaibia I. Cable fault location in medium voltage of Sonelgaz underground network // Revue de Synthèse. 2019. Vol. 25. Iss. 1. P. 33–44.
15. Солдатов В.А., Смирнов Н.В. Определение места повреждения в сетях 6 кВ при замыканиях через переходное сопротивление // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2023. № 2. С. 140–145. <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2023-66-2-140-145>. EDN: NXEODC.
16. Котеленко С.В. Методы определения мест повреждения кабельных линий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 12. С. 81–84. EDN: LOZDHN.
17. Алексинский С.О., Шарыгин Д.С. Исследование влияния переходного сопротивления на дистанционное определение места повреждения на основе одностороннего метода // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2023. № 3. С. 25–33. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2023.3.025-033>. EDN: QEAPPA.
18. Gu Jyh-Cherng, Huang Zih-Jhe, Wang Jing-Min, Hsu Lin-Chen, Yang Ming-Ta. High impedance fault detection in overhead distribution feeders using a DSP-based feeder terminal unit // IEEE Transactions on Industry Applications. 2021. Vol. 57. Iss. 1. P. 179–186. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3029760>. EDN: VUIAUN.
19. Xu Biao, Yin Xianggen, Zhang Zhe, Pang Shuai, Li Xusheng. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm // Automation of Electric Power System. 2019. Vol. 43. Iss. 5. P. 152–158. <https://doi.org/10.7500/AEPS20180115002>.
20. Sun Kongming, Chen Qing, Gao Zhanjun. An automatic faulted line section location method for electric power distribution systems based on multisource information // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016. Vol. 31. Iss. 4. P. 1542–1551. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2473681>.
21. Kong Pei, Liu Jianfeng, Zhou Jian, Zhou Yongliang, Song Ziheng. Fault-tolerant algorithm for fault location in distribution network based on integer linear programming // Power System Protection and Control. 2020. Vol. 48. Iss. 24. P. 27–35. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.200073>.
22. Zheng Tao, Ma Wenlong, Li Wenbo. Fault section location of active distribution network based on feeder terminal unit information distortion correction // Power System. 2021. Vol. 45. Iss. 10. P. 3926–3935. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1991>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgenii V. Zhilin,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Energy and Energy Efficiency in Mining Industry,
University of Science and Technology MISIS,
4/1 Leninskiy prospekt, Moscow 119049, Russia
zhilin.ev@misis.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2076-6463>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жилин Евгений Витальевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры энергетики и энергоэффективности
горной промышленности,
Университет науки и технологий МИСИС,
119049, г. Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1,
Россия
zhilin.ev@misis.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2076-6463>

Daniil D. Levin,
Postgraduate Student,
University of Science and Technology MISIS,
4/1 Leninskiy prospekt, Moscow 119049, Russia
✉ m1805181@edu.misis.ru
<https://orcid.org/0009-0004-0580-8604>

Лёвин Даниил Дмитриевич,
аспирант,
Университет науки и технологий МИСИС,
119049, г. Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1,
Россия
✉ m1805181@edu.misis.ru
<https://orcid.org/0009-0004-0580-8604>

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 15.05.2025; approved after reviewing 30.06.2025; accepted for publication 11.07.2025.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 15.05.2025 г.; одобрена после рецензирования 30.06.2025 г.; принята к публикации 11.07.2025 г.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 546.34:666.123.24

EDN: YNRNQC

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-3-376-388



Сорбционное извлечение лития из рассола

С.А. Алейников^{1✉}, Н.В. Белоусова²^{1,2}Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Резюме. Цель – исследовать эффективность извлечения лития из высокоминерализованного хлоридно-кальциевого рассола Сибирской платформы с использованием синтезированного сорбента на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития. Изучение свойств сорбента (набухаемости, механической прочности) проводилось согласно ГОСТ 51641-2000 с использованием орбитального шейкера ELMi S-3LA20 и высокоточных аналитических весов CAS CAUW-220D. Кинетика сорбции исследовалась в статических условиях. Полная динамическая емкость и динамическая обменная емкость (до «проскока») при скоростях потока рассола от 1-го до 3-х колоночных объемов в час определялись в динамических экспериментах (проведено 100 непрерывных циклов сорбции-десорбции). Анализ растворов на содержание элементов проводился методом АЭС-ИСП с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой iCAP 7400 Radial. Согласно проведенным исследованиям, набухаемость сорбента составила 19%, измельчаемость – 1,72%, истираемость – 0,27%. Время достижения полуравновесия при сорбции лития в статических условиях – 3 мин. Статическая обменная емкость составила 5,5 мг/г, полная динамическая обменная емкость – 5,5–5,7 мг/г. При скорости потока рассола 2 колоночных объема в час достигнуто 95%-е извлечение лития. Для промышленного извлечения лития на уровне 95% при скорости потока 1–2 колоночных объема в час требуется 2 колонны (или 3 колонны при скорости потока 3 колоночных объема в час). Показано, что емкость сорбента сохраняется на уровне 5,6 мг/г на протяжении 100 циклов сорбции-десорбции. Соотношение концентрации $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{Li}^{+}$ в элюате снижено в 682 раза по сравнению с исходным рассолом. Таким образом, сорбент демонстрирует высокую эффективность для извлечения лития из рассолов с экстремально высоким содержанием ионов кальция. Высокие значения скорости достижения полуравновесия, емкости, механической прочности, а также стабильность работы в 100 циклах сорбции-десорбции подтверждают промышленный потенциал сорбционного извлечения лития из высокоминерализованных хлоридно-кальциевых рассолов.

Ключевые слова: сорбция, литий, слоистые двойные гидроксиды, извлечение лития, рассол

Для цитирования: Алейников С.А., Белоусова Н.В. Сорбционное извлечение лития из рассола // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 376–388 <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-376-388>. EDN: YNRNQC.

METALLURGY

Original article

Lithium sorption from natural brine

Sergey A. Aleynikov^{1✉}, Natalia V. Belousova²^{1,2}Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The study aims to investigate the efficiency of lithium extraction from highly mineralized calcium chloride brine of the Siberian Craton using a synthesized sorbent based on layered aluminum-lithium hydroxide. The research into the sorbent properties (swelling characteristics, mechanical strength) was conducted in accordance with GOST 51641-2000 using an ELMi S-3LA20 orbital shaker and a high-precision analytical balance CAS CAUW-220D. The sorption kinetics was studied under static conditions. The total dynamic capacitance and dynamic exchange capacity (before “breakthrough”) at brine flow rates from 1 to 3 column volumes per hour were determined in dynamic experiments. 100 continuous sorption-desorption cycles were carried out. The analysis of solutions for the element content was performed by the ICP-AES method with an iCAP 7400 Radial inductively coupled plasma atomic emission spectrometer. According to the conducted research, the swelling capacity of the sorbent was 19%, grindability equaled 1.72%, and abrasion amounted to 0.27%. The time to reach semi-equilibrium during lithium sorption under static conditions was 3 minutes. The total static capacitance equaled 5.5 mg/g; the total dynamic exchange capacity amounted to 5.5–5.7 mg/g. At a brine flow rate of 2 column volumes per hour, 95% lithium extraction was achieved. For commercial lithium recovery at a level of 95% at a flow rate of 1–2 column volumes per hour, 2 columns are required (or 3 columns at a flow rate of 3 column volumes per hour). It is shown that the sorbent capacity is maintained

at a level of 5.6 mg/g throughout 100 sorption-desorption cycles. The concentration ratio ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)/ Li^+ in the eluate is reduced 682-fold compared to the original brine. Thus, the sorbent demonstrates high efficiency for lithium extraction from brines with extremely high calcium ion content. The high values of the rate of reaching semi-equilibrium, capacity, mechanical strength, as well as operational stability over 100 sorption-desorption cycles confirm the industrial potential of sorption extraction of lithium from highly mineralized calcium chloride brines.

Keywords: sorption, lithium, layered double hydroxides, lithium extraction, brine

For citation: Aleynikov S.A., Belousova N.V. Lithium sorption from natural brine. *iPolytech Journal*. 2025;29(3): 376-388. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-376-388>. EDN: YNRNQC.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях стремительного роста рынка портативных устройств и электромобилей литий становится одним из самых востребованных элементов XXI в. Это связано с тем, что литий является ключевым компонентом литий-ионных аккумуляторов, на долю которых приходится более половины мирового потребления лития. Однако область его применения [1] не ограничивается только аккумуляторами. Литий также играет важную роль в фармацевтической индустрии, где соли лития, такие как оксидутират лития, используются для создания препаратов, применяемых в психиатрии, в частности для лечения биполярного расстройства [2]. В стоматологии литий применяется в составе стеклокерамики на основе силикатов, которая обладает высокой прочностью и долговечностью [3]. Легирование алюминия и его сплавов с литием сопровождается повышением комплекса прочностных коррозионных и эксплуатационных характеристик получаемых сплавов, поэтому более легкие сплавы в системе Al-Cu-Mg-Li (марка 1441) и Al-Mg-Li (марки 1420, 1424) нашли применение в авиационной промышленности [4]. Литий также имеет большое значение в ядерной энергетике, так как изотоп ^6Li характеризуется способностью активно захватывать нейтроны, образуя при этом более легкие элементы – тритий и гелий с высвобождением энергии [5]. Еще одна область использования лития связана с применением 12-октестеарата лития (литиевого мыла) в качестве загустителя для производства смазочных материалов. В отличие от натриевых или кальциевых загустителей, смазочные материалы на основе литиевого мыла обладают эксплуатационными преимуществами, обусловленными лучшей водостойкостью, более высоким рабочим диапазоном температур и повышенной механической стабильностью [6].

Основным литиевым продуктом является его карбонат, который служит прекурсо-

ром целого ряда химических соединений [7].

Минерально-сырьевая база лития включает в себя два источника – гидроминеральный и рудный. Литий обладает высокой растворимостью, поэтому подавляющая часть его подтвержденных запасов заключена в литийсодержащих рассолах [8], где он присутствует в виде растворенных солей (в основном сульфатов и хлоридов).

Извлечение лития из рудных источников сопряжено с высокими энергетическими затратами на обогащение, однако получаемый таким способом продукт отличается более высоким качеством. Извлечение лития из соленых озер, как правило, обходится дешевле, чем переработка литиевых руд, но при этом технология испарительного концентрирования требует большого расхода воды и реагентов, внушительного размера производственных площадей, а также значительного времени на испарение, а получаемый таким способом продукт может быть более низкого качества.

Применение испарительной технологии извлечения лития из рассолов ограничивается соотношением Mg/Li в рассоле, поскольку с ростом этого соотношения увеличиваются затраты на реагенты для осаждения труднорастворимых соединений кальция и магния. В частности метод осаждения для извлечения лития в основном применяется для рассолов соляных озер с низким соотношением $\text{Mg/Li} < 10$, таких как рассолы Salar de Atacama ($\text{Mg/Li} \approx 6,4$), Silver Peak ($\text{Mg/Li} \approx 1,43$) и Salar de Hombre Muerto ($\text{Mg/Li} \approx 1,37$), однако он не применим для извлечения лития из рассолов с высоким соотношением Mg/Li , которые широко распространены по всему миру, например, из соленых озер Yliping (Китай, $\text{Mg/Li} \approx 90$), Taijinar (Китай, $\text{Mg/Li} \approx 37-61$) и Qarhan (Китай, $\text{Mg/Li} \approx 1600$) [9].

В настоящее время путем испарительного концентрирования рассолов пере-

рабатывается гидроминеральное сырье в Чили (Salar de Atacama), Аргентине (Salar de Hombre Muerto, Salar de Oraroz, Cauchari-Olaroz) и Боливии (Salar de Uyuni) [10], а рудный литий добывается преимущественно в Австралии (Pilgangoora, Mount Marion, Greenbushesmine и др.), Китае (Jiajika) и Бразилии (Grotado Cirilo, Mibra, Minada Cachoeira) [11].

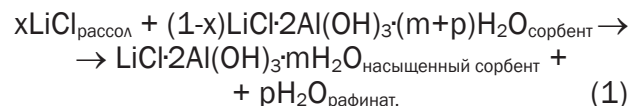
В России добыча рудного лития была остановлена в 1997 г. с закрытием Завитинского месторождения (в Забайкальском крае) сподумена, а добыча гидроминерального лития находится на стадии разведки, оценки запасов и исследований технологий в области его добычи. Подавляющая часть гидроминерального лития в России заключена в подземных рассолах, что создает определенные сложности при его добыче, связанные с затратами на бурение и освоение скважин, однако некоторые литийсодержащие рассолы являются попутным продуктом добычи нефти, газа и конденсата, поэтому добыча лития из гидроминерального сырья может быть реализована на уже разработанных месторождениях нефти и газа с готовой инфраструктурой [12].

Существует ряд технологических решений, позволяющих с определенной степенью селективности извлекать литий напрямую из рассолов, которые в совокупности получили название Direct Lithium Extraction (DLE) [13]. Технологии DLE позволяют существенно снизить удельные затраты на добычу лития и увеличить извлечение лития по сравнению с традиционной технологией испарительного концентрирования, а также извлекать литий из рассолов с высоким содержанием ионов кальция и магния. Одним из таких способов является сорбция лития сорбентом на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития.

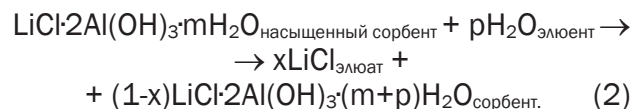
Слоистые двойные гидроксиды (СДГ) – класс соединений, представленный как природными минералами, так и синтетическими аналогами с общей формулой $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2]^{x+}(A^{n-})_{x/n} \cdot yH_2O$. Типичным представителем данного класса соединений является гидроталькит – $[Mg_6Al_2(OH)_{16}][CO_3](H_2O)_4$, который был обнаружен в 1842 г. [14]. Однако в 1982 г. Карлосом Серна и другими исследователями [15] был синтезирован двойной слоистый гидроксид алюминия-ли-

тия $[Al_2Li(OH)_6]_2CO_3 \cdot nH_2O$, в структуре которого вместо двухвалентных катионов присутствуют моновалентные катионы лития, в связи с чем было предложено расширить номенклатуру СДГ. Уникальное свойство слоистых двойных гидроксидов заключается в способности обмениваться анионами [16], но поскольку ионы лития могут находиться в растворе, они также способны обратимо поглощаться слоистым двойным гидроксидом алюминия-лития в качестве противоиона [17–21].

В общем виде сорбцию лития слоистым двойным гидроксидом алюминия-лития из хлоридного рассола можно представить реакцией (1) [22, 23]:



При снижении общей минерализации реакция протекает в обратном направлении, что соответствует десорбции лития:



Вероятнее всего, механизм десорбции обусловлен гидратацией хлорида лития, протекание которой энергетически более выгодно в среде обессоленной воды.

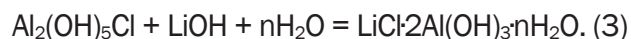
Главной особенностью данных сорбентов является возможность эффективно извлекать ионы лития только из высокоминерализованных рассолов, поскольку длительный контакт сорбента с водой приводит к структурным изменениям слоистого двойного гидроксида алюминия-лития за счет чрезмерной деинтеркаляции ионов лития, что в конечном результате служит причиной снижения емкости сорбента [24, 25].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании эффективности синтезированного литий-селективного сорбента на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития (для извлечения лития из высокоминерализованного рассола), определении его динамической и статической емкости, а также оценке стабильности сорбента в ходе многократных циклов сорбции-десорбции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сорбции лития использовали литий-содержащий хлоридно-кальциевый рассол Кембрийского водоносного горизонта [26] с общим содержанием солей на уровне 321 г/дм³. Результаты атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) используемого рассола представлены в табл. 1.

Методика синтеза сорбента. Литий-селективный сорбент (далее Al-Li-СДГ сорбент) был синтезирован путем растворения навески хлорида полиалюминия в воде и нейтрализации полученного раствора 2М раствором гидроксида лития в присутствии карбоксиметилцеллюлозы:



Образовавшуюся пасту гранулировали экструзией в цилиндрические гранулы диаметром 0,8 мм, сушили при комнатной температуре в течение четырех суток, затем измельчали в ступке и просеивали через сита с размерами ячейки 2,0 и 0,5 мм. Для дальнейших исследований использовали сорбент классом крупности -2,0+0,5 мм. Внешний вид гранул полученного сорбента представлен на рис. 1.

Методика определения свойств сорбента. Механическая прочность зернистых фильтрующих материалов характеризуется истираемостью и измельчаемостью. В основе методики для определения механической прочности образца Al-Li-СДГ сорбента использовали ГОСТ 51641-2000³. Навеску сорбента массой 150 г промывали водой,



Рис. 1. Внешний вид гранул Al-Li-СДГ сорбента
 Fig. 1. Appearance of Al-Li-LDH adsorbent granules

высушивали и просеивали через сита с размерами ячейки 2,0 и 0,5 мм. Навеску сорбента, прошедшего через сито 2,0 мм и оставшегося на сите 0,5 мм массой 100 г, переносили в 250 см³ колбу, наполненную 150 см³ воды. Колбу герметично закрывали и выдерживали в течение 24 ч при постоянном перемешивании на орбитальном шейкере ELMI S-3L.A20. После этого сорбент отделяли от воды вакуумной фильтрацией, высушивали и просеивали через сита с размером ячейки 0,5 мм и 0,25 мм. Массовая доля сорбента, прошедшего через сито с размером ячейки 0,5 мм и оставшегося на сите с размером ячейки 0,25 мм, характеризует измельчаемость, а массовая доля

Таблица 1. Результаты атомно-эмиссионного анализа с индуктивно связанной плазмой анализа литийсодержащего рассола
 Table 1. Results of inductively coupled plasma atomic emission analysis (ICP-AES) of lithium-containing brine

Элемент	Содержание, г/дм ³
Li ⁺	0,24
Na ⁺	30,59
K ⁺	12,80
Ca ²⁺	64,93
Mg ²⁺	10,86
BO ₃ ³⁻	1,20
SO ₄ ²⁻	0,15
Сумма солей	≈ 321

³ГОСТ 51641-2000. Материалы фильтрующие зернистые. Общие технические условия. Введ. 01.07.2001. М.: Госстандарт России, 2002.

сорбента, прошедшего через сито с размером ячейки 0,25 мм, характеризует истираемость.

Для определения набухаемости навеску сорбента массой 30 г вымачивали в воде и помещали в мерный цилиндр объемом 100 см³ и определяли объем влажного сорбента. Набухаемость определяли по формуле⁴:

$$H = \frac{V_{\text{влажн}} - V_{\text{сух}}}{V_{\text{сух}}} \cdot 100, \quad (4)$$

где H – набухаемость, %; $V_{\text{сух}}$ – объем сухого сорбента, см³; $V_{\text{влажн}}$ – объем влажного сорбента, см³.

Для оценки гидродинамических свойств сорбента была определена зависимость расширения слоя сорбента от линейной скорости потока. Для этого загружали сорбент в ионообменную колонку ВЗОР 30/24/200 и пропускали через нее рассол восходящим потоком с линейной скоростью от 2,5 до 20 м/ч и измеряли высоту слоя взрыхленного сорбента.

Методика определения емкости сорбента в динамических условиях. Для оценки полной динамической обменной емкости (ПДОЕ) наполняли ионообменную колонку ВЗОР 20/16/200 30 см³ синтезированного Al-Li-СДГ сорбента, промывали его водой, а затем проводили насыщение путем пропускания через колонку литийсодержащего рассола перистальтическим насосом восходящим потоком при удельной скорости потока от 1 до 3 колоночных объемов в час (КО/ч), что соответствует значениям от 30 до 90 см³/ч. Выходящий из колонки рафинат фракционировали с помощью коллектора фракций по 5 колоночных объемов (150 см³) и анализировали методом ИСП-АЭС для построения выходных кривых сорбции. Полную динамическую емкость сорбента рассчитывали по формуле:

$$\text{ПДОЕ} = \sum_{i=1}^n \frac{(C_0 - C_i) \cdot V_i}{m_{\text{сорбента}}}, \quad (5)$$

где C_i – концентрация ионов лития в i -той фракции рафината, мг/дм³; C_0 – концентрация ионов лития в исходном рассоле, мг/дм³;

$m_{\text{сорбента}}$ – масса сорбента, г; V_i – объем i -той фракции рафината, дм³; n – количество фракций рассола, пропущенных через сорбент до полного его насыщения.

Динамическую обменную емкость (ДОЕ) рассчитывали по формуле:

$$\text{ДОЕ} = \sum_{i=1}^n \frac{(C_0 - C_i) \cdot V_i}{m_{\text{сорбента}}}, \quad (6)$$

где m – количество фракций рассола, пропущенных через сорбент до «проскока» ионов лития в рафинат.

Десорбцию лития проводили нисходящим потоком воды с удельной скоростью потока от 1 до 3 колоночных объемов в час. На выходе из колонки элюат фракционировали с помощью коллектора фракций по 1 колоночному объему (30 см³). Фракции элюата анализировали методом ИСП-АЭС на содержание Li, Na, K, Ca, Mg и В, а полученные данные использовали для построения выходных кривых десорбции лития.

Методика снятия кинетической кривой сорбции лития в статических условиях. Для построения кинетической кривой сорбции в статических условиях навеску сорбента массой 2,76 г переносили в мерный цилиндр, заполненный водой, и определяли объем набухшего сорбента (4 см³). Затем сорбент переносили в колонку и промывали 8-ю колоночными объемами воды при удельной скорости потока 2 КО/ч для десорбции лития. После этого сорбент извлекали из колонки, отделяли от воды вакуум-фильтрацией на фильтре Шотта и сушили. Высушенный сорбент помещали в колбу объемом 250 см³, наполненную 150 см³ литийсодержащего рассола, и запускали перемешивание рассола и сорбента на орбитальном шейкере. Пробу рассола из колбы отбирали по 5 см³ с интервалом 2, 5, 10, 30, 60 и 120 мин. Статическую обменную емкость (СОЕ) определяли по формуле:

$$\text{СОЕ} = \frac{(C_0 - C_{\infty}) \cdot V}{m_{\text{сорбента}}}, \quad (7)$$

где C_{∞} – равновесная концентрация ионов лития в растворе, мг/дм³; C_0 – концентрация

⁴Рудских В.В. Разработка технологии выделения высокочистых соединений лития из водно-хвостовых растворов установок утилизации литиевых водородсодержащих материалов: дис. ... канд. техн. наук: 02.03.08. М. – Озерск: ИФХЭ РАН, 2022. 137 с.

ионов лития в исходном рассоле, мг/дм³; $m_{\text{сорбента}}$ – масса сорбента, г; V – объем рассола, дм³.

Степень обмена вычисляли по уравнению:

$$F = \frac{C_0 - C_t}{C_0 - C_{\infty}}, \quad (8)$$

где C_0 – концентрация ионов лития в растворе в начальный момент времени, мг/дм³; C_t – концентрация ионов лития в растворе в момент времени t , мг/дм³; C_{∞} – равновесная концентрация ионов лития в растворе, мг/дм³.

По полученным экспериментальным данным (рис. 7) рассчитывали время полуобмена ($\tau_{1/2}$) при $F = 0,5$. Значение $\tau_{1/2}$ использовали для расчета максимальной удельной скорости пропускания раствора через сорбционную колонну в динамическом режиме (Q). Для динамической сорбции в качестве условия достижения равновесия было выбрано значение времени контакта $10 \cdot \tau_{1/2}$ на основании рекомендации⁴, а значение удельной скорости потока, выраженное в КО/ч, рассчитывали по формуле:

$$Q = \frac{1}{10 \cdot \tau_{1/2}}. \quad (9)$$

Методика проведения ресурсных испытаний. Для оценки стабильности емкостных свойств синтезированного сорбента были проведены ресурсные испытания, которые заключались в осуществлении ста прерывных циклов сорбции-десорбции. Для ресурсных испытаний в качестве оптимальной была выбрана удельная нагрузка 2 КО/ч (60 см³/ч) на сорбции и десорбции. Каждый цикл сорбции длился по 18 ч, каждый цикл

десорбции – по 4 ч. На каждом 5-м цикле отбирали элюат и анализировали методом ИСП-АЭС на содержание лития и основных элементов.

Для выделения концентрированного литиевого элюата и оценки его чистоты сорбанные фракции элюата разделяли на две группы:

Промывные воды (первые 2,0 КО): содержат ионы лития, а также основную долю примесных ионов, вытесняемых из свободного объема колонки.

Литиевый элюат (последующие 6,0 КО): содержат преимущественно ионы лития, десорбированного с сорбента, и характеризуются значительно меньшим содержанием примесей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения литий-селективного сорбента с высокими кинетическими характеристиками были использованы природные полимеры из класса полисахаридов и их производных в качестве связующего вещества. Установили, что получаемые таким образом сорбенты обладают высокой набухаемостью при погружении в водную среду (19% от объема сухого сорбента), что, вероятно, связано со способностью полисахаридов эффективно удерживать воду. При этом сорбент сохраняет достаточную механическую прочность, что предотвращает его разрушение в процессе эксплуатации, обеспечивая стабильность структуры в ходе циклов сорбции-десорбции. В табл. 2 представлены некоторые свойства синтезированного сорбента.

При увеличении скорости восходящего потока рассола в сорбционную колонну происходит расширение слоя сорбента, как показано на рис. 2.

Таблица 2. Свойства синтезированного Al-Li-СДГ сорбента
Table 2. Properties of the synthesized Al-Li-LDH adsorbent

Показатель	Значение
Насыпная плотность сухого сорбента, г/см ³	0,81
Насыпная плотность влажного сорбента, г/см ³	0,68
Измельчаемость, %	1,72
Истираемость, %	0,27
Набухаемость, %	19
Поперечный размер гранул, мм	0,85
Полная емкость по литию, мг/г	5,7
Полная емкость по литию, г/дм ³	3,9

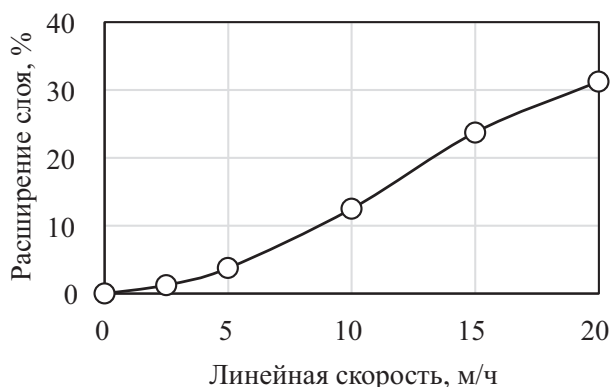


Рис. 2. Расширение слоя Al-Li-СДГ сорбента в зависимости от линейной скорости потока

Fig. 2. Expansion of the Al-Li-LDH adsorbent layer depending on the linear flow rate

Исследование процесса насыщения в динамических условиях показало, что Al-Li-СДГ сорбент поглощает из раствора исключительно ионы лития на фоне высоких концентраций катионов щелочных и щелочноземельных металлов. Это может быть продемонстрировано графиком выходных кривых сорбции лития на фоне прочих элементов (рис. 3), где концентрации Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} остаются неизменными, подтверждая селективность сорбента к Li^+ .

При удельной скорости потока рассола 2 КО/ч сорбент способен извлекать около 95% лития до остаточной концентрации лития около 12 мг/дм^3 , что соответствует динамической обменной емкости по литию $4,1 \text{ мг/г}$. Полная динамическая обменная емкость сорбента по ионам лития составила $5,7 \text{ мг/г}$.

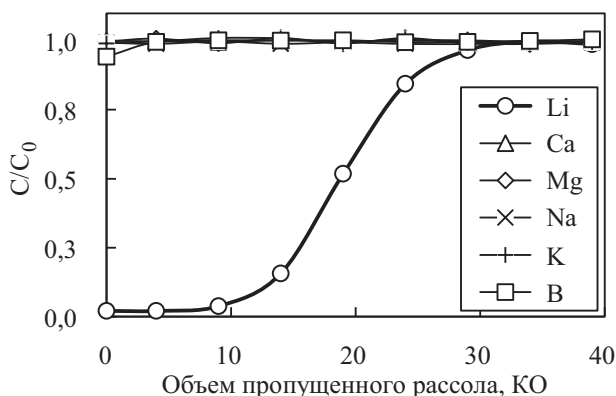


Рис. 3. Выходная кривая сорбции лития и прочих элементов. Удельная скорость потока 2 КО/ч

Fig. 3. Output curve of lithium and other elements adsorption. The specific flow rate is 2 BV/h

Для исследования кинетики сорбции лития двойным слоистым гидроксидом алюминия-лития было проведено насыщение при удельной скорости потока 1, 2 и 3 КО/ч. Как следует из рис. 4, при увеличении удельной скорости потока увеличивается концентрация лития в рафинате, и, как следствие, снижается извлечение лития, а также увеличивается объем рассола, необходимого для полного насыщения сорбента.

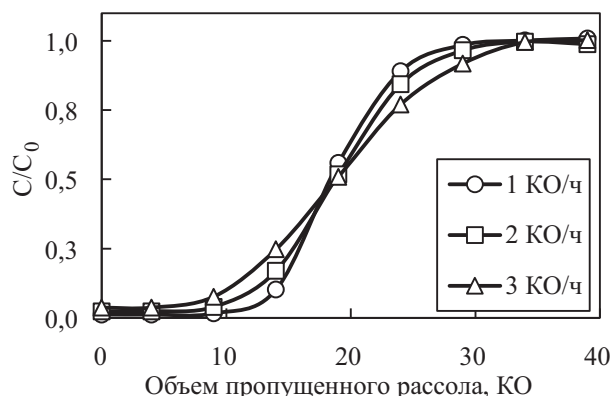


Рис. 4. Выходные кривые сорбции лития при различной удельной скорости потока рассола в колонку

Fig. 4. Output curves of lithium adsorption at different specific flow rates of brine into the column

Поскольку для промышленного извлечения лития сорбцией используется несколько последовательно объединенных колонн, динамическая обменная емкость была рассчитана для целевого извлечения лития на уровне 95% и на основании полученных значений – количество колонн, необходимых для достижения заданного извлечения, используя соотношение (10) [27]:

$$n \geq \frac{2\text{ПДОЕ}}{\text{ДОЕ}} - 1 \quad (10)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 3. Так, для извлечения 95% лития в каскадном режиме при удельной нагрузке 1 и 2 КО/ч достаточно двух колонн, а при увеличении скорости потока до 3-х КО/ч требуется не менее 3-х колонн.

Особенностью десорбции лития с Al-Li-СДГ сорбента является то, что между процессами сорбции и десорбции лития отсутствует стадия промывки водой, так как вода используется для десорбции. В связи с этим вытеснение солей из межгрануль-

Таблица 3. Зависимость показателей сорбции лития в динамических условиях Al-Li-СДГ сорбентом от скорости подачи раствора Q

Table 3. Dependence of lithium adsorption parameters by Al-Li-LDH sorbent under dynamic conditions on the flow rate of solution Q

Q, КО/ч	Полная динамическая обменная емкость		Динамическая обменная емкость		n	Извлечение лития, %
	г/дм ³	мг/г	г/дм ³	мг/г		
1	3,91	5,67	3,35	4,86	2	97,9
2	3,94	5,71	2,80	4,06	2	95,1
3	3,94	5,71	1,92	2,78	3	94,5

ного пространства сорбента идет вместе с переходом лития из сорбента в раствор, что наглядно демонстрируется выходными кривыми десорбции (рис. 5), где возрастание концентрации ионов лития сопровождается снижением концентрации примесных элементов. Также можно заметить, что выходная кривая десорбции ионов бора лежит выше кривых для других элементов, что, вероятно, связано с тем, что борат-ион (BO_3^{3-}) поглощается Al-Li-СДГ сорбентом более селективно, чем анион хлора.

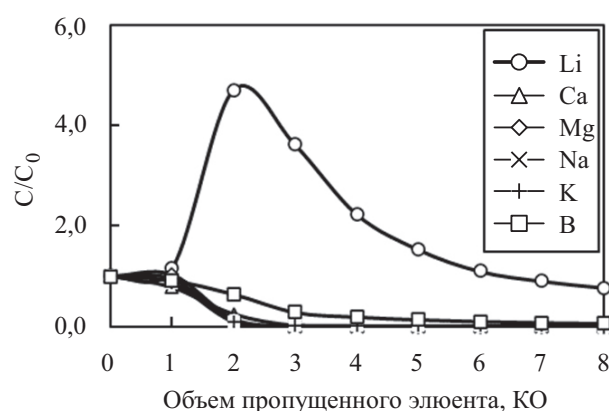


Рис. 5. Выходные кривые десорбции лития и прочих элементов. Удельная скорость потока 2 КО/ч

Fig. 5. Output curves of lithium and other elements desorption. The specific flow rate is 2 BV/h

При снижении скорости потока воды на стадии десорбции лития с 3-х до 1-го КО/ч наблюдается смещение пиков выходных кривых (рис. 6) в сторону более высоких концентраций лития в элюате – с 1,0 до 1,5 г/дм³, а также снижение общего расхода элюента (воды) с 10 до 6 КО. Это подтверждает возможность получения концентрированного продукта при меньшем расходе воды. Практическая значимость результатов заключается в оптимизации ре-

сурсопотребления: снижение расхода воды не только уменьшает эксплуатационные затраты, но и повышает эффективность последующих стадий выделения лития за счет уменьшения объема перерабатываемого раствора. Однако чрезмерное замедление скорости потока может привести к увеличению длительности цикла десорбции, что способно снизить общую производительность установки. Полученные данные подчеркивают необходимость выбора оптимальной удельной скорости потока для конкретных технологических условий.

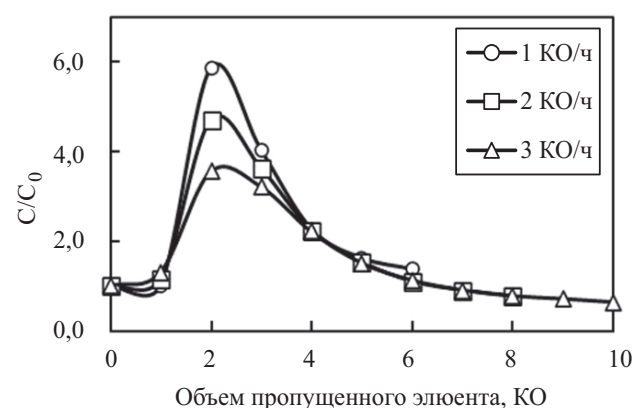


Рис. 6. Выходные кривые десорбции лития при различной удельной скорости потока воды в колонку

Fig. 6. Output curves of lithium desorption at different specific flow rates of water into the column

Рассолы с низкой концентрацией ионов лития требуют более длительного цикла насыщения сорбента. Для минимизации простоев в каскадном режиме сорбции в таких случаях целесообразно применять режим десорбции с низкой удельной скоростью потока воды. Это позволяет синхронизировать этапы сорбции и десорбции, обеспечивая непрерывность процесса. Результаты согласуются с теоретическими ожидания-

ми и демонстрируют потенциал метода для промышленного применения, где баланс между скоростью, ресурсосбережением и производительностью является критически важным.

Зависимость емкости сорбента от продолжительности контакта с рассолом в статических условиях представлена на рис. 7. Емкость сорбента в статических условиях составила 5,5 мг/г. Исследование кинетики сорбции лития в статических условиях показало, что время полуобмена ($T_{1/2}$) составило 3 мин, а максимальная удельная скорость потока в динамических условиях, рассчитанная по формуле (9), составила 2 КО/ч. Данная скорость потока далее использовалась для проведения ресурсных испытаний.

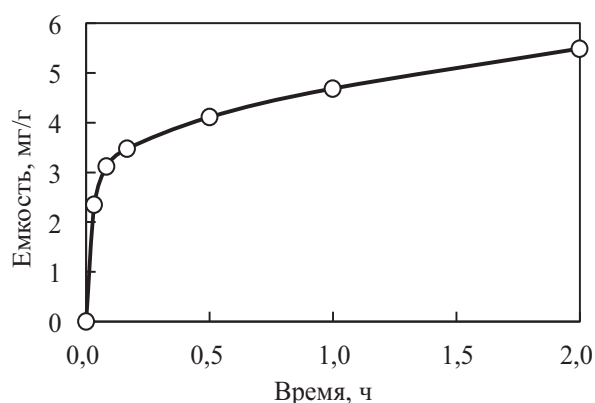


Рис. 7. Зависимость емкости сорбента от продолжительности контакта с рассолом

Fig. 7. Dependence of sorbent capacity on duration of contact with brine

Ресурсные испытания показали, что на протяжении ста циклов сорбции и десорбции емкость сорбента в среднем удерживается на уровне 5,6 мг/г (рис. 8).

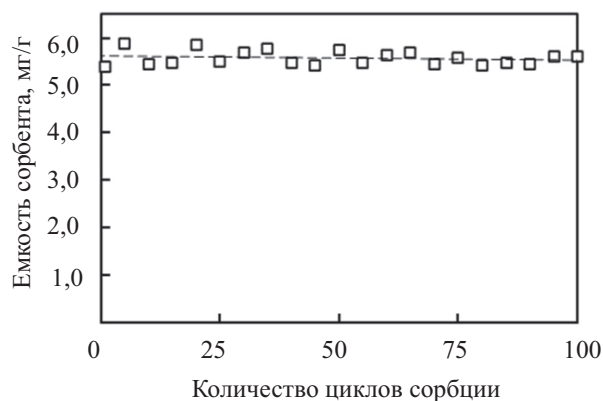


Рис. 8. Изменение емкости сорбента в зависимости от количества циклов сорбции и десорбции лития

Fig. 8. Sorbent capacity variation depending on the number of lithium adsorption and desorption cycles

Таким образом, ресурсные испытания показали, что сорбент на основе слоистого гидроксида алюминия-лития в сочетании со связующим из карбоксиметилцеллюлозы способен поглощать ионы лития из минерализованных рассолов, сохраняя при этом стабильность емкостных показателей на протяжении не менее 100 циклов сорбции/десорбции, что подтверждает его промышленный потенциал.

Анализ литиевого элюата методом ИСП-А-ЭС (табл. 4) показал, что соотношение $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/Li^{+}$ удалось снизить в 682 раза по сравнению с исходным рассолом. Высокая избирательность Al-Li СДГ сорбента к ионам лития в присутствии избытка конкурирующих катионов (Na^{+} , K^{+} , Ca^{2+} , Mg^{2+}) может быть объяснена особенностями дегидратации ионов в высокоминерализованной среде. Ионы Mg^{2+} , несмотря на меньшие размеры относительно ионов лития (Mg^{2+} : 0,72 Å, Li^{+} : 0,76 Å [28]), обладают высокой энерги-

Таблица 4. Элементный состав исходного рассола, промывных вод и элюата десорбции лития

Table 4. Elemental composition of the initial brine, wash water and lithium desorption eluate

Элемент	Содержание, г/дм ³		
	Исходный рассол	Промывные воды (2,0 КО)	Элюат (6,0 КО)
Li ⁺	0,24	0,73	0,41
Na ⁺	30,59	15,25	0,02
K ⁺	12,8	6,36	0,01
Ca ²⁺	64,93	31,99	0,16
Mg ²⁺	10,86	5,34	0,03
BO ₃ ³⁻	1,2	0,87	0,10
Ключевые технологические соотношения			
Mg ²⁺ /Li ⁺	45,2	7,36	0,07
Ca ²⁺ /Li ⁺	270,5	44,07	0,39
(Ca ²⁺ +Mg ²⁺)/Li ⁺	315,8	51,44	0,46

ей гидратации (Mg^{2+} : –1898 кДж/моль, Li^{+} : –506 кДж/моль [29]), что препятствует удалению их гидратных оболочек и внедрению в структуру сорбента. При этом для ионов Li^{+} дегидратация энергетически более выгодна в условиях высокой ионной силы рассола. Одновалентные ионы Na^{+} и K^{+} , хотя и дегидратируются легче (энергия гидратации –391 и –308 кДж/моль, соответственно [29]), не способны занимать позиции Li^{+} в слоевом пространстве Al-Li СДГ из-за высокого различия размеров ионных радиусов (Na^{+} : 1,02 Å, K^{+} : 1,38 Å против 0,76 Å у Li^{+} [28]). Таким образом, комбинация термодинамических (энергия гидратации) и структурных (размер иона) факторов обеспечивает избирательность сорбента исключительно к ионам Li^{+} .

Полученные результаты демонстрируют высокую селективность к ионам лития сорбента на основе слоистого двойного гидроксида алюминия-лития, использование которого позволяет решить проблему испарительной технологии извлекать литий из рассолов с критически высоким содержанием ионов кальция и магния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований сорбции лития из подземного минерализованного рассола была подтверждена возможность извлекать литий с использованием литий-селективного сорбента на основе слоистого двойного

гидроксида алюминия-лития. Был синтезирован литий-селективный сорбент с использованием органического связующего – карбоксиметилцеллюлозы. Были изучены свойства сорбента, его емкость по литию и получены данные по сорбции лития в статических и динамических условиях при различной удельной скорости потока. Было показано, что сорбент обладает полной динамической обменной емкостью по литию на уровне 5,7 мг/г и может быть использован для извлечения лития из высокоминерализованных рассолов. Проведенные эксперименты показали, что использование данного сорбента позволяет извлекать литий с достаточно высоким показателем извлечения (до 95%) для исследуемого рассола с концентрацией лития на уровне 240 мг/дм³ при общем содержании солей 321 г/дм³. Ресурсные испытания показали, что синтезированный Al-Li-СДГ сорбент способен стабильно поглощать ионы лития на протяжении не менее ста циклов сорбции с сохранением первоначальных емкостных показателей.

Анализ фракции литиевого элюата (6,0 КО) демонстрирует высокую селективность Al-Li-СДГ сорбента, в частности соотношение $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/Li^{+}$ удалось снизить в 682 раза с 315,8 в исходном рассоле до 0,46 в литиевом элюате, что существенно повышает рентабельность дальнейшего выделения лития из элюата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудрявцев П.Г. Литий: мировые запасы и перспективы применения // Альтернативная энергетика и экология. 2016. No. 1-2. P. 107–108. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.13-14.072-088>. EDN: YSQEVV.
2. Malhi G.S., Tanious M., Das P., Coulston C.M., Berk M. Potential mechanisms of action of lithium in bipolar disorder // Current understanding. 2013. Vol. 27. Iss. 2. P. 135–153. <https://doi.org/10.1007/s40263-013-0039-0>. EDN: RICABV.
3. Zarone F., Ruggiero G., Leone R., Breschi L., Leuci S., Sorrentino R. Zirconia-reinforced lithium silicate (ZLS) mechanical and biological properties: a literature review // Journal of Dentistry. 2021. Vol. 109. P. 103661. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103661>. EDN: INSAAT.
4. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Оглодков М.С., Михайлов Е.Д. Алюминийлитиевые сплавы для самолетостроения // Металлург. 2012. № 5. P. 31–35. EDN: OZKXPR.
5. Petrescu F.I.T., Apicella A., Petrescu R.V.V., Kozaitis S.P., Bucinell R.B., Aversa R., Abu-Lebdeh T.M. Environmental protection through nuclear energy // American Journal of Applied Sciences. 2016. Vol. 13. Iss. 9. P. 941–946. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2016.941.946>.
6. Donahue C.J. Lubricating grease: a chemical primer // Journal of chemical education. 2006. Vol. 83. Iss. 6. P. 862. <https://doi.org/10.1021/ed083p862>.
7. Ebensperger A., Maxwell P., Moscoso C. The lithium industry: its recent evolution and future prospects // Resources Policy. 2005. Vol. 30. Iss. 3. P. 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2005.09.001>.
8. Султанова А.Г., Мичурин С.В. Некоторые вопросы геохимии лития и его распределение в рифейских породах Южного Урала // Геологический вестник. 2024. № 2. С. 65–80. <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2024-2-6>. EDN: COOISR.
9. Xu Wenhua, He Lihua, Zhao Zhongwei. Lithium extraction from high Mg/Li brine via electrochemical intercalation/de-intercalation system using $LiMn_2O_4$ materials // Desalination. 2021. Vol. 503. P. 114935. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114935>. EDN: CLOYGN.

10. Миронов Ю.Б., Карпунин А.М., Фукс В.З. Эпохи формирования и типы месторождений лития зарубежных стран // Региональная геология и металлогения. 2022. № 92. С. 105–116. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2022_92_105-116. EDN: QCEVYK.
11. Tadesse B., Makuei F., Albijanic B., Dyer L. The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: a review // Minerals Engineering. 2019. Vol. 131. P. 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.023>. EDN: DRPKWM.
12. Саркаров Р.А., Белан С.И., Гусейнов Н.М. Оценка современного состояния и перспективы добычи лития и его соединений в России // Индустриальная экономика. 2022. № 1-2. С. 57–68. https://doi.org/10.47576/2712-7559_2022_2_1_57. EDN: ASXGDV.
13. Wang Jing, Koenig Jr.G.M. Direct lithium extraction using intercalation materials // Chemistry–A European Journal. 2024. Vol. 30. Iss. 4. P. e202302776. <https://doi.org/10.1002/chem.202302776>. EDN: QCJNUW.
14. Hochstetter C. Untersuchung über die Zusammensetzung einiger Mineralien // Journal für Praktische Chemie. 1842. Vol. 27. Iss. 1. P. 375–378. <https://doi.org/10.1002/prac.18420270156>.
15. Serna C.J., Rendon J.L., Iglesias J.E. Crystal-chemical study of layered $[\text{Al}_2\text{Li}(\text{OH})_6]\text{X}\cdot n\text{H}_2\text{O}$ // Clays and Clay Minerals. 1982. Vol. 30. Iss. 3. P. 180–184. <https://doi.org/10.1346/ccmn.1982.0300303>. EDN: ARHFUU.
16. Капустин А.Е. Неорганические аниониты // Успехи химии. 1991. Т. 60. № 12. С. 2685–2717. <https://doi.org/10.1070/RC1991v060n12ABEH001155>.
17. Li Jun, Luo Qinglong, Dong Mingzhe, Nie Guoliang, Liu Zhong, Wu Zhijian. Synthesis of granulated Li/Al-LDHs adsorbent and application for recovery of Li from synthetic and real saltlake brines // Hydrometallurgy. 2022. Vol. 209. P. 105828. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105828>. EDN: JBIJCU.
18. Luo Qinglong, Mingzhe Dong, Nie Guoliang, Liu Zhong, Wu Zhijian, Li Jun. Extraction of lithium from salt lake brines by granulated adsorbents // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021. Vol. 628. P. 127256. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127256>. EDN: UCJREX.
19. Paranthaman M.P., Li Ling, Luo Jiaqi, Hoke T., Ucar H., Moyer B.A., et al. Recovery of lithium from geothermal brine with lithium–aluminum layered double hydroxide chloride sorbents // Environmental Science and Technology. 2017. Vol. 51. Iss. 22. P. 13481–13486. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03464>. EDN: YKBOAA.
20. Zhong Jing, Lin Sen, Yu Jianguo. Lithium recovery from ultrahigh $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ ratio brine using a novel granulated Li/Al-LDHs adsorbent // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 256. P. 117780. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117780>. EDN: DYMNHS.
21. Wu Lili, Li Ling, Evans S.F., Eskander T.A., Moyer B.A., Hu Zhichao, et al. Lithium aluminum-layered double hydroxide chlorides (LDH): formation enthalpies and energetics for lithium ion capture // Journal of the American Ceramic Society. 2019. Vol. 102. Iss. 5. P. 2398–2404. <https://doi.org/10.1111/jace.16150>.
22. Isupov V.P., Kotsupalo N.P., Nemudry A.P., Menzeres L.T. Aluminium hydroxide as selective sorbent of lithium salts from brines and technical solutions // Studies in surface science and catalysis. 1999. Vol. 120A. P. 621–652. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(99\)80567-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(99)80567-9). EDN: LFMMWH.
23. Zhong Jing, Lin Sen, Yu Jianguo. Li^+ adsorption performance and mechanism using lithium/aluminum layered double hydroxides in low grade brines // Desalination. 2021. Vol. 505. P. 114983. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114983>. EDN: VTOMNU.
24. Zhong Jing, Lin Sen, Yu Jianguo. Effects of excessive lithium deintercalation on Li^+ adsorption performance and structural stability of lithium/aluminum layered double hydroxides // Journal of Colloid and Interface Science. 2020. Vol. 572. P. 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.03.081>. EDN: BHEWSW.
25. Li Dongdong, Zhang Ning, Gao Dandan, Zhuang Ziyu, Zeng Dewen. Phase chemistry for hydration sensitive (de) intercalation of lithium aluminum layered double hydroxide chlorides // ACS Materials Au. 2023. Vol. 4. Iss. 1. P. 45–54. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.3c00063>. EDN: UOSSQO.
26. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Гладков А.С., Трифонов Н.С., Серебряков Е.В., Павлов С.С. [и др.]. Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1235–1253. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0393>. EDN: XSUIEX.
27. Вольдман Г.М. Основы экстракционных и ионообменных процессов в металлургии. М.: Металлургия, 1983. 376 с.
28. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // Foundations of Crystallography. 1976. Vol. A32. Iss. 5. P. 751–767. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>.
29. Schmid R., Miah A.M., Sapunov V.N. A new table of the thermodynamic quantities of ionic hydration: values and some applications (enthalpy–entropy compensation and Born radii) // Physical Chemistry Chemical Physics. 2000. Vol. 2. Iss. 1. P. 97–102. <https://doi.org/10.1039/a907160a>. EDN: LFXEX.

References

1. Kudryavtsev P.G. Lithium: Global reserves and application prospects. *Alternative Energy and Ecology*. 2016;1-2:107-108. (In Russ.). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.13-14.072-088>. EDN: YSQEVV.
2. Malhi G.S., Tanious M., Das P., Coulston C.M., Berk M. Potential mechanisms of action of lithium in bipolar disorder. *Current understanding*. 2013;27(2):135-153. <https://doi.org/10.1007/s40263-013-0039-0>. EDN: RICABV.
3. Zarone F., Ruggiero G., Leone R., Breschi L., Leuci S., Sorrentino R. Zirconia-reinforced lithium silicate (ZLS) mechanical and biological properties: a literature review. *Journal of Dentistry*. 2021;109:103661. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103661>. EDN: INSAAT.

4. Khokhlatova L.B., Kolobnev N.I., Oglodkov M.S., Mikhaylov E.D. Aluminum-lithium alloys for aircraft building. *Metallurg.* 2012;31:35. (In Russ.). EDN: OZKXPR.
5. Petrescu F.I.T., Apicella A., Petrescu R.V.V., Kozaitis S.P., Bucinell R.B., Aversa R., Abu-Lebdeh T.M. Environmental protection through nuclear energy. *American Journal of Applied Sciences.* 2016;13(9):941-946. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2016.941.946>.
6. Donahue C.J. Lubricating grease: a chemical primer. *Journal of chemical education.* 2006;83(6):862. <https://doi.org/10.1021/ed083p862>.
7. Ebersperger A., Maxwell P., Moscoso C. The lithium industry: Its recent evolution and future prospects. *Resources Policy.* 2005;30(3):218-231. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2005.09.001>.
8. Sultanova A.G., Michurin S.V. Some issues of lithium geochemistry and its distribution in Rifhean rocks of the Southern Urals. *Geologicheskii vestnik.* 2024;2:65-80. (In Russ.). <https://doi.org/10.31084/2619-0087/2024-2-6>. EDN: COOISR.
9. Xu Wenhua, He Lihua, Zhao Zhongwei. Lithium extraction from high Mg/Li brine via electrochemical intercalation/de-intercalation system using LiMn_2O_4 materials. *Desalination.* 2021;503:114935. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114935>. EDN: CLOYGN.
10. Mironov Yu.B., Karpunin A.M., Fuks V.Z. Formation epochs and types of lithium deposits in foreign countries. *Regional geology and metallogeny.* 2022;92:105-116. (In Russ.). https://doi.org/10.52349/0869-7892_2022_92_105-116. EDN: QCEVYK.
11. Tadesse B., Makuei F., Albijanic B., Dyer L. The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: a review. *Minerals Engineering.* 2019;131:170-184. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.023>. EDN: DRPKWM.
12. Sarkarov R.A., Belan S.I., Guseinov N.M. Assessment of the current state and prospects for the production of lithium and its compounds in Russia. *Industrial Economics.* 2022;1-2:57-68. (In Russ.). https://doi.org/10.47576/2712-7559_2022_2_1_57. EDN: ASXGDV.
13. Wang Jing, Koenig Jr.G.M. Direct lithium extraction using intercalation materials. *Chemistry–A European Journal.* 2024;30(4):e202302776. <https://doi.org/10.1002/chem.202302776>. EDN: QCJNUW.
14. Hochstetter C. Untersuchung über die Zusammensetzung einiger Mineralien. *Journal für Praktische Chemie.* 1842;27(1):375-378. <https://doi.org/10.1002/prac.18420270156>.
15. Serna C.J., Rendon J.L., Iglesias J.E. Crystal-chemical study of layered $[\text{Al}_2\text{Li}(\text{OH})_6]\text{X} \cdot n\text{H}_2\text{O}$. *Clays and Clay Minerals.* 1982;30(3):180-184. <https://doi.org/10.1346/ccmn.1982.0300303>. EDN: ARHFUU.
16. Kapustin A.E. Inorganic anion exchangers. *Russian Chemical Reviews.* 1991;60(12):2685–2717. (In Russ.). <https://doi.org/10.1070/RC1991v060n12ABEH001155>.
17. Li Jun, Luo Qinglong, Dong Mingzhe, Nie Guoliang, Liu Zhong, Wu Zhijian. Synthesis of granulated Li/Al-LDHs adsorbent and application for recovery of Li from synthetic and real saltlake brines. *Hydrometallurgy.* 2022;209:105828. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105828>. EDN: JBIJCU.
18. Luo Qinglong, Mingzhe Dong, Nie Guoliang, Liu Zhong, Wu Zhijian, Li Jun. Extraction of lithium from salt lake brines by granulated adsorbents. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2021;628:127256. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127256>. EDN: UCJREX.
19. Paranthaman M.P., Li Ling, Luo Jiaqi, Hoke T., Ucar H., Moyer B.A., et al. Recovery of lithium from geothermal brine with lithium–aluminum layered double hydroxide chloride sorbents. *Environmental Science and Technology.* 2017;51(22):13481-13486. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03464>. EDN: YKBOAA.
20. Zhong Jing, Lin Sen, Yu Jianguo. Lithium recovery from ultrahigh $\text{Mg}^{2+}/\text{Li}^+$ ratio brine using a novel granulated Li/Al-LDHs adsorbent. *Separation and Purification Technology.* 2021;256:117780. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117780>. EDN: DYMNHS.
21. Wu Lili, Li Ling, Evans S.F., Eskander T.A., Moyer B.A., Hu Zhichao, et al. Lithium aluminum-layered double hydroxide chlorides (LDH): formation enthalpies and energetics for lithium ion capture. *Journal of the American Ceramic Society.* 2019;102(5):2398-2404. <https://doi.org/10.1111/jace.16150>.
22. Isupov V.P., Kotsupalo N.P., Nemudry A.P., Menzies L.T. Aluminium hydroxide as selective sorbent of lithium salts from brines and technical solutions. *Studies in surface science and catalysis.* 1999;120A:621-652. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(99\)80567-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(99)80567-9). EDN: LFMMWH.
23. Zhong Jing, Lin Sen, Yu Jianguo. Li^+ adsorption performance and mechanism using lithium/aluminum layered double hydroxides in low grade brines. *Desalination.* 2021;505:114983. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114983>. EDN: VTOMNU.
24. Zhong Jing, Lin Sen, Yu Jianguo. Effects of excessive lithium deintercalation on Li^+ adsorption performance and structural stability of lithium/aluminum layered double hydroxides. *Journal of Colloid and Interface Science.* 2020;572:107-113. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.03.081>. EDN: BHEWSW.
25. Li Dongdong, Zhang Ning, Gao Dandan, Zhuang Ziyu, Zeng Dewen. Phase chemistry for hydration sensitive (de) intercalation of lithium aluminum layered double hydroxide chlorides. *ACS Materials Au.* 2023;4(1):45-54. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.3c00063>. EDN: UOSSQO.
26. Alekseev S.V., Alekseeva L.P., Gladkov A.S., Trifonov N.S., Serebryakov E.V., Pavlov S.S., et al. Brines in deep horizons of the Udachnaya kimberlite pipe. *Geodynamics and Tectonophysics.* 2018;9(4):1235-1253. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0393>. EDN: XSUIEX.
27. Voldman G.M. *Fundamentals of extraction and ion-exchange processes in metallurgy.* Moscow: Metallurgy; 1983, 376 p. (In Russ.).

28. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Foundations of Crystallography*. 1976;A32(5):751-767. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>.

29. Schmid R., Miah A.M., Sapunov V.N. A new table of the thermodynamic quantities of ionic hydration: values and some applications (enthalpy-entropy compensation and Born radii). *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2000;2(1):97-102. <https://doi.org/10.1039/a907160a>. EDN: LFXEX.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алейников Сергей Александрович,
аспирант,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
Свободный просп., 79, Россия
✉ saaleynikov@yandex.ru
<http://orcid.org/0009-0001-7589-7049>

Белоусова Наталья Викторовна,
д.х.н., профессор,
заведующий кафедрой металлургии
цветных металлов,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск,
Свободный просп., 79, Россия
netmamba@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-1355-7399>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey A. Aleynikov,
Postgraduate Student,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
✉ saaleynikov@yandex.ru
<http://orcid.org/0009-0001-7589-7049>

Natalia V. Belousova,
Dr. Sci. (Chem.), Professor,
Head of the Non-Ferrous
Metals Metallurgy Department,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
netmamba@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-1355-7399>

Заявленный вклад авторов

Алейников С.А. определял цель работы, проводил эксперименты, проводил ИСП-АЭС анализы, писал статью. Белоусова Н.В. определяла цель работы, участвовала в обсуждении результатов и в подготовке статьи.

Authors' contribution

Sergey A. Aleynikov determined the purpose of the work, conducted experiments, carried out inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) analyses, wrote the article. Natalia V. Belousova determined the purpose of the work, participated in the discussion of results and preparation of the article for publication.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 21.06.2025 г.; одобрена после рецензирования 03.08.2025 г.; принята к публикации 17.08.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 21.06.2025; approved after reviewing 03.08.2025; accepted for publication 17.08.2025.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.213.6

EDN: HNUWVW

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-3-389-398



Усовершенствованная методика рационального анализа золота в углистом сорбционно-активном минеральном сырье

А.В. Бывальцев^{1✉}, О.Д. Хмельницкая², Г.И. Войлошников³,
Е.В. Богородский⁴, М.А. Гончарук⁵

¹⁻⁵Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Россия

⁵Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – разработка усовершенствованной методики и повышение достоверности рационального анализа золота в углистом сорбционно-активном минеральном сырье. При исследовании высокосорбционно-активного сырья классическая методика рационального анализа золота приводит к искажению результатов: доля цианируемого золота оказывается заниженной, а часть извлекаемого золота ошибочно отнесена к упорной форме. Это обусловлено высокой сорбционной активностью природного органического углерода, который активно сорбирует золото из жидкой фазы цианистой пульпы, конкурируя с искусственными сорбентами на всех стадиях выщелачивания. Разработана усовершенствованная методика рационального анализа высокосорбционно-активного сырья, включающая двухстадийную обработку на каждом этапе: сначала проводится цианирование в стандартных условиях с увеличенной загрузкой сорбента, затем – замена сорбента на свежий и высокотемпературная сорбционная обработка при температуре 80–95 °С в течение 2 ч. Методика была апробирована на нескольких видах углистого минерального сырья и позволила оценить полноту извлечения золота при цианировании. Так, результаты показали повышение доли золота в цианируемой форме на 4,2–12,5% по сравнению с классической методикой, что позволяет более точно дифференцировать формы нахождения металла и скорректировать технологические подходы к переработке сорбционно-активного сырья. Применение данной методики особенно важно для руд с высоким содержанием органического углерода и высокой сорбционной активностью, так как она обеспечивает более достоверные фазовые характеристики золота в сырье и позволяет производить корректный выбор технологической схемы переработки данного вида сырья. Методика рекомендована для внедрения в лабораторную, а также производственную практику.

Ключевые слова: золото, рациональный анализ, цианирование, углистое вещество, сорбционная активность

Для цитирования: Бывальцев А.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И., Богородский Е.В., Гончарук М.А. Усовершенствованная методика рационального анализа золота в углистом сорбционно-активном минеральном сырье // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 389–398. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-389-398>. EDN: HNUWVW.

METALLURGY

Original article

Improved gold diagnostic leaching procedure for carbonaceous preg-robbing ores

Alexander V. Byvaltsev^{1✉}, Olga D. Khmel'nitskaya², Grigoriy I. Voiloshnikov³,
Evgeniy V. Bogorodskiy⁴, Maksim A. Goncharuk⁵

¹⁻⁵Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

⁵Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The article presents an improved procedure for the diagnostic leaching of gold in carbonaceous preg-robbing mineral ores. When researching highly preg-robbing ores, classic diagnostic gold leaching approaches often lead to distorted results: the proportion of cyanidable gold is underestimated, while recoverable gold is erroneously attributed to refractory forms. This discrepancy arises from the high natural sorption activity of organic carbon, which interferes with artificial sorbents at all leaching stages to competitively adsorb gold from the liquid

phase of cyanide pulp. An advanced diagnostic two-stage leaching procedure for highly preg-robbing materials has been developed: first, cyanidation is carried out under standard conditions with an increased sorbent load, then high-temperature sorption processing at a temperature of 80–95 °C for 2 hours is carried out with fresh sorbent. Tests carried out on various carbonaceous mineral products demonstrated improved gold recovery efficiency during cyanidation. The 4.2–12.5 % increase in obtained cyanidable gold as compared to the conventional method enables more precise differentiation of gold forms and optimization of processing strategies for preg-robbing ores. This procedure is particularly valuable for ores having a high organic carbon content and strong preg-robbing capacity due to providing more reliable phase characterization of gold and supporting accurate selection of processing technologies. The protocol is recommended for implementation in both laboratory and industrial practice.

Keywords: gold, diagnostic leaching, cyanidation, carbonaceous matter, preg-robbing

For citation: Byvaltsev A.V., Khmel'nitskaya O.D., Voiloshnikov G.I., Bogorodskiy E.V., Goncharuk M.A. Improved gold diagnostic leaching procedure for carbonaceous preg-robbing ores. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):389-398. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-389-398>. EDN: HNUWVW.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается постоянное ухудшение качества минерального золотосодержащего сырья, вовлекаемого в переработку. В настоящее время значительная часть (~ 1/4) минерально-сырьевых золотых запасов находится в «упорных» рудах, характеризующихся сорбционной активностью (СА), когда выщелоченное в цианидный раствор золото сорбируется твердой фазой, не извлекается в товарную продукцию и теряется с хвостами в сорбированном виде [1–5].

В большинстве случаев СА проявляет природное углистое вещество (органический углерод) – сорбирующий цианидный комплекс золота $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$. Независимо от типа и механизма действия, природный сорбент действует аналогично искусственному сорбенту, как правило, добавляемому в процесс цианирования (ионообменные смолы или активные угли), он поглощает растворенное золото из жидкой фазы пульпы и тем самым создает конкуренцию искусственному сорбенту. При этом равновесная СА твердой фазы обычно существенно ниже, чем СА искусственного сорбента, однако, учитывая ее развитую поверхность (на несколько порядков превосходящую поверхность искусственного сорбента), твердая фаза оказывает существенное влияние в начальный период выщелачивания золота, когда происходит выщелачивание металлического золота. Фактически складывается ситуация, когда искусственный сорбент не успевает извлечь выщелоченное золото и оно сорбируется на природный сорбент, впоследствии теряясь с хвостами цианирования [6–13].

Во многих случаях, и при относительно высоком содержании растворимого (цианируемого) золота в сырье (граммы и десятки граммов на тонну), органический углерод,

входящий в состав сырья, проявляет настолько высокую СА, что золото абсолютно не появляется в жидкой фазе пульпы при цианировании – его концентрация не превышает 0,1 мг/дм³.

В общем случае при обычном цианировании сорбционно-активного сырья никогда не достигается максимально возможное извлечение Au, т.к. и в присутствии искусственного сорбента часть золота все же оказывается сорбирована природным органическим углеродом и остается в твердой фазе. В том числе вышесказанное касается и обычной общепринятой методики рационального (фазового) анализа золота, повсеместно применяемой на золотодобывающих предприятиях и профильных научно-исследовательских организациях [14–21]. При стандартном рациональном анализе сорбционно-активного сырья результаты, получаемые по упорности Au, неверно интерпретируются, т.к. золото, недоизвлеченное на предыдущих стадиях цианирования из-за СА, частично доизвлекается на последующих стадиях цианирования за счет замены сорбента на свежий. Таким образом, упорность, связанная с СА сырья, ошибочно интерпретируется как упорность других типов (вкрапленность в минералах и в пленках, растворимых в NaOH, HCl и т.д.).

Из исследовательской и промышленной золотодобывающей практики известно, что некоторые факторы, как правило, оказывают подавляющее действие на СА минерального сырья [3–21]:

- использование более активного по золоту сорбента приводит к большему извлечению золота при цианировании: наибольшей активностью характеризуются высокоосновные и смешанные смолы типа АМ-2Б, средней – угольные сорбенты, меньшей – низкоосновные смолы типа Purogold;

– величина загрузки сорбента – чем выше загрузка сорбента, тем выше извлечение Au;

– повышение температуры, как правило, приводит к снижению СА твердой фазы.

Каждый из трех факторов по отдельности и совокупно подавляет СА сырья и заметно повышает извлечение Au при цианировании, причем действие этих факторов наблюдается практически для всех типов углистого сорбционно-активного сырья. На основании этих факторов нами предлагается усовершенствованная (модифицированная) методика рационального анализа золота для сорбционно-активного сырья, отличающаяся от обычной двустадийным цианированием на каждом этапе рационального анализа (цианирование после амальгамации, после обработок NaOH, HCl, HNO₃ и после окислительного обжига):

– первая стадия цианирования проводится в обычных условиях, но с обязательным использованием свежего сорбента (смола или уголь) при повышенной загрузке;

– на второй стадии сорбент заменяется на свежую порцию и проводится высокотемпературная сорбционная обработка (ВСО).

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка усовершенствованной методики и повышение достоверности рационального анализа золота в углистом сорбционно-активном минеральном сырье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на углистых сорбционно-активных продуктах, характеристики которых приведены в табл. 1. Рациональный анализ на золото проводили

ли по двум вариантам, схематично изображенным на рис. 1 и 2. Варианты отличались лишь условиями цианирования:

– по обычной методике цианирование вели в одну стадию в стандартных условиях – комнатная температура, отношение Ж:Т = 2:1, концентрация NaCN – 2 г/дм³, pH – 11–12, продолжительность – 24 ч; загрузка свежего сорбента – 10 об. %;

– по предлагаемой методике выщелачивание проводили в две стадии – на первой цианировали в тех же условиях, но при повышенной загрузке сорбента 20 об. %, на второй – сорбент заменяли на свежий (при той же загрузке 20 об. %) и проводили высокотемпературную сорбционную обработку при 80–95°C в течение 2 ч, позволяющую десорбировать золото из природного углистого вещества.

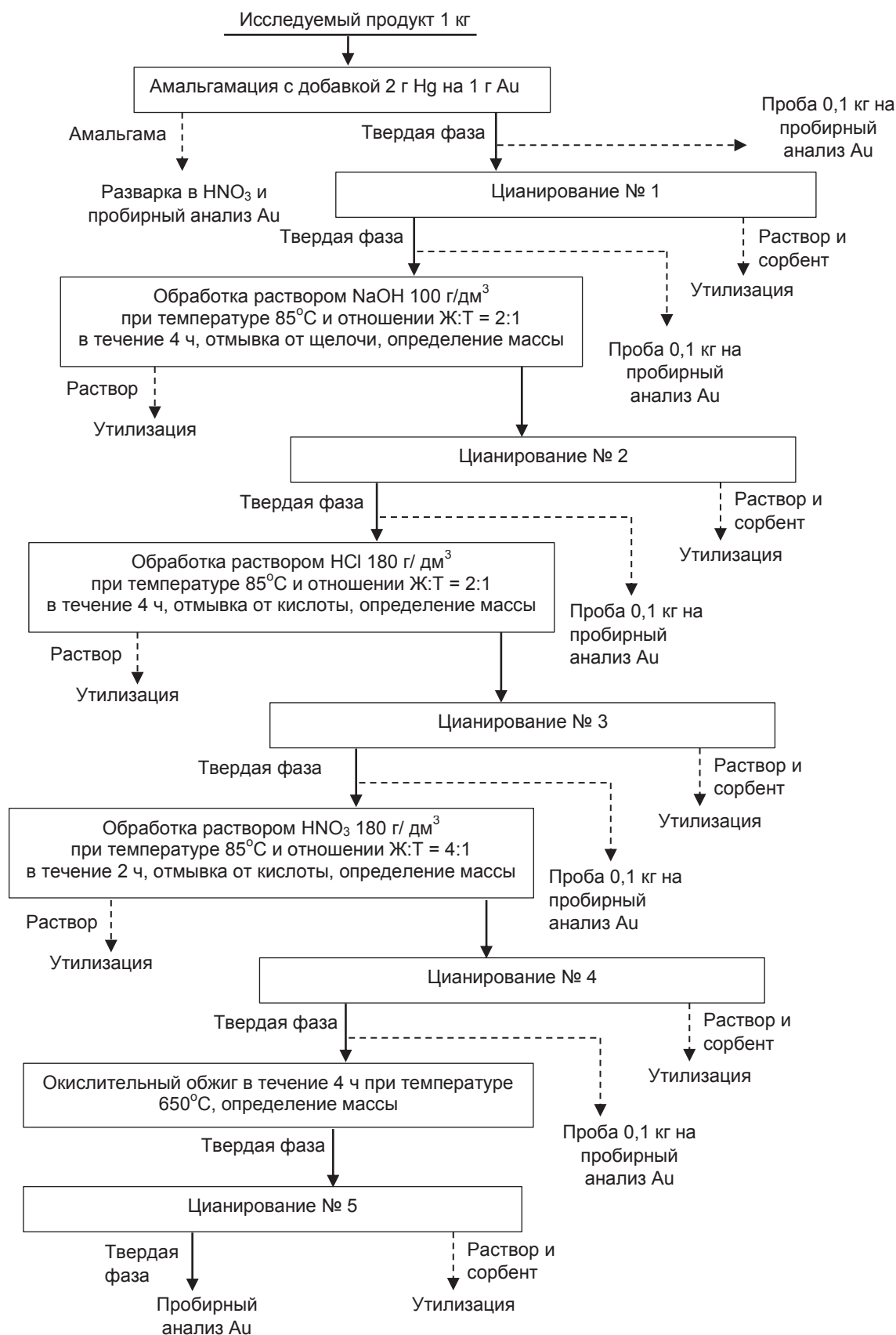
На последнем этапе рационального анализа после обжига проводили лишь стадию обычного цианирования при комнатной температуре, т.к. при корректном ведении обжига органический углерод полностью удаляется из сырья, со снижением СА твердой фазы практически до 0, вследствие чего проведение ВСО не требуется.

Долю золота с определенным характером минерализации (кроме первой стадии – амальгамации) рассчитывали как разницу между исходным содержанием золота до соответствующей обработки (цианирование, NaOH, HCl, HNO₃, обжиг) и содержанием золота в хвостах цианирования (включая вторую высокотемпературную стадию для предлагаемой методики) после этой обработки, с учетом выхода твердой фазы в процессе обработки, отнесенной к исходному содержанию золота в продукте.

Таблица 1. Характеристики исследованных углистых сорбционно-активных продуктов
Table 1. Characteristics of the examined preg-robbing carbonaceous products

Характеристики исследуемых продуктов		Значения		
Наименование продукта		Флотоконцентрат руды месторождения № 1	Флотоконцентрат руды месторождения № 2	Руда месторождения № 3
Краткое наименование продукта		Продукт № 1	Продукт № 2	Продукт № 3
Содержание компонентов	Au, г/т	14,3	10,0	8,30
	C(орг), %	4,1	3,2	0,62
Массовая доля класса минус 0,071 мм, %		93	97	95
*СА, %		95,3	96,4	98,9

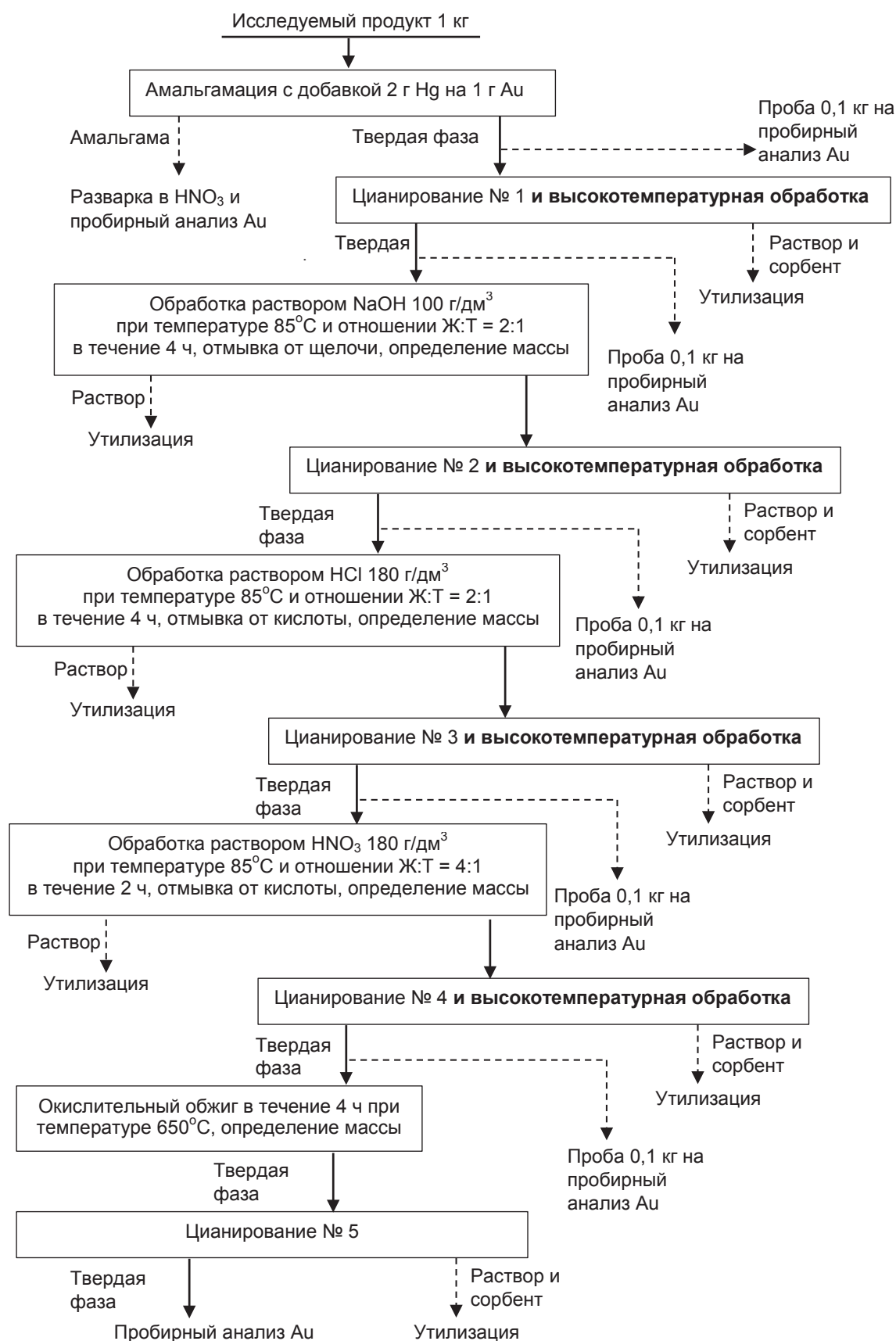
*Примечание: СА продуктов определена по методике «Иргиредмета» как доля растворимого (цианируемого) золота, сорбируемого твердой фазой пульпы в ходе опытов по цианированию без добавки искусственного сорбента [14].



Примечание: условия цианирования приведены в тексте.

Рис. 1. Схема рационального анализа по обычной методике

Fig. 1. Flowchart of diagnostic leaching using the conventional procedure



Примечание: условия цианирования и высокотемпературной обработки приведены в тексте.

Рис. 2. Схема рационального анализа по усовершенствованной методике
Fig. 2. Flowchart of diagnostic leaching using the improved procedure

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты рационального анализа исследованных продуктов по обычной и предлагаемой методике приведены в табл. 2.

Из полученных результатов видно, что по предлагаемой методике по сравнению с классической:

- доля золота в цианируемой форме оказалась выше на 4,2–12,5%;
- вскрываемого обработкой NaOH, оказалась ниже на 0,1–0,5%;
- HCl, оказалась ниже на 0,5–4,5%;
- HNO₃, оказалась ниже на 1,2–5,9%;
- вскрываемого обжигом, оказалась ниже на 0,1–4,0%;
- тонковкрапленного в породообразующие минералы, оказалась ниже на 0,9–1,9%.

В табл. 3 приведены краткие результаты для ряда продуктов с меньшей СА в пределах 8,0–84,5%, для которых были выполнены аналогичные исследования по классической и усовершенствованной методикам рационального анализа.

Для слабосорбционно-активных продуктов с СА по методике «Иргиредмета» не более 20% обычная методика дает адекватные результаты, однако при СА на уровне 20–40% погрешность рационального анализа (занижение доли золота в цианируемой форме) составила 0,8–2,1%. При величине СА на уровне более 40% погрешность рационального анализа повысилась до 4,3–7,3%. На рис. 3 приведена зависимость погрешности рационального анализа от величины СА для изученных продуктов.

Таблица 2. Результаты рационального (фазового) анализа золота для высокосорбционно-активных продуктов
Table 2. Results of diagnostic (phase) leaching of gold for highly preg-robbing products

Наименование продукта		Продукт № 1		Продукт № 2		Продукт № 3	
Методика		Обычная	Усов.	Обычная	Усов.	Обычная	Усов.
Доля золота, %, с указанным характером минерализации	Цианируемое, в т.ч.	59,4	67,6	88,4	92,6	80,1	92,6
	Амальгируемое	7,5	7,5	15,7	15,7	35,8	35,8
	Упорное (нецианируемое), в т.ч.	40,6	32,4	11,6	7,4	19,9	7,4
	Извлекаемое после обработки NaOH (ассоциированное с минералами сурьмы, мышьяка, аморфным кремнеземом)	4,8	4,3	1,2	0,8	0,5	0,4
	Извлекаемое после обработки HCl (ассоциированное с гидроксидами железа, хлоритами, карбонатами и др.)	6,3	5,1	1,6	1,1	6,4	1,9
	Извлекаемое после обработки HNO ₃ (ассоциированное с сульфидами)	12,5	11,3	4,3	2,2	8,3	2,4
	Извлекаемое после обжига (ассоциированное с углеродом)	8,7	4,7	2,3	2,0	0,5	0,4
	Тонковкрапленное в породообразующие минералы	8,3	7,0	2,2	1,3	4,2	2,3
	Итого в исходном	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Разница результатов по модифицированной методике рационального анализа по сравнению с обычной методикой, % (доля золота)	Цианируемое, в т.ч.	8,2		4,2		12,5	
	Амальгируемое	0		0		0	
	Упорное (нецианируемое), в т.ч.	-8,2		-4,2		-12,5	
	Извлекаемое после обработки NaOH	-0,5		-0,4		-0,1	
	Извлекаемое после обработки HCl	-1,2		-0,5		-4,5	
	Извлекаемое после обработки HNO ₃	-1,2		-2,1		-5,9	
	Извлекаемое после обжига	-4,0		-0,3		-0,1	
	Тонковкрапленное в породообразующие минералы	-1,3		-0,9		-1,9	

Таблица 3. Краткие результаты рационального анализа для продуктов с различной сорбционной активностью
Table 3. Summary results of diagnostic leaching for products with a different preg-robbing index

Наименование продукта		Руда № 11	Руда № 12	Руда № 13	Руда № 14	Руда № 15	Флото-концентрат № 3	Флото-концентрат № 4
Содержание компонентов	Au, г/т	0,84	1,6	1,78	2,40	1,27	11,8	27,3
	C(орг), %	0,28	0,55	0,40	0,83	0,18	1,28	1,74
Сорбционная активность твердой фазы по методике «Иргиредмета», %		8,0	12,3	27,4	38,0	46,2	70,8	84,5
Разница результатов по усовершенствованной методике рационального анализа по сравнению с обычной методикой, % (доля золота)	Цианируемое, в т.ч.	0,0	0,0	0,8	2,1	4,3	4,7	7,3
	Упорное (нецианируемое), в т.ч.	0,0	0,0	-0,8	-2,1	-4,3	-4,7	-7,3
	Извлекаемое после обработки NaOH	0,0	0,0	0,0	-0,4	-0,2	0,0	-1,2
	Извлекаемое после обработки HCl	0,0	0,0	-0,3	-0,3	-0,8	-1,7	-1,0
	Извлекаемое после обработки HNO ₃	0,0	0,0	-0,4	-1,0	-1,8	-1,3	-2,2
	Извлекаемое после обжига	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,7	-0,7	-1,7
	Тонковкрапленное в поро-дообразующие минералы	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,8	-1,0	-1,2

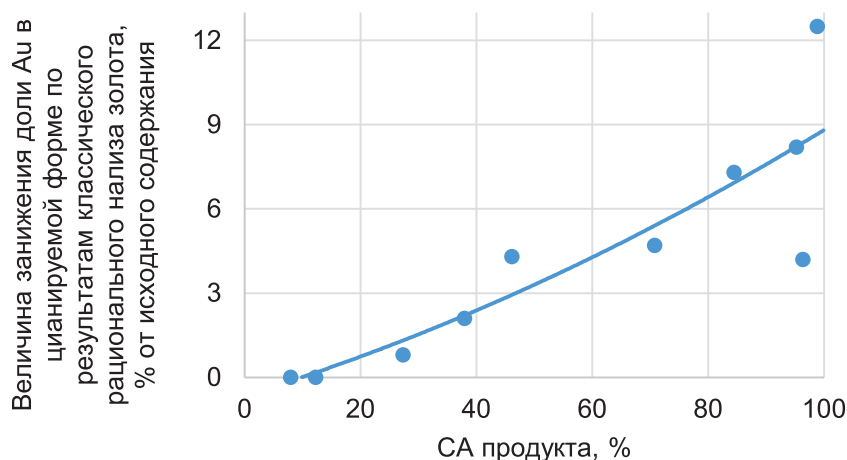


Рис. 3. Занижение доли золота в цианируемой форме по обычному рациональному анализу в зависимости от величины сорбционной активности твердой фазы

Fig. 3. Underestimation of cyanide-soluble gold proportion by conventional diagnostic leaching as a function of preg-robbing index of the solid phase

Исходя из полученной зависимости, для обеспечения погрешности рационального анализа на уровне не более 3% рекомендуется применять усовершенствованную методику для продуктов с СА по методике «Иргиредмета» на уровне более 40%. Если СА составляет меньшую величину, применение обычной методики обеспечивает корректные результаты, а использование усовершенствованной методики является нецелесообразным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам обычного рационального анализа для изученных умеренно- и высоко-сорбционно-активных продуктов (с СА более 40%) занижение доли золота в цианируемой форме составило 4,2–12,5%. Согласно классической методике, указанное количество золота должно быть ошибочно отнесено к различным видам упорности (вкрапленность в сульфиды, порообразующие минералы

и т.д.), хотя фактически оно относится к цианируемой форме, но трудноизвлекаемой из-за высокой СА сырья. Отсюда следует, что высокая СА сырья «маскируется» под другие виды упорности из-за невозможности извлечь все цианируемое золото за одну стадию цианирования в обычном режиме.

Рекомендуется использовать разработанную методику для высокосорбцион-

но-активного сырья (с СА более 40%) с включением дополнительной высокотемпературной стадии для получения более достоверных результатов рационального анализа золота, что позволит принимать более эффективные решения при разработке технологий переработки данного типа сырья и в ходе самой промышленной переработки.

Список источников

1. Edahbi M., Ounoughi M., Bouzahzah H., Boujlel K. CIL gold loss characterization within oxidized leach tails: creating a synergistic approach between mineralogical characterization, diagnostic leach tests, and preg-robbing tests // *Minerals*. 2019. Vol. 9. Iss. 9. P. 557. <https://doi.org/10.3390/min9090557>.
2. Saders J.A., Gravel J., Janke L., Hall L. In-depth study on carbon speciation focussed on graphite // *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings* (Victoria, 13–14 November 2015). Victoria: British Columbia Ministry of Energy and Mines, 2015. P. 187–191.
3. Bas A.D., Altinkaya P., Yazici E.Y., Devci H. Preg-robbing potential of sulphide-bearing gold ores // *Proceedings of 13th International Mineral Processing Symposium-IMPS* (Bodrum, 10–12 October 2012). Bodrum, 2012. P. 613–618.
4. Borges G.F. Efeito preg-robbing em minerais auríferos por compostos carbonáceos: estado da arte. Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2021. 48 p.
5. Mabwe N.R. Potential pre-treatment and processing routes for recovery of gold from complex (refractory) gold ores. A review // *Proceedings of the 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (Harare, 7–10 December 2020). Harare, 2020. P. 1708–1715.
6. Cetin M.C., Altun N.E., Atalay M.Ü., Büyüktanır K. Bottle roll testing for cyanidation of gold ores: problems related to standardized procedures on difficult-to-process ores // *Proceedings of the 3rd World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering* (Rome, 8–10 June 2017). Rome, 2017. P. 148. <https://doi.org/10.11159/mmme17.148>.
7. Dunne R., LeVier M., Acar S., Kappes R. Keynote address: Newmont's contribution to gold technology // *World Gold Conference* (Johannesburg, 2009). Johannesburg: Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009. P. 221–230.
8. Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д., Богородский Е.В. Проблемы переработки углистых сорбционноактивных золотых руд // *Теория и технология металлургического производства*. 2024. Т. 51. № 4. С. 18–23. EDN: PTZFB.
9. Asamoah R.K., Amankwah R.K., Addai-Mensah J. Cyanidation of refractory gold ores: A Review // *3rd UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference* (Tarkwa, Juli 2014). Tarkwa, 2014. P. 204–212. <https://doi.org/10.13140/2.1.4772.6407>.
10. Mustapha A., Asamoah R.K., Ofori-Sarpong G., Amankwah R.K. Preg-robbing characteristics of gold ores in Ghana // *3rd UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference* (Tarkwa, Juli 2014). Tarkwa, 2014. P. 192–196.
11. Ahtiainen R., Lundström M., Liipo J. Preg-robbing verification and prevention in gold chloride-bromide leaching // *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 128. P. 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.037>.
12. Бывальцев А.В., Войлошников Г.И., Хмельницкая О.Д. Методика подготовки углеродсодержащих хвостов цианирования к анализу // *iPolytech Journal*. 2025. Т. 29. № 1. С. 123–132. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-123-132>. EDN: IOWITS.
13. Helm M.M., Vaughan J.P., Staunton W.P. Evaluation of preg-robbing in Goldstrike carbonaceous ore using Raman spectroscopy // *Proceedings of the 50th Conference of Metallurgists* (Montreal, 2–5 October 2011). Montreal, 2011. P. 595–606.
14. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. В 2-х т.; т. 2. Иркутск: Иргиредмет, 1999. 786 с.
15. Зеленов В.И. Методика исследований золото- и серебросодержащих руд. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1989. 302 с.
16. Stephen R.S., Anuar W.N.S., Ismail S., Jabit N.A. Characterisation and diagnostic leaching of gold-bearing mineral ore, east coast peninsular Malaysia // *Malaysian Journal of Microscopy*. 2021. Vol. 17. Iss. 2. P. 139–153. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00156-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00156-4).
17. Guner M.K., Bulut G., Hassanzadeh A., Lode S., Aasly K. Automated mineralogy and diagnostic leaching studies on bulk sulfide flotation concentrate of a refractory gold ore // *Minerals*. 2023. Vol. 13. Iss. 10. P. 1243. <https://doi.org/10.3390/min13101243>.
18. Henley K.J., Clarke N.C., Sauter P. Evaluation of a diagnostic leaching technique for gold in native gold and gold ± silver tellurides // *Minerals Engineering*. 2001. Vol. 14. Iss. 1. P. 1–12. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00156-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00156-4).

19. Celep O., Alp I., Deveci H. Application of diagnostic leaching technique for refractory gold ores // D.P.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 2008. No. 16. P. 81–90.
20. Бекпулатов Ж.М., Худайбердиев Ф.Т. Изучение вещественного состава и разработка технологии переработки золотосодержащей пробы руды одного из месторождений Республики Узбекистан // Инновационная наука. 2017. Т. 3. № 4. С. 20–23. EDN: YLZMAH.
21. Шумилова Л.В. Технологическое тестирование упорных золотосодержащих руд (на примере месторождения Кокпатас) // Вестник Читинского государственного университета. 2009. № 3. С. 42–47. EDN: KYAPVT.

References

1. Edahbi M., Ounoughi M., Bouzazhah H., Boujlel K. CIL gold loss characterization within oxidized leach tails: creating a synergistic approach between mineralogical characterization, diagnostic leach tests, and preg-robbing tests. *Minerals*. 2019;9(9):557. <https://doi.org/10.3390/min9090557>.
2. Saders J.A., Gravel J., Janke L., Hall L. In-depth study on carbon speciation focussed on graphite. In: *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings*. 13–14 November 2015, Victoria. Victoria: British Columbia Ministry of Energy and Mines; 2015, p. 187-191.
3. Bas A.D., Altinkaya P., Yazici E.Y., Deveci H. Preg-robbing potential of sulphide-bearing gold ores. In: *Proceedings of 13th International Mineral Processing Symposium-IMPS*. 10–12 October 2012, Bodrum. Bodrum; 2012, p. 613-618.
4. Borges G.F. Efeito preg-robbing em minerais auríferos por compostos carbonáceos: estado da arte. Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto; 2021, 48 p.
5. Mabwe N.R. Potential pre-treatment and processing routes for recovery of gold from complex (refractory) gold ores. A review. In: *Proceedings of the 2nd African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. 7–10 December 2020, Harare. Harare; 2020, p. 1708-1715.
6. Cetin M.C., Altun N.E., Atalay M.Ü., Büyüktanır K. Bottle roll testing for cyanidation of gold ores: problems related to standardized procedures on difficult-to-process ores. In: *Proceedings of the 3rd World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering*. 8–10 June 2017, Rome. Rome; 2017, p. 148. <https://doi.org/10.11159/mmme17.148>.
7. Dunne R., LeVier M., Acar S., Kappes R. Keynote address: Newmont's contribution to gold technology. In: *World Gold Conference*. 2009, Johannesburg. Johannesburg: Southern African Institute of Mining and Metallurgy; 2009, p. 221-230.
8. Byvaltsev A.V., Voiloshnikov G.I., Khmel'nitskaya O.D., Bogorodskiy E.V. Problems of processing carbonaceous sorption-active gold ores. *The theory and process engineering of metallurgical production*. 2024;51(4):18-23. (In Russ.). EDN: PTZFBQ.
9. Asamoah R.K., Amankwah R.K., Addai-Mensah J. Cyanidation of refractory gold ores: A Review. In: *3rd UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference*. Juli 2014, Tarkwa. Tarkwa; 2014, p. 204-212. <https://doi.org/10.13140/2.1.4772.6407>.
10. Mustapha A., Asamoah R.K., Ofori-Sarpong G., Amankwah R.K. Preg-robbing characteristics of gold ores in Ghana. In: *3rd UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference*. Juli 2014, Tarkwa. Tarkwa; 2014, p. 192-196.
11. Ahtiainen R., Lundström M., Liipo J. Preg-robbing verification and prevention in gold chloride-bromide leaching. *Minerals Engineering*. 2018;128:153-159. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.037>.
12. Byvaltsev A.V., Voiloshnikov G.I., Khmel'nitskaya O.D. A procedure for preparing carbonaceous cyanidation tailings for gold fire assay. *iPolytech Journal*. 2025;29(1):123-132. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-1-123-132>.
13. Helm M.M., Vaughan J.P., Staunton W.P. Evaluation of preg-robbing in Goldstrike carbonaceous ore using Raman spectroscopy. In: *Proceedings of the 50th Conference of Metallurgists*. 2–5 October 2011, Montreal. Montreal; 2011, p. 595-606.
14. Lodeishchikov V.V. *Technology of gold and silver extraction from refractory ores*. Irkutsk: Irgiredmet; 1999, 786 p. (In Russ.).
15. Zelenov V.I. *Methodology for studying gold- and silver-bearing ores*. Moscow: Nedra; 1989, 302 p. (In Russ.).
16. Stephen R.S., Anuar W.N.S., Ismail S., Jabit N.A. Characterisation and diagnostic leaching of gold-bearing mineral ore, east coast peninsular Malaysia. *Malaysian Journal of Microscopy*. 2021;17(2):139-153.
17. Guner M.K., Bulut G., Hassanzadeh A., Lode S., Aasly K. Automated mineralogy and diagnostic leaching studies on bulk sulfide flotation concentrate of a refractory gold ore. *Minerals*. 2023;13(10):1243. <https://doi.org/10.3390/min13101243>.
18. Henley K.J., Clarke N.C., Sauter P. Evaluation of a diagnostic leaching technique for gold in native gold and gold ± silver tellurides. *Minerals Engineering*. 2001;14(1):1-12. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00156-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00156-4).
19. Celep O., Alp I., Deveci H. Application of diagnostic leaching technique for refractory gold ores. *D.P.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 2008;16:81-90.
20. Bekpulatov Zh.M., Khudaiberdiev F.T. Studying material composition and development of processing technology for a gold-bearing ore sample from one of the Uzbekistan Republic deposits. *Innovatsionnaya nauka*. 2017;3(4):20-23. (In Russ.). EDN: YLZMAH.
21. Shumilova L.V. Refractory auriferous ore technological testing (by the example of Kokpatas deposit). *Chita State University Journal*. 2009;3:42-47. (In Russ.). EDN: KYAPVT.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бывальцев Александр Владимирович,

к.т.н.,
ведущий научный сотрудник
лаборатории гидрометаллургии
АО «Иргиредмет»,
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия
✉ torrot_2008@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4659-6490>

Хмельницкая Ольга Давыдовна,

к.т.н.,
ведущий научный сотрудник
лаборатории гидрометаллургии
АО «Иргиредмет»,
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия
hod@irgiredmet.ru

Войлошников Григорий Иванович,

д.т.н., профессор,
заместитель генерального директора по
научно-методической и инновационной деятельности
АО «Иргиредмет»,
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия
greg@irgiredmet.ru

Богородский Евгений Владимирович,

к.т.н.,
заведующий лабораторией гидрометаллургии
АО «Иргиредмет»,
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия
bogorodskiy@irgiredmet.ru

Гончарук Максим Андреевич,

инженер лаборатории гидрометаллургии
АО «Иргиредмет»,
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
maksimgoncharuk0708@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-4624-8980>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 28.05.2025 г.; одобрена после рецензирования 26.07.2025 г.; принята к публикации 01.09.2025 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander V. Byvaltsev,

Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher of the
Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, Russia
✉ torrot_2008@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4659-6490>

Olga D. Khmelnitskaya,

Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher of the
Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, Russia
hod@irgiredmet.ru

Grigoriy I. Volloshnikov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Deputy General Director for Science,
Methodology and Innovations,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, Russia
greg@irgiredmet.ru

Evgeniy V. Bogorodskiy,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, Russia
bogorodskiy@irgiredmet.ru

Maksim A. Goncharuk,

Engineer of the Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, Russia;
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
maksimgoncharuk0708@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0008-4624-8980>

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 28.05.2025; approved after reviewing 26.07.2025; accepted for publication 01.09.2025.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 66.012.25

EDN: GEUWWK

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-3-399-411



Разработка программного обеспечения для балансовых расчётов переработки ильменитовых концентратов

Т.Р. Косовцева¹, Е.В. Сизякова², В.А. Слободин³✉¹⁻³Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Резюме: Цель – разработка специализированного программного обеспечения для автоматизации расчетов балансов материальных потоков в технологической схеме переработки ильменитового концентрата с целью оптимизации производства титана, снижения потерь сырья и повышения эффективности управления процессами. Применен метод анализа материальных потоков для комплексного контроля движения материалов на всех стадиях переработки титансодержащего сырья: восстановительной плавки, хлорирования шлака в расплаве, выделения и очистки тетрахлорида титана, магнезиотермического восстановления металла и вакуумной сепарации. Разработан программный комплекс на языке Python, состоящий из четырех модулей, каждый из которых рассчитывает материальный баланс для конкретной технологической стадии. Взаимодействие с пользователем реализовано через MS Excel для удобства ввода данных и визуализации результатов. Программный комплекс обеспечил расчет полных материальных балансов с отклонением менее 0,2%. Анализ выявил потери титана технологического характера на уровне 21,4% от исходного количества металла в концентрате. Показано, что наибольшие потери Ti приходятся на стадиях восстановительной плавки (6,63%, в основном в пыль и чугун) и очистки тетрахлорида титана (IV) (12,92%, в побочные продукты). Меньшие потери зафиксированы при хлорировании шлака (0,33%), восстановлении тетрахлорида титана (IV) (2,50%) и сепарации реакционной массы (0,51%). Разработанные программы опубликованы в официальном бюллетене Роспатента «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топология интегральных микросхем». Разработанный комплекс программ позволяет автоматизировать расчет материальных балансов в производстве титана из ильменитового концентрата. Ключевые направления совершенствования технологической цепочки – модернизация стадий восстановительной плавки и очистки тетрахлорида титана, где наблюдаются максимальные потери целевого металла.

Ключевые слова: титан, разработка программного обеспечения, анализ материальных потоков, ильменитовые концентраты, титановый шлак, стратегические ресурсы, хлорирование, системы планирования ресурсов (ERP).

Для цитирования: Косовцева Т.Р., Сизякова Е.В., Слободин В.А. Разработка программного обеспечения для балансовых расчётов переработки ильменитовых концентратов // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 399–411. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-399-411>. EDN: GEUWWK.

METALLURGY

Original article

Software development for balance calculations of ilmenite concentrate processing

Tatiana R. Kosovtseva¹, Ekaterina V. Sizyakova², Viktor A. Slobodin³✉¹⁻³Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The aim is to develop dedicated software for automating the calculation of material flow balances in the process flow diagram of ilmenite concentrate processing in order to optimize titanium production, reduce raw material losses, and enhance the efficiency of process management. Material flow analysis is used to comprehensively monitor materials flow at all stages of titanium-containing raw material processing. The stages include reduction smelting, slag chlorination in the melt, titanium tetrachloride extraction and purification, magnesiothermic metal reduction, and vacuum separation. The software package developed in Python consists of four modules. Each module calculates the material balance for a specific technological process stage. Interaction with the user is implemented through MS Excel for the convenience of data entry and visualization of results. The software package ensured the calculation of complete material balances with a deviation of less than 0.2%. The analysis revealed technology-related titanium losses at the level of 21.4% compared to the initial amount of metal in the concentrate. It was shown that the most substantial Ti

losses occurred at the stages of reduction smelting (6.63%, mainly into dust and cast iron) and titanium tetrachloride (IV) purification (12.92%, into by-products). Smaller losses were recorded during slag chlorination (0.33%), titanium tetrachloride (IV) reduction (2.50%), and reaction mass separation (0.51%). The designed programs were published in the official Rospatent Bulletin *Computer Programs. Databases. Topology of Integrated Circuits*. The developed software package enables the automation of material balance calculations in titanium production from ilmenite concentrate. The key areas for improving the technological process include modernizing the reduction smelting and titanium tetrachloride purification stages where maximum losses of the target metal are observed.

Keywords: titan, software development, material flow analysis, ilmenite concentrates, titanium slag, strategic resources, chlorination, Enterprise Resource Planning (ERP) systems

For citation: Kosovtseva T.R., Sizyakova E.V., Slobodin V.A. Software development for balance calculations of ilmenite concentrate processing. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):399-411. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-399-411>. EDN: GEUWWK.

ВВЕДЕНИЕ

Титан является стратегическим и геополитическим ресурсом [1, 2], а также одним из наиболее важных металлов в современном мире, находя широкое применение в различных отраслях промышленности. Его уникальные свойства, такие как высокая удельная прочность, низкая плотность, устойчивость к коррозии и способность выдерживать экстремальные температуры, делают его незаменимым материалом в аэрокосмической, судостроительной, автомобильной, медицинской и химической промышленности [3, 4].

Прогноз показывает, что растущий спрос на титан и повышенное внимание к экологически чистым продуктам будут стимулировать рост рынка в ближайшие годы. Россия, обладая значительными ресурсами и мощной производственной базой, находится в

выгодном положении для удовлетворения этого спроса. Инвестиции в модернизацию производств, внедрение новых технологий переработки ильменитового концентрата и совершенствование управления материальными потоками в технологических цепочках способствуют повышению эффективности производства и укреплению позиции России на мировом рынке титана.

Сырьевая база титана России имеет достаточные масштабы для обеспечения внутренних потребностей страны в титановом сырье (рис. 2). Однако качество и состав песков россыпей и руд коренных месторождений создают дополнительные сложности их переработки, что, в свою очередь, требует использования новых передовых технологий и реализации всех получаемых продуктов⁴ [5].

Котировки титана, \$/, кг



Рис. 1. График изменения цен на титан на мировом рынке

Fig. 1. Titanium price chart on the world market

⁴О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов России в 2020 году. Государственный доклад. М.: Мин-во природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Режим доступа: <https://www.rosnedra.gov.ru/article/13930.html> (дата обращения: 25.04.2025).



Рис. 2. Распределение запасов титана и его месторождений [4]
 Fig. 2. Distribution of titanium reserves and its deposits [4]

Основным сырьем для производства титана служит ильменитовый концентрат (табл. 1) [6–10]. Процесс переработки ильменита в металлический титан является сложным и многостадийным, включающим этапы плавки концентрата, хлорирования, восстановления тетрахлорида титана (IV) и получения губчатого титана [11–13]. Каждая из этих стадий требует точного контроля и управления материальными потоками для обеспечения эффективности и устойчивости производственного процесса, как и в случаях применения такого подхода в других отраслях металлургии [14, 15].

Эффективное управление материальными потоками в технологической цепочке переработки ильменитового концентрата играет решающую роль в снижении производственных затрат, повышении качества продукции и сокращении времени цикла

производства. Это включает в себя оптимизацию запасов сырья и готовой продукции, сокращение времени простоя оборудования, улучшение планирования производства и логистики [16].

В последние годы наблюдается увеличение внимания к внедрению современных информационных и управленческих технологий в металлургической промышленности. Такие концепции, как цифровизация производства, применение систем управления ресурсами предприятия (от англ. Enterprise Resource Planning – ERP) и внедрение методов бережливого производства становятся все более актуальными [17–20]. Они позволяют предприятиям оптимизировать различные этапы производственного процесса, улучшить обмен информацией между различными подразделениями и этапами производства и принять более обоснованные

Таблица 1. Химический состав ильменитового концентрата, %
 Table 1. Chemical composition of ilmenite concentrate, wt%

Соединение	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	V ₂ O ₅
Содержание	50,6	36,2	7,9	1,9	1,6	0,7	0,7	0,2	0,2

решения для повышения эффективности на основе аналитических данных [21–24].

Однако внедрение этих технологий в сфере переработки ильменитового концентрата сталкивается с рядом трудностей, включающих необходимость значительных инвестиций в инфраструктуру, обучение персонала, адаптацию существующих процессов и обеспечение на предприятии совместимости различных систем (система диспетчерского контроля и сбора данных, от англ. Supervisory Control and Data Acquisition SCADA, ERP, система управления производственными процессами, от англ. Manufacturing Execution System MES и т.д.) [25–27]. Кроме того, специфические особенности технологических процессов переработки ильменита требуют разработки специализированных решений, учитывающих химико-металлургические аспекты производства [28–31].

МЕТОДЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ

Из всех методов учета и анализа материальных потоков метод Material Flow Analysis (MFA) выделяется своей способностью к комплексному и детализированному анализу материальных потоков в сложных технологических цепочках. MFA активно используется в таких сферах, как управление ресурсами, экологический менеджмент и региональное управление материалами, а в металлургии он зарекомендовал себя как эффективный инструмент для анализа и оптимизации технологического процесса на различных уровнях – от локальных производств до масштабов отрасли [32, 33].

При переработке ильменитового концентрата для производства титана метод MFA обеспечивает комплексный контроль и управление материальными потоками на каждом этапе технологической схемы. Процесс включает несколько последовательных операций, таких как восстановительная плавка, хлорирование титанового шлака в расплаве, очистка тетрахлорида титана (IV), магниетермическое восстановление и вакуумная сепарация [9, 10, 34, 35]. На каждом этапе происходит перераспределение материалов, и MFA позволяет точно рассчитывать их балансы, выявлять узкие места и материальные потери, а также определять направления для совершенствования процесса переработки ильменитового концентрата.

Применение MFA решает несколько ключевых задач:

- точный расчет материальных балансов на каждом этапе, обеспечивая информацию о движении элементов (титан, железо, магний и ванадий);

- идентификацию «узких мест», где наблюдаются наибольшие потери материала, например, на стадии очистки тетрахлорида титана (IV), что позволяет нацеленно совершенствовать условия процесса для минимизации потерь и повышения извлечения титана.

В дополнение к MFA применяются методы математического моделирования, которые позволяют учитывать вариации состава ильменитового концентрата и реагентов (пековый кокс, магний, отработанный электролит и другие), а также изменяющиеся условия (массы загрузки, марку производимого губчатого титана) технологического процесса.

Визуализация данных с использованием диаграмм, графиков и таблиц является важной частью MFA, так как значительно облегчает интерпретацию результатов и помогает быстро выявлять узкие места. Такой подход делает процесс управления материальными потоками более прозрачным и предсказуемым, позволяя оперативно принимать операционные меры, снижающие техногенное рассеивание ценных компонентов, подкрепленные аналитическими данными.

Для реализации метода MFA в технологии переработки ильменитового концентрата требуется создание специализированного программного продукта, который бы интегрировал функции расчета материальных балансов, моделирования и визуализации. Такой программный продукт может состоять из нескольких модулей, каждый из которых решает конкретные задачи: моделирование материальных потоков, расчет параметров в зависимости от технологических условий, создание диаграмм и таблиц для наглядного представления данных. Разработка такого продукта позволит автоматизировать расчеты, ускорить обработку данных и повысить точность анализа, что, в свою очередь, снизит затраты на анализ потерь в производственном процессе и упростит принятие решений для оптимизации стадий технологической схемы переработки.

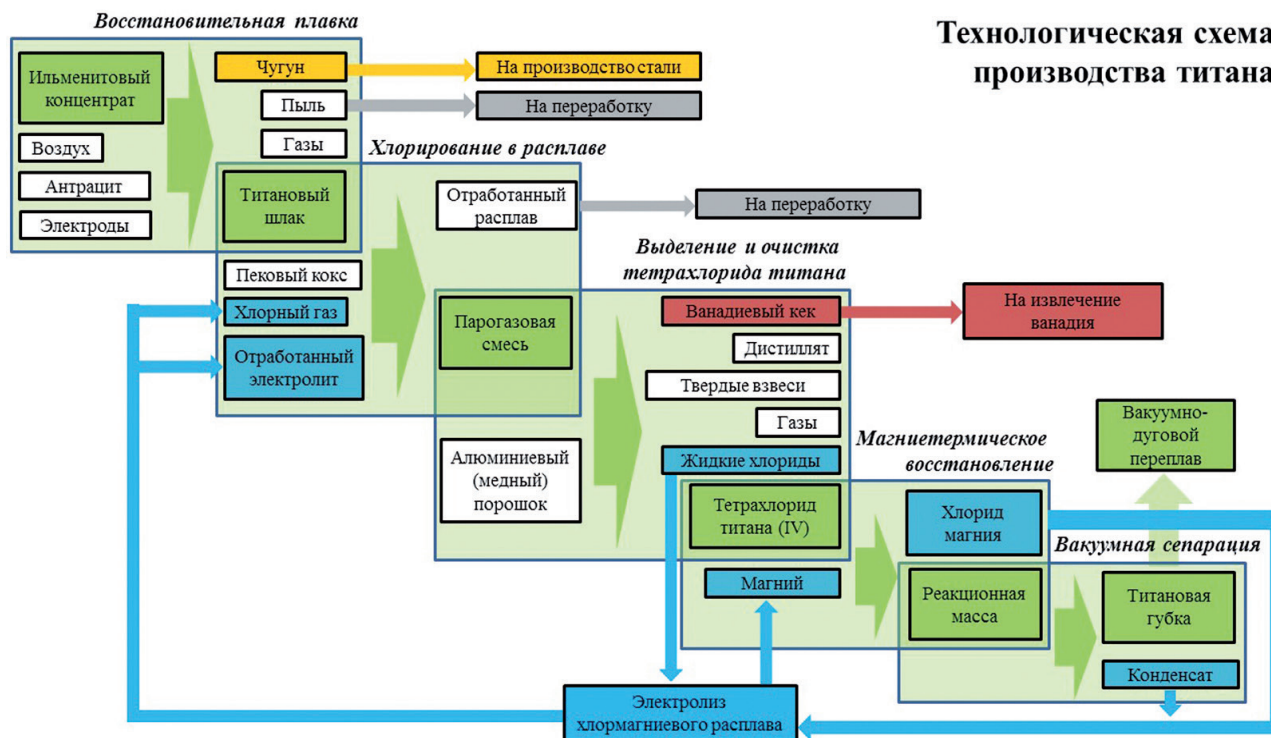


Рис. 3. Диаграмма материальных потоков переработки ильменитового концентрата
Fig. 3. Diagram of material flows of ilmenite concentrate processing

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа материальных потоков для технологической схемы переработки ильменитового концентрата демонстрируют распределение материалов на каждом этапе (рис. 3).

Для анализа материальных потоков в цепочке переработки ильменитового концентрата было сделано допущение, что стадия выделения из парогазовой смеси тетрахлорида титана (IV) и его очистки – один процесс, хотя она включает в себя несколько операций: удаление твердых примесей, конденсацию, осаждение ванадия, ректификацию, дистилляцию.

Для автоматизации процесса учета и анализа материальных потоков технологической схемы переработки ильменитового концентрата разработан программный

комплекс на основе метода анализа материальных потоков, охватывающий пять ключевых технологических стадий процесса переработки титаносодержащего сырья. В состав комплекса входят следующие модули: «Программа расчета материального баланса процесса выплавки титанового шлака» (Программа 1), «Программа расчета материального баланса процесса хлорирования титанового шлака в расплаве» (Программа 2), «Программа расчета материального баланса процесса выделения и очистки тетрахлорида титана из парогазовой смеси» (Программа 3), «Программа расчета материального баланса процесса магнитермического восстановления титана» и «Программа расчета материального баланса процесса вакуумной сепарации реакционной массы» (Программа 4)⁵⁻⁸.

⁵Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681162, Российская Федерация. Программа для расчета материального баланса процесса выплавки титановых шлаков / В.А. Слободин, В.Ю. Бажин, Т.Р. Косовцева; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». Заявка № 2023669625, заявл. 26.09.2023; опубл. 11.10.2023.

⁶Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683363, Российская Федерация. Программа для расчета материального баланса процесса хлорирования титанового шлака в расплаве / В.А. Слободин, В.Ю. Бажин, Е.В. Сизякова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет». Заявка № 2023681929, заявл. 24.10.2023; опубл. 07.11.2023.

Каждый модуль комплекса реализует точные расчеты материальных балансов, учитывая движение химических элементов на каждом этапе переработки. Это позволяет моделировать разные варианты переработки, прогнозировать распределение различных целевых и побочных компонентов, а также анализировать эффективность каждого передела. Ввод констант используется для уточнения молярных масс, данных технологической практики и других параметров, используемых в расчетах.

Комплекс программ реализован в среде Python, что обеспечивает гибкость и масштабируемость, необходимую для сложных расчетов и интеграции данных. Для удобства ввода и вывода данных используется табличный процессор MS Excel, который обеспечивает простоту в обработке и визуализации результатов. На рис. 4 представлен укрупненный алгоритм решения, демонстрирующий последовательность расчетов и логику взаимодействия программных модулей для комплексного анализа процесса переработки титаносодержащего сырья⁵⁻⁸.

Данный комплекс программ является инструментом для научного моделирования и оптимизации процесса, позволяя исследовать влияние различных технологических параметров на материальные потоки и определять направления для повышения эффективности и устойчивости производства.

Для проведения тестовых расчетов использованы данные по составу реагентов и продуктов технологии получения титановой губки из литературных источников [9, 10]. Выходными данными являются таблицы полных материальных балансов процессов переработки ильменитового концентрата; таблицы и диаграммы (рис. 5), характеризующие составы продуктов для каждого из переделов технологической схемы. В частности, для этапа восстановительной плавки помимо состава

концентрата и его массы при расчете учитывается расход электродов, состав восстановителя и его золы, соотношение Ti_2O_3/TiO_2 в шлаке.

В результате выполненных расчетов отклонение в балансах составило менее 0,2%. Программа 4 выводит таблицу (табл. 2) и круговую диаграмму структуры потерь по технологической цепи.

В ходе анализа полученных данных было установлено, что из общей массы титана из ильменитового концентрата, поступающего на плавку, в общем теряется порядка 6,6%, из них 2,5% – в пыль, 1,8% переходят в чугуны. В процессе хлорирования титанового шлака в расплаве в парогазовую смесь переходят 99,7% целевого металла, но на стадии выделения и очистки тетрахлорида титана (IV) около 12,9% переходят в побочные продукты (твердые взвеси, дистиллят, ванадиевый кек). Объяснением полученных таких данных является то, что стадия содержит несколько операций для доведения чистоты $TiCl_4$ до 99,99%, что обуславливает переход некоторой части соединений титана ($TiCl_4$, $TiCl_3$, $TiOCl_2$) в обратные или выводимые из технологии продукты, например, ванадиевый кек, твердые взвеси и другие. На переделах магнийтермического восстановления и вакуумной сепарации теряется порядка 2,5 и 0,5% титана соответственно. Итого по всей технологии потери титана составляют около 21,4%.

Анализ результатов моделирования выявил ключевые проблемы технологии, такие как высокая ресурсоемкость, низкая эффективность использования материальных ресурсов и недостаточная оптимизация определенных стадий. Для улучшения эффективности технологической схемы переработки ильменитового концентрата требуются совершенствование технологий учета материальных ресурсов и разработка мер по повышению устойчивости и оптимиза-

⁷Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619022, Российская Федерация. Программа для расчета материального баланса процесса выделения и очистки тетрахлорида титана из парогазовой смеси / В.А. Слободин, В.Ю. Бажин, С.Б. Фокина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». Заявка № 2024617885, заявл. 15.04.2024; опубл. 18.04.2024.

⁸Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618462, Российская Федерация. Программа для расчета материальных балансов процессов магнийтермического восстановления тетрахлорида титана и вакуумной сепарации реакционной массы / В.А. Слободин, В.Ю. Бажин, А.С. Ануфриев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». Заявка № 2024617420, заявл. 10.04.2024; опубл. 12.04.2024.

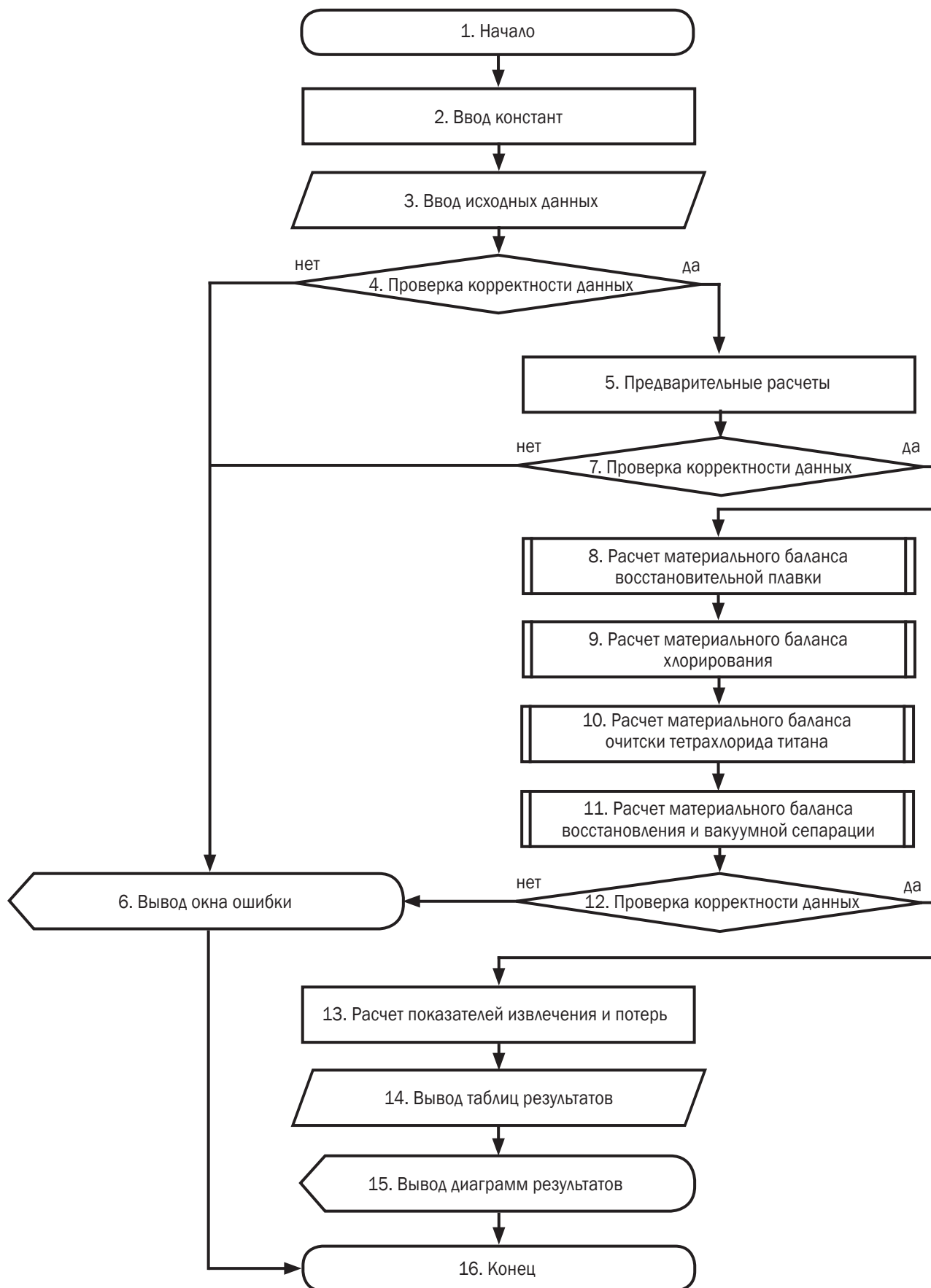


Рис. 4. Блок-схема алгоритма
Fig. 4. Algorithm flow chart

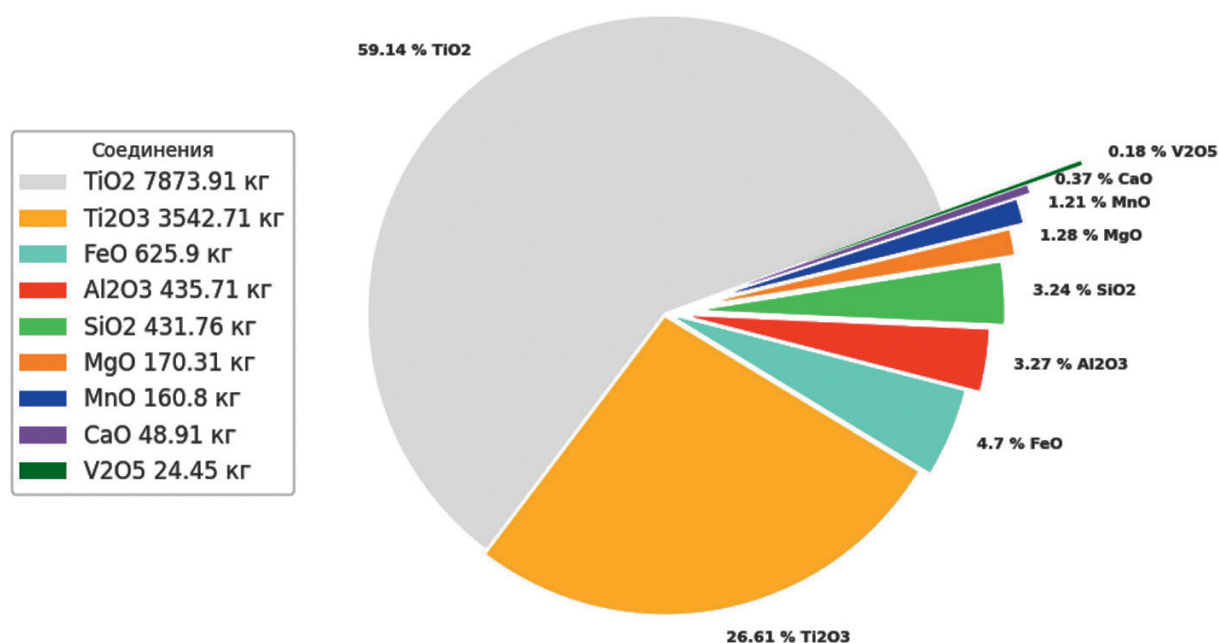


Рис. 5. Диаграмма состава титанового шлака при составе концентрата по табл. 1 и массе загрузки руднотермической печи по концентрату в 25 т⁵

Fig. 5. Diagram of titanium slag composition with concentrate composition according to Table 1 and ore-thermal furnace charge weight for concentrate of 25 tons⁵

Таблица 2. Таблица показателей извлечения и потерь титана по переделам⁸

Table 2. Table of titanium extraction and loss indicators by processing stages⁸

Технологическая операция	Извлечение		Потери		
	%	кг	%	кг	отн. %
Восстановительная плавка	93,37	7080,57	6,63	503,10	31,01
Хлорирование в расплаве	99,67	7056,97	0,33	23,60	1,456
Очистка тетрахлорида титана (IV)	87,08	6145,42	12,92	911,54	56,18
Магниетермическое восстановление	97,50	5991,79	2,50	153,64	9,49
Вакуумная сепарация	99,49	5961,06	0,51	30,73	1,89
Итого по всей технологии	78,60	5961,06	21,40	1622,61	100

ции хода производственного процесса. Наибольшее внимание стоит обратить на стадии восстановительной плавки, выделения и очистки $TiCl_4$ из парогазовой смеси. Результаты данного анализа потерь могут служить основой для дальнейшего планирования и совершенствования технологических процессов переработки ильменитового концентрата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный учет материальных потоков технологической схемы переработки ильменитового концентрата имеет важное значение для улучшения устойчивости и надежности поставок титана в России. Данное исследование, основанное на использовании метода MFA, формирует научно обоснованную модель движения материала, вклю-

чая оценку запасов и перемещения на различных этапах.

Улучшение процессов контроля и учета материальных ресурсов на ключевых стадиях переработки ильменитового концентрата – от восстановительной плавки до рафинирования – способствует повышению извлечения титана и минимизации потерь титана в виде нецелевых продуктов, а также снижению расхода реагентов и энергозатрат на каждом этапе технологической схемы. Сокращение образования отходов производства и рациональное использование сырья играют важную роль в достижении экологической устойчивости и экономической целесообразности производства титана, что особенно важно для долгосрочной стратегии развития титановой отрасли.

Программный комплекс, реализованный на основе метода МФА, продемонстрировал высокую эффективность в выявлении недостатков и предоставлении инстру-

ментов для точного расчета материальных балансов различных стадий технологической схемы переработки титаносодержащего сырья.

Список источников

1. Головина Е.И., Гребнева А.В. Управление ресурсами подземных вод на трансграничных территориях (на примере Российской Федерации и Эстонской Республики) // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 788–800. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.2>. EDN: SMZDQY.
2. Golovina E.I., Khloponina V.S., Tsiglianu P.P., Zhu Runchu. Organizational, economic and regulatory aspects of groundwater resources extraction by individuals (case of the Russian Federation) // Resources. 2023. Vol. 12. Iss. 8. P. 89. <https://doi.org/10.3390/resources12080089>. EDN: IWIOFX.
3. Ковальская К.В., Горланов Е.С. Лигатуры Al - Ti - В: формирование структуры в модифицированных сплавах // Цветные металлы. 2022. № 7. С. 57–64. <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.06>. EDN: CQDUOG.
4. Пашкевич М.А., Евдокимова М.Е. Тонкодисперсные отходы титанового производства как добавка для изготовления строительных материалов // Экология и промышленность России. 2025. Т. 29. № 2. С. 19–23. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-2-19-23>. EDN: KMWLNS.
5. Садыхов Г.Б. Фундаментальные проблемы и перспективы использования титанового сырья в России // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2020. Т. 63. № 3-4. С. 178–194. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-178-194>. EDN: JNYSEU.
6. Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И., Красоткина А.О. Уникальные титановые месторождения Тимана: вопросы генезиса и возраста // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 275–289. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.32>. EDN: ZVBWXU.
7. Карасев М.А., Поспехов Г.Б., Астапенко Т.С., Шишкина В.С. Модели прогнозирования напряженно-деформированного поведения слабых техногенных грунтов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 11. С. 49–69. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_49. EDN: EOTJVE.
8. Pardo F.R.O., Herrera J.A.P., Perez M.C. R., Cabascango V.E.Q., Urbano A.P.M. Scientific fundamentals for the use of serpentized rocks from the eastern region of Cuba // Journal of Physics: Conference Series. 2023. Vol. 2573. Iss. 1. P. 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2573/1/012033>. EDN: FWIMBS.
9. Гармата В.А., Петрунько А.Н., Галицкий Н.В., Олесов Н.В., Сандлер Р.А. Титан: свойства, сырье, физико-химические основы и методы получения. М.: Металлургия, 1983. 558 с.
10. Надольский А.П. Расчеты процессов и оборудования для производства тугоплавких металлов. М.: Металлургия, 1980. 127 с.
11. Кузин Е.Н., Мокрушин Л.Г., Кручинина Н.Е. Оценка возможности использования лейкоксен-кварцевого концентрата в качестве сырья для производства титанатов алюминия и магния // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 886–894. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.15>. EDN: PTGWCU.
12. Cisternas L.A., Ordóñez J.I., Jeldres R.I., Serna-Guerrero R. Toward the Implementation of circular economy strategies: an overview of the current situation in mineral processing // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2021. Vol. 43. Iss. 6. P. 775–797. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1946690>. EDN: LWCBLW.
13. Farjana S.H., Huda N., Mahmud M.P., Lang C. Towards sustainable TiO₂ production: an investigation of environmental impacts of ilmenite and rutile processing routes in Australia // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 196. P. 1016–1025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.156>.
14. Fedorova E.R., Pupysheva E.A., Morgunov V.V. Modeling of particle size distribution in the presence of flocculant // Symmetry. 2024. Vol. 16. Iss. 1. P. 114. <https://doi.org/10.3390/sym16010114>. EDN: XDACLL.
15. Fedorova E.R., Morgunov V.V., Pupysheva E.A. Effect of variation of internal diameter along the length of a rotary kiln on material movement // Non-ferrous Metals. 2024. Iss. 1. P. 28–34. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.01.05>. EDN: AECPPQ.
16. Глазатов А.Н., Молодцев М.С., Казаков А.М., Бразюлис Л.А. Совершенствование методики и системы контроля балансовых продуктов на обогатительной фабрике АО «Кольская ГМК» // Цветные металлы. 2020. № 12. С. 88–93. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.12.13>. EDN: YGCHEU.
17. Бушуев А.Б., Бойков В.И., Быстров С.В., Григорьев В.В., Мансурова О.К. Синтез оптимальных информационно-энергетических схем измерительных и преобразующих устройств // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 10. С. 518–526. <https://doi.org/10.17587/mau.22.518-526>. EDN: XNQXQB.
18. Немчинова Н.В., Патрушов А.Е., Тютрин А.А. Изучение процесса переработки пылей электросталеплавильного производства методом физико-химического моделирования // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 12. С. 13–19. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-12-13-19>. EDN: CFWWQL.
19. Ануфриев А.С., Лебедик Е.А., Смирнов А.А. Автоматизированная система управления шаровой загрузкой помольных агрегатов // Обогащение руд. 2024. № 1. С. 3–9. <https://doi.org/10.17580/or.2024.01.01>. EDN: PQBKRZ.

20. Кульчицкий А.А., Мансурова О.К., Николаев М.Ю. Распознавание дефектов грузоподъемных канатов металлургического оборудования оптическим методом с использованием нейронных сетей // Черные металлы. 2023. № 3. С. 81–88. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.03.13>. EDN: SUXTGW.
21. Skamyin A., Shklyarskiy Y., Lobko K., Dobush V., Sutikno T., Jopri M.H. Impedance analysis of squirrel-cage induction motor at high harmonics condition // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2024. Vol. 33 Iss. 1. P. 31–41. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i1.pp31-41>.
22. Бажин В.Ю., Устинова Ю.В., Федоров С.Н., Шалаби М.Э.Х. Повышение энергоэффективности рудно-термических печей при выплавке алюмосиликатного сырья // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 384–391. EDN: RTQXSE.
23. Bazhin V., Masko O. Monitoring of the behaviour and state of nanoscale particles in a gas cleaning system of an ore-thermal furnace // Symmetry. 2022. Vol. 14. Iss. 5. P. 923. <https://doi.org/10.3390/sym14050923>. EDN: FMOKAC.
24. Токарев И.С. Формирование отраслевой методики расчета параметров системы накопления электроэнергии для объектов газовой промышленности // Записки Горного института. 2025. Т. 272. С. 171–180. EDN: UIZSOQ.
25. Quiroz V.E., Calvopiña D. Training of highly qualified specialists in the field of software development: problems and solutions in higher educational institutions of Ecuador // Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems: ITM Web of Conferences. 2024. Vol. 59. P. 04008. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20245904008>.
26. Ефимов Д.А., Господариков А.П. Технично-технологические аспекты использования валков с профилем в форме треугольника Рёло в дробящих агрегатах на рудоподготовительном переделе // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10-2. С. 117–126. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_102_0_117. EDN: JEBNYR.
27. Гендлер С.Г., Василенко Т.А., Степанцова А.Ю. Экспериментальные исследования параметров массопереноса в каменных углях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 135–148. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_135. EDN: KLQAFM.
28. Martynov S.A., Liu Z., Luzin A.G. Equipment upgrade and repair // Metallurgist. 2024. Vol. 68. Iss. 7. P. 1073–1079. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01817-z>. EDN: IQXGQX.
29. Martynov S.A., Liu Z. Controlled placement of electrodes in an ore-smelting furnace and its effect on the reaction zone // Metallurgist. 2024. Vol. 67. Iss. 11-12. P. 1866–1877. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01684-8>. EDN: XSBYIU.
30. Оксенгойт Е.А., Куницкий Н.А., Петров П.А., Шестаков А.К. Современные приборы АО «СоюзЦМА» для контроля аэрозолей и фиксации разливов агрессивных сред // Цветные металлы. 2023. № 4. С. 61–65. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.08>. EDN: UJLKQC.
31. Черемисина О.В., Васильев Р.Е., Нетрусов А.О., Тер-Оганесянц А.К. Влияние процессов горячего кондиционирования и кипячения с известью продукта автоклавной переработки высокомышьяковистого медного сырья на показатели извлечения драгоценных металлов при последующем цианировании // Цветные металлы. 2024. № 2. С. 19–26. <https://doi.org/10.17580/tsm.2024.02.02>. EDN: IMNEDS.
32. Hu Xinyi, Luo Fanjie, Lin Jing, Wang Minxi, Li Xin. Dynamic material flow analysis of titanium sponge in China: 2000–2019 // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 371. P. 133704. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133704>. EDN: GTFHLL.
33. Li Xin, Lin Jing, Zhang Di, Xiong Zehui, He Xiaoqiong, Yuan Miao, et al. Material flow analysis of titanium dioxide and sustainable policy suggestion in China // Resources Policy. 2020. Iss. 67. P. 101685. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101685>. EDN: LREGSU.
34. Садыхов Г.Б., Гончаров К.В., Олюнина Т.В., Гончаренко Т.В. Особенности фазового состава ванадийсодержащих титановых шлаков от восстановительной плавки титаномagnetитового концентрата Куранахского месторождения // Металлы. 2010. № 4. С. 3–10. EDN: NAVQUT.
35. Садыхов Г.Б., Гончаров К.В., Гончаренко Т.В., Олюнина Т.В. Особенности фазовых превращений при окислении кальцийсодержащих титанованадиевых шлаков и их влияние на образование ванадатов кальция // Металлы. 2013. № 2. С. 3–11. EDN: PXPXPD.

References

1. Golovina E.I., Grebneva A.V. Management of groundwater resources in transboundary territories (on the example of the Russian Federation and the Republic of Estonia). *Journal of Mining Institute*. 2021;252:788-800. (In Russ). <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.2>. EDN: SMZDQY.
2. Golovina E.I., Khloponina V.S., Tsiglianu P.P., Zhu Runchu. Organizational, economic and regulatory aspects of groundwater resources extraction by individuals (case of the Russian Federation). *Resources*. 2023;12(8):89. <https://doi.org/10.3390/resources12080089>. EDN: IWIOFX.
3. Kovalskaya K.V., Gorlanov E.S. Al – Ti – B master alloys: structure formation in modified alloys. *Tsvetnye metally*. 2022;7:57-64. (In Russ). <https://doi.org/10.17580/tsm.2022.07.06>. EDN: CQDUOG.
4. Pashkevich M., Evdokimova M. Finely-dispersed wastes of titanium production as an additive for manufacturing of building materials. *Ecology and Industry of Russia*. 2025;29(2):19-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-2-19-23>. EDN: KMWLNS.

5. Sadykhov G.B. Fundamental problems and prospects for the use of titanium raw materials in Russia. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(3-4):178-194. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-178-194>. EDN: JNYSEU.
6. Makeev A.B., Bryanchaninova N.I., Krasotkina A.O. Unique titanium deposits of Timan: genesis and age issues. *Journal of Mining Institute*. 2022;255:275-289. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.32>. EDN: ZVBWXU.
7. Karasev M.A., Posphehov G.B., Astapenko T.S., Shishkina V.S. Stress-strain behavior prediction models for weak manmade soil. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;11:49-69. (In Russ). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_49. EDN: EOTJVE.
8. Pardo F.R.O., Herrera J.A.P., Perez M.C. R., Cabascango V.E.Q., Urbano A.P.M. Scientific fundamentals for the use of serpentized rocks from the eastern region of Cuba. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023;2573(1):012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2573/1/012033>. EDN: FWIMBS.
9. Garmata V.A., Petrunko A.N., Galitsky N.V., Olesov N.V., Sandler R.A. *Titanium: properties, raw materials, physico-chemical bases and production methods*. Moscow: Metallurgiya; 1983, 558 p. (In Russ).
10. Nadolsky A.P. *Calculations of processes and equipment for refractory metal production*. Moscow: Metallurgiya; 1980, 127 p. (In Russ).
11. Kuzin E.N., Mokrushin L.G., Kruchinina N.E. Assessment of the possibility of using leucoxene-quartz concentrate as raw material for production of aluminium and magnesium titanates. *Journal of Mining Institute*. 2023;264:886-894. (In Russ). <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.15>. EDN: PTGWCU.
12. Cisternas L.A., Ordóñez J.I., Jeldres R.I., Serna-Guerrero R. Toward the implementation of circular economy strategies: an overview of the current situation in mineral processing. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021;43(6):775-797. <https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1946690>. EDN: LWCBLW.
13. Farjana S.H., Huda N., Mahmud M.P., Lang C. Towards sustainable TiO₂ production: an investigation of environmental impacts of ilmenite and rutile processing routes in Australia. *Journal of Cleaner Production*. 2018;196:1016-1025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.156>.
14. Fedorova E.R., Pupysheva E.A., Morgunov V.V. Modeling of particle size distribution in the presence of flocculant. *Symmetry*. 2024;16(1):114. <https://doi.org/10.3390/sym16010114>. EDN: XDACL.
15. Fedorova E.R., Morgunov V.V., Pupysheva E.A. Effect of variation of internal diameter along the length of a rotary kiln on material movement. *Non-ferrous Metals*. 2024;1:28-34. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.01.05>. EDN: AECQOC.
16. Glazatov A.N., Molodtsev M.S., Kazakov A.M., Brazyulis L.A. Optimized product quality control at Kola MMC's mineral processing plant. *Tsvetnye metally*. 2020;12:88-93. (In Russ). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.12.13>. EDN: YGCHU.
17. Bushuev A.B., Boikov V.I., Bystrov S.V., Grigoriev V.V., Mansurova O.K. Synthesis of optimal Information and energy schemes of measuring and converting devices. *Mechatronics, Automation, Control*. 2021;22(10):518-526. (In Russ). <https://doi.org/10.17587/mau.22.518-526>. EDN: XNQXQB.
18. Nemchinova N.V., Patrushov A.E., Tyutrin A.A. Study of the process of processing electric steel melting dusts by the method of physicochemical modeling. *Ecology and Industry of Russia*. 2024;28(12):13-19. (In Russ). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-12-13-19>. EDN: CFWWQL.
19. Anufriev A.S., Lebedik E.A., Smirnov A.A. Automated ball charge control system for grinding units. *Obogashchenie Rud*. 2024;1:3-9. (In Russ). <https://doi.org/10.17580/or.2024.01.01>. EDN: PQBKRZ.
20. Kulchitsky A.A., Mansurova O.K., Nikolaev M.Yu. Recognition of defects in hoisting ropes of metallurgical equipment by an optical method using neural networks. *Chernye Metally*. 2023;3:81-88. (In Russ). <https://doi.org/10.17580/chm.2023.03.13>. EDN: SUXTGW.
21. Skamyin A., Shklyarskiy Y., Lobko K., Dobush V., Sutikno T., Jopri M.H. Impedance analysis of squirrel-cage induction motor at high harmonics condition. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2024;33(1):31-41. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i1.pp31-41>.
22. Bazhin V.Yu., Ustinova Ya.V., Fedorov S.N., Shalabi M.E.Kh. Improvement of energy efficiency of ore-thermal furnaces in smelting of aluminosilic raw materials. *Journal of Mining Institute*. 2023;261:384-391. (In Russ). EDN: RTQXSE.
23. Bazhin V., Masko O. Monitoring of the behaviour and state of nanoscale particles in a gas cleaning system of an ore-thermal furnace. *Symmetry*. 2022;14(5):923. <https://doi.org/10.3390/sym14050923>. EDN: FMOKAC.
24. Tokarev I.S. Development of parameters for an industry-specific methodology for calculating the electric energy storage system for gas industry facilities. *Journal of Mining Institute*. 2025;272:171-180. (In Russ). EDN: UIZSOQ.
25. Quiroz V.E., Calvopiña D. Training of highly qualified specialists in the field of software development: problems and solutions in higher educational institutions of Ecuador. In: *Hybrid Methods of Modeling and Optimization in Complex Systems: ITM Web of Conferences*. 2024;59:04008. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20245904008>.
26. Efimov D.A., Gospodarikov A.P. Technical and technological aspects of the use of Reuleaux triangular profile rolls in crushing units in the ore processing plant. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;10-2:117-126. (In Russ). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_10_2_117. EDN: JEBNYR.
27. Gendler S.G., Vasilenko T.A., Stepantsova A.Yu. Investigation of mass transfer of hard coal during its transportation to the place of temporary storage. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;9-1:135-148. (In Russ). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_9_1_135. EDN: KLQAFM.

28. Martynov S.A., Liu Z., Luzin A.G. Equipment upgrade and repair. *Metallurgist*. 2024;68(7):1073-1079. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01817-z>. EDN: IQXGQX.
29. Martynov S.A., Liu Z. Controlled placement of electrodes in an ore-smelting furnace and its effect on the reaction zone. *Metallurgist*. 2024;67(11-12):1866-1877. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01684-8>. EDN: XSBYIU.
30. Oksengoyt E.A., Kunitskiy N.A., Petrov P.A., Shestakov A.K. Modern equipment by Soyuzsvetmetavtomatika for detecting aerosols and spills of harmful pollutants. *Tsvetnye metally*. 2023;4:61-65. (In Russ). <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.08>. EDN: UJLKQC.
31. Cheremisina O.V., Vasiliev R.E., Netrusov A.O., Ter-Oganesyants A.K. Hot curing and lime boiling of high-arsenic copper concentrate pressure oxidation product and their effect on precious metals recovery during subsequent cyanidation. *Tsvetnye metally*. 2024;2:19-26. (In Russ). <https://doi.org/10.17580/tsm.2024.02.02>. EDN: IMNEDS.
32. Hu Xinyi, Luo Fanjie, Lin Jing, Wang Minxi, Li Xin. Dynamic material flow analysis of titanium sponge in China: 2000–2019. *Journal of Cleaner Production*. 2022;371:133704. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133704>. EDN: GTFHLL.
33. Li Xin, Lin Jing, Zhang Di, Xiong Zehui, He Xiaoqiong, Yuan Miao, et al. Material flow analysis of titanium dioxide and sustainable policy suggestion in China. *Resources Policy*. 2020;67:101685. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101685>. EDN: LREGSU.
34. Sadykhov G.B., Goncharov K.V., Olyunina T.V., Goncharenko T.V. Phase composition features of the vanadium-containing titanium slags produced from the reduction smelting of the titanomagnetite concentrate from the Kuranakhsk deposit. *Metally*. 2010;4:3-10. (In Russ). EDN: NAVQUT.
35. Sadykhov G.B., Goncharov K.V., Goncharenko T.V., Olyunina T.V. Features of phase transformations during oxidation of calcium-containing titanium-vanadium slags and their influence on calcium vanadate formation. *Metally*. 2013;2:3-11. (In Russ). EDN: PXPXPD.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Косовцева Татьяна Реональдовна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры цифрового моделирования,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., д. 2, Россия
Kosovtceva_TR@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7165-072X>

Сизякова Екатерина Викторовна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры металлургии,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., д. 2, Россия
sizyakova_ev@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4665-091X>

Слободин Виктор Андреевич,

студент,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
199106, г. Санкт-Петербург,
21-я линия В.О., д. 2, Россия
✉ s242803@stud.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0001-9784-8168>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatiana R. Kosovtseva,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Digital Modeling,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining
University,
2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia
Kosovtceva_TR@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7165-072X>

Ekaterina V. Sizyakova,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Metallurgy Department,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining
University,
2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia
sizyakova_ev@pers.spmi.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4665-091X>

Viktor A. Slobodin,

Student,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining
University,
2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia
✉ s242803@stud.spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0001-9784-8168>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.07.2025 г.; одобрена после рецензирования 17.08.2025 г.; принята к публикации 30.08.2025 г.

Information about the article

The article was submitted 01.07.2025; approved after reviewing 17.08.2025; accepted for publication 30.08.2025.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.713.723.4

EDN: SQDXJN

DOI: 10.21285/1814-3520-2025-3-412-424



Влияние состава анодной массы самообжигающегося анода на показатели электролитического получения алюминия

Н.В. Немчинова^{1✉}, Е.А. Ткач², А.А. Тютрин³, С.С. Бельский⁴¹⁻⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Резюме. Цель – провести анализ влияния вида кокса (нефтяного, пекового) в составе анодной массы самообжигающегося анода на показатели электролиза. Для достижения цели был произведен сбор производственных данных с работающих электролизеров типа С-8Б(М) с анодами Содерберга в период с июня по октябрь 2024 г. Данные собирались со 172 электролизеров, установленных в серии № 1, и со 186 – в серии № 2. Показано, что выход угольной пены преобладает на электролизерах с анодами, в состав анодной массы которых входит нефтяной кокс, и составил на 1 электролизер 15,9 кг (против 8,4 кг на ваннах с анодами на основе массы из пекового кокса). Удельный расход электроэнергии за исследуемый период на серию ванн, работающих с анодной массой на основе нефтекокса, составил 15393 кВт·ч/т Al (против 15341 кВт·ч/т Al). Показано, что расход анодной массы на основе нефтяного кокса на 1 электролизер выше на 1,82 т, чем на ваннах, работающих на пековом коксе (при скорости сгорания анода 1,5 см/сут и 1,47 см/сут соответственно). В период исследований зафиксировано 285 технологических нарушений при перестановке анодных штырей (протечи пека, гажения) на анодах, в состав масс которых входил нефтекокс (при 121 нарушении на другом виде кокса). Таким образом, сравнительный анализ данных при обслуживании электролизеров с анодами Содерберга показал, что наименьшими выходом угольной пены, удельными расходами электроэнергии и анодной массы и скоростью сгорания анода характеризуются аноды, сформированные из массы на основе пекового кокса. Что свидетельствует о том, что для повышения эффективности алюминиевого производства необходимо использовать пековый кокс при производстве анодной массы самообжигающегося анода электролизера.

Ключевые слова: производство алюминия, самообжигающийся анод, анодная масса, нефтяной и пековый коксы

Для цитирования: Немчинова Н.В., Ткач Е.А., Тютрин А.А., Бельский С.С. Влияние состава анодной массы самообжигающегося анода на показатели электролитического получения алюминия // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 412–424. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-412-424>. EDN: SQDXJN.

METALLURGY

Original article

Effect of the anode paste composition of a self-baking anode on the performance of electrolytic aluminum production

Nina V. Nemchinova^{1✉}, Evgenii A. Tkach², Andrey A. Tyutrin³, Sergei S. Belskii⁴¹⁻⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The present study aims to analyze the effect of the coke type (petroleum, pitch) in the composition of an anode paste for a self-baking anode on electrolysis indicators. We collected production data from operating S-8B(M) electrolytic cells with Soderberg anodes in the period from June to October 2024, including 172 and 186 electrolytic cells installed in Series 1 in Series 2, respectively. The yield of coal foam is higher in electrolytic cells with petroleum coke anodes: 15.9 kg per 1 electrolytic cell versus 8.4 kg in cells with anodes based on pitch coke paste. During the studied period, the specific power consumption for a series of cells operating with petroleum coke paste was 15,393 kWh/t Al versus 15,341 kWh/t Al. The consumption of petroleum coke anode paste per 1 electrolytic cell is 1.82 t higher than that of cells operating on pitch coke at an anode combustion rate of 1.5 and 1.47 cm/day, respectively. The anode pin rearrangement performed during the research period revealed 285 technological violations, e.g., pitch leaks and gassing, for petroleum coke anodes as compared to 121 violations for another coke type. A comparative analysis of the data collected during the maintenance of electrolytic cells with Soderberg anodes proved pitch coke anodes to have the lowest carbon foam yield, specific power and anode paste consumption, and

anode combustion rate. Thus, using pitch coke in the anode paste for self-baking anodes of electrolytic cells can enhance the efficiency of aluminum production.

Keywords: aluminum production, self-baking anode, anode paste, petroleum and pitch cokes

For citation: Nemchinova N.V., Tkach E.A., Tyutrin A.A., Belskii S.S. Effect of the anode paste composition of a self-baking anode on the performance of electrolytic aluminum production. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):412-424. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-412-424>. EDN: SQDXJN.

ВВЕДЕНИЕ

Производство алюминия занимает ведущие позиции среди цветных металлов в мире по объемам производства, качеству выпускаемой продукции и номенклатуре изделий [1, 2]. Крупнейшими производителями алюминия являются Китай, Россия, Индия [3–7]. Российская алюминиевая промышленность идет по пути модернизации действующих производств, введения в эксплуатацию новых мощностей и решения экологических проблем [8–15].

Одним из крупнейших потребителей углерода в Российской Федерации является алюминиевая промышленность: в процессе электролитического получения алюминия используются углеродсодержащие аноды как неотъемлемый конструктивный элемент электролизеров [16–18]. Электролизные ванны бывают двух типов:

- с предварительно обожженными анодами (ОА);
- самообжигающимися анодами (СА) (анодами Содерберга) [19].

Идея самообжигающегося анода была заимствована из опыта эксплуатации руднотермических печей, применяемых для производства ферросплавов, и принадлежит норвежскому инженеру Карлу Вильгельму Содербергу. Электрод Содерберга был дополнительно усовершенствован для получения алюминия ~ в 1930 г. (рис. 1).

В настоящее время в компании «Русал» идет модернизация предприятий, оснащенных ваннами с СА (Красноярский, Братский, Иркутский алюминиевые заводы): перевод действующего производства на эксплуатацию ванн типа «ЭкоСодерберг»⁵, строительство новых корпусов, которые будут оснащаться уже ваннами с ОА. Аноды алюминиевых электролизеров играют важную роль в технологии электролитического производства алюминия. Качество анодов зависит от

целого ряда условий, начиная со свойств исходного электродного сырья, условий производства анодной массы (АМ) и заканчивая состоянием и качеством ведения технологии электролиза на самих электролизерах [20].

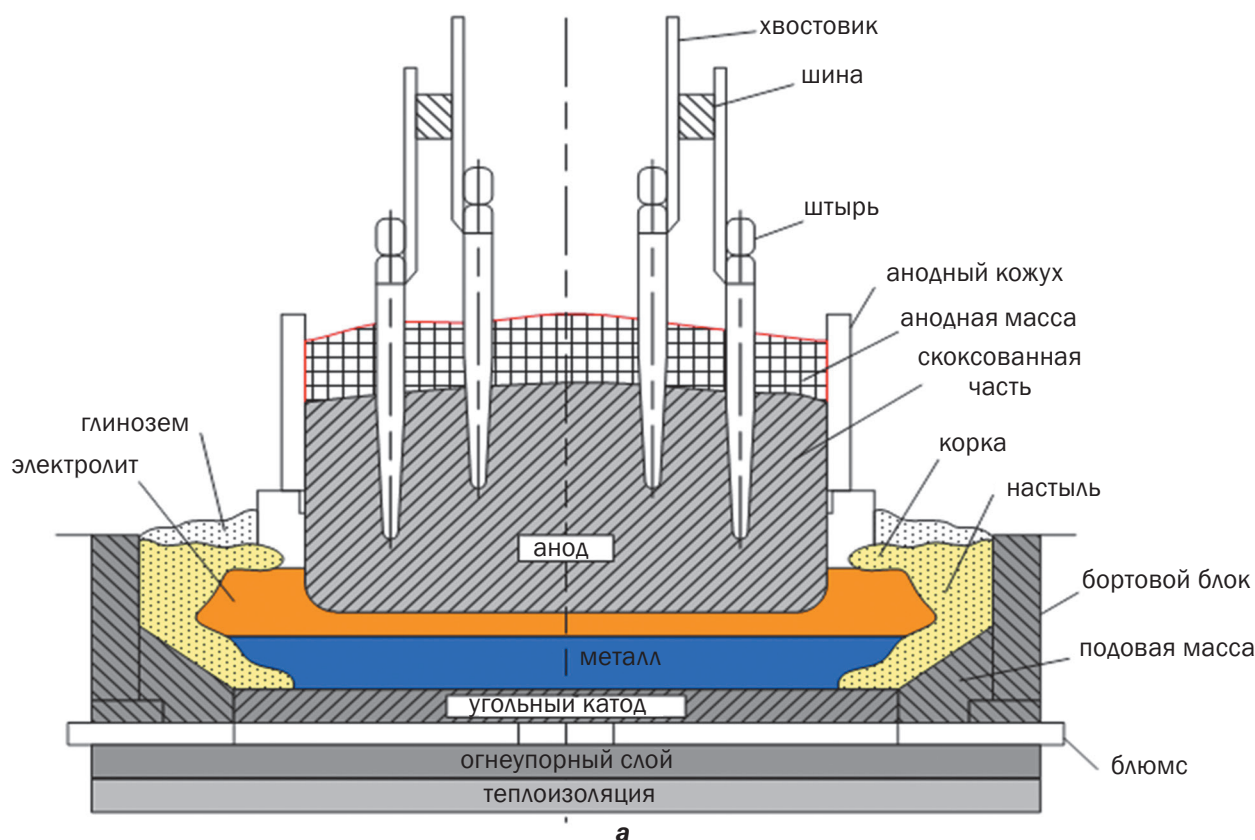
По мере сгорания анода масса, сформированная из кокса-наполнителя и связующего, продвигается вниз по стальному анодному кожуху, спекаясь при попадании в средний слой (горячую часть анода). В процессе электрохимического взаимодействия углерода анода с компонентами электролита (оксифторидными комплексами) анод расходуется ~ на 2 см в сутки, для непрерывности процесса фильерные брикеты из анодной массы равномерно подаются на верхнюю часть анодного устройства электролизера по всей его площади, пополняя количество израсходованной в процессе сгорания массы. Максимальная температура самообжига – от 950 до 980 °С⁶.

Правильный выбор исходных материалов (пека и кокса) для оптимального состава анода является наиболее сложной, но в то же время главной задачей для осуществления производства первичного алюминия [21]. Основные свойства коксов и пека в основной степени зависят от того, из каких продуктов нефтепереработки они получены. Многие структурно-химические особенности исходных продуктов сохраняют свои свойства по всей цепи превращений – от первичных смол, тяжелых остатков нефтепереработки до выпуска АМ и далее до формирования электропроводных анодов на электролизерах [22].

Загружаемая в анодное устройство АМ почти на три четверти состоит из наполнителя (кокса) и на одну четверть из связующего материала (каменноугольного пека). Коксование пека и цементирование им наполнителя составляет основу технологического процесса спекания анода при одновремен-

⁵ЭкоСодерберг. Режим доступа: <https://rusal.ru/innovation/technology/ekosoderberg/>. (дата обращения: 05.03.2025).

⁶Гринберг И.С. Технология самообжигающихся анодов электролизеров для производства алюминия: учеб. пособ. Иркутск: ИрГТУ, 1996. 107 с.



а



b

Рис. 1. Самообжигающийся анод алюминиевого электролизера с верхним токоподводом: а – электролизер с самообжигающимся анодом в разрезе; б – общий вид

Fig. 1. Self-baking anode of aluminum electrolytic cell with upper current supply: a – sectional view of the cell with a self-baking anode; b – general view

ном получении алюминия⁶. В этой связи характеристики кокса-наполнителя, качество пека и термические условия его коксования играют важную роль [20, 23].

В настоящее время технология электролиза на ваннах данного типа имеет ряд серьезных недостатков, из которых главными являются выбросы в атмосферу загрязняю-

щих веществ (диоксида углерода, смолистых и полиароматических веществ [24]), высокие удельные расходы электроэнергии (~ 16–18 тыс. кВт·ч/т) и анодной массы (~ 500 кг на 1 т алюминия). В связи с этим исследования, направленные на улучшение технологии электролиза за счет выбора оптимального состава анода, являются актуальными.

ПРОИЗВОДСТВО АНОДНОЙ МАССЫ

При производстве АМ (рис. 2) для алюминиевой промышленности, как указывалось выше, используется ограниченное количество углеродных материалов: твердые электродные коксы – нефтяной и пековый (в качестве наполнителей, основы будущего анода, см. рис. 2 а, б) и каменноугольный пек (в качестве связующего). Это связано с высокими требованиями к аноду алюминиевого производства как к участнику электрохимического процесса: низкие зольность и содержание серы, высокая механическая прочность, оптимальная плотность [25, 26]. На показатели основных характеристик анодной массы (удельное электросопротивление, механическая прочность, коэффициент текучести и др.) влияют качественные показатели исходного сырья (кокса и пека)⁵.

Основными производителями пекового кокса являются АО «АВД-Инвест», ООО «Геолого-технологическая компания», нефтяного – ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез», «Тюменский нефтеперерабатывающий завод», АО «Ангарская нефтехимическая компания». Каменноугольный пек поставляется на алюминиевые заводы АО «Алтай-кокс», АО «АВД-Инвест». Непрокаленный нефтяной кокс по своим характеристикам уступает пе-

ковому, поэтому предварительно подвергается прокаливанию во вращающихся печах барабанного типа. Процесс прокаливания производится для удаления летучих веществ и влаги, а также для уплотнения структуры кокса при воздействии высокой температуры. Основным качественным показателем прокаленного кокса является его истинная плотность, оптимальные пределы которой определяются требованиями технологического регламента.

Для получения необходимых свойств прокаленного кокса требуется соблюдать основные условия подготовки и производства:

- обеспечение равномерного поступления сырого материала в печь;
- обеспечение стабильной работы зоны прокаливания;
- постоянное поддержание заданной температуры в зоне прокаливания.

После прокалики нефтекокс охлаждается в холодильниках барабанного типа водой, подаваемой на корпус холодильника.

Каменноугольный пек – это продукт коксохимического производства, образующийся как остаток при дистилляции каменноугольной смолы при 360 °С. В настоящее время в промышленном производстве алюминия применяется только данный вид связующего, несмотря на значительное содержание в нем вредных веществ (полиароматических углеводородов, составляющих его основу и выделяющихся при коксовании в электролизерах с анодами Содерберга [24]).

Характеристики готовой анодной массы должны соответствовать требованиям и стандартам качества, представленным в табл. 1.

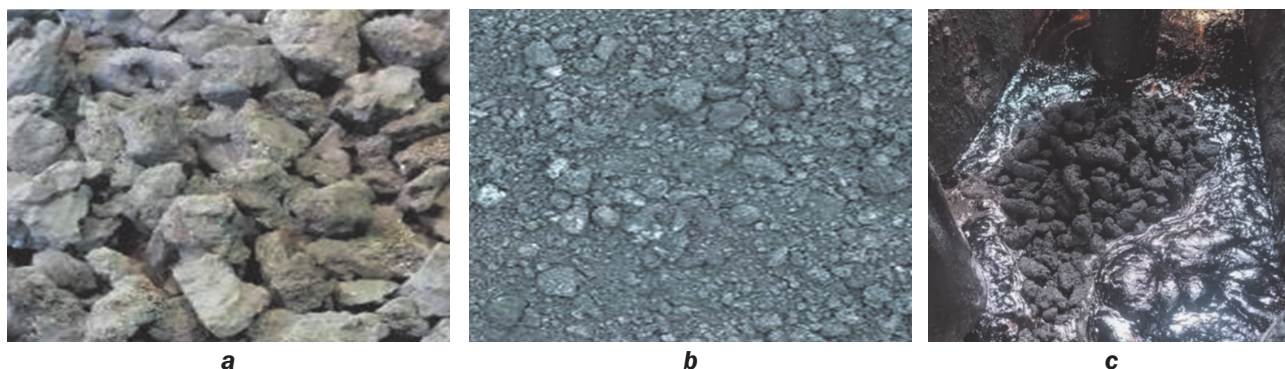


Рис. 2. Сырье для производства анодной массы: а – кокс нефтяной прокаленный; б – кокс пековый; с – готовая анодная масса

Fig. 2. Raw materials for anode paste production: а – calcined petroleum coke; б – pitch coke; с – finished anode paste

Таблица 1. Качественные характеристики анодной массы, применяемой при производстве первичного алюминия
Table 1. Qualitative characteristics of the anode paste used in the production of primary aluminum

Наименование показателя	Единица измерения	Норма для показателя	
		Анодная масса на основе:	
		пекового кокса	нефтяного кокса
Предел прочности на сжатие	МПа	не менее 30	
Удельное электрическое сопротивление	мКОм·м	не более 65	не более 70
Пористость	%	не более 28	не более 30
Общая разрушаемость в токе CO ₂	мг/см ² ·ч	не более 30	
Зольность	%	не более 0,5	
Сера	%	не более 0,5	не более 2,1
Содержание в золе:			
ванадий	%	не более 0,003	не более 0,03
натрий	%	не более 0,02	не более 0,015
железо	%	не более 0,04	
кремний	%	не более 0,04	

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ АНОДОВ НА НЕФТЯНОМ И ПЕКОВОМ КОКСАХ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ

Сравнительный анализ параметров и показателей работы проводился на электролизерах типа С-8Б(М) 2-х серий (№ 1 и 2) электролизного производства на алюминиевом предприятии, оснащённом ваннами с СА.

Нами были проанализированы данные по эксплуатации ванн с разным видом кокса в составе анодной массы, загружаемой в электролизеры. Были рассмотрены следующие показатели: выход угольной пены; удельный расход электроэнергии; количество технологических нарушений, возникающих в процессе работы электролизеров при обслуживании анода; расход сырьевых материалов на изготовление анодной массы.

Данные показатели существенным образом зависят от качества анода и его эксплуатации в процессе электролиза.

Влияние наличия угольной пены в электролите на процесс электролиза. Отличительной чертой эксплуатации ванн с СА является неизбежное образование угольной пены на поверхности электролита [27, 28], рис. 3. Она образуется в основном из-за различий в реакционной способности коксов и пека – способности взаимодействовать с оксифторидными комплексами, находящимися в криолит-глиноземном расплаве. Углерод пека окисляется быстрее, чем углерод кокса, что приводит к попаданию последнего на поверхность электролита.

Наличие значительного количества угольной пены в электролите алюминиевой ван-



Рис. 3. Угольная пена в расплаве электролита [29]

Fig. 3. Carbon skim in the electrolyte melt [29]

ны приводит к возникновению различных технологических нарушений, основные из которых [30, 31]:

- необходимость уменьшения межполюсного расстояния между анодом и катодом при заданном рабочем напряжении из-за неконтролируемого увеличения электросопротивления электролита;
- увеличение коэффициента динамической вязкости электролита, что приводит к запутыванию корольков алюминия в расплаве;
- уменьшение скорости растворения и распределения Al₂O₃, так как угольная пена препятствует его свободному распределению в электролите;
- более медленный отвод теплоты от расплава, что может привести к нарушению теплового равновесия в ванне;
- увеличение электрического сопротивления электролита, т.к. угольная пена выступает в роли изолятора [32];

– повышение температуры расплава, сопровождающееся повышенным расходом фтористых солей;

– и, как следствие повышения температуры, риск возникновения накарбизирования расплава (образования не проводящего электрический ток Al_4C_3).

В табл. 2 приведены данные по выходу угольной пены за период с июня по октябрь 2024 г. (в серии № 1 установлено 172 электролизера, в серии № 2 – 186).

Как показали наши исследования (см. табл. 2), более значительный выход угольной пены за исследуемый период преобладает на электролизерах с анодами на основе нефтяного кокса.

Расход электроэнергии. Удельный расход электроэнергии на 1 т производимого алюминия на российских заводах составляет от 14,5 до 18 тыс. кВт·ч, а для получения алюминия высокой чистоты – до 19,5 тыс. кВт·ч.

Проведенный анализ по удельному расходу электроэнергии, затраченной на 1 т Al,

представленный в табл. 3, показал, что за период с июня по октябрь 2024 г. данный показатель имеет незначительные различия. Из приведенных значений можно сделать вывод, что вид кокса в составе АМ влияет на расход электроэнергии в исследуемый период в меньшей степени. Уменьшение расхода электроэнергии за исследуемый период составило 52 кВт·ч/т Al, однако в общих затратах на выпуск единицы продукции также принесет экономическую выгоду.

Расход анодной массы и скорость сгорания анода. Анализ расхода анодной массы на нефтяном и пековом коксах на 1 т Al за период с июня по октябрь 2024 г. представлен в табл. 4.

Как видно из данных табл. 4, среднее количество израсходованного материала (анодной массы) в сутки составляет 98,53 т на электролизерах с анодами, работающих на нефтяном коксе, и 96,71 т на электролизерах с анодами, работающих на пековом коксе. Так как на анодах, работающих на нефтяном

Таблица 2. Выход угольной пены за июнь – октябрь 2024 г.
Table 2. Carbon skim output for the period from June 2024 to October 2024

Месяц	Серия электролиза № 1 (в составе АМ нефтяной кокс)		Серия электролиза № 2 (в составе АМ пековый кокс)	
	Количество угольной пены, кг			
	Суммарное	На 1 электролизер	Суммарное	На 1 электролизер
Июнь	2856,0	16,6	1785,0	9,5
Июль	2894,6	16,8	1561,2	8,3
Август	2787,6	16,2	1323,7	7,1
Сентябрь	2491,0	14,4	1229,0	6,6
Октябрь	2650,1	15,4	1916,3	10,3
На 1 электролизер в среднем за период		~15,9		~8,4

Таблица 3. Показатели по удельному расходу электроэнергии за период июнь – октябрь 2024 г.
Table 3. Indicators of specific electricity consumption for the period from June 2024 to October 2024

Месяц	Серия электролиза № 1 (в составе АМ нефтяной кокс)		Серия электролиза № 2 (в составе АМ пековый кокс)	
	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т Al			
	Корпус А1	Корпус Б1	Корпус А2	Корпус Б2
Июнь	15413	15373	15197	15385
Июль	15502	15473	15303	15426
Август	15336	15415	15362	15521
Сентябрь	15237	15358	15204	15363
Октябрь	15376	15458	15242	15417
Количество электроэнергии, затраченное за период, в среднем	15372	15415	15261	15422
Удельный расход электроэнергии за период на серию	15393		15341	

Таблица 4. Расход анодной массы за период июнь – октябрь 2024 г.
Table 4. Anode paste consumption for the period from June 2024 to October 2024

Месяц	Серия электролиза № 1 (в составе АМ нефтяной кокс)	Серия электролиза № 2 (в составе АМ пековый кокс)
	Расход анодной массы, т	
Июнь	3340,76	3606,55
Июль	3390,78	3544,82
Август	3379,33	3591,16
Сентябрь	3367,36	3548,79
Октябрь	3470,50	3697,82
Суммарное количество АМ за период	16948,73	17989,14
Расход АМ на 1 электролизер	98,53	96,71

коксе, расход АМ больше, можно сделать вывод, что и скорость сгорания данного типа анодов будет больше, что подтверждается проведенными исследованиями и анализу данных о скорости сгорания анодов, табл. 5.

Основные технологические нарушения в работе анода. Одной из основных и главных трудоемких работ при работе электролизной ванны является обслуживание СА. Своевременное и правильное его обслуживание – одна из важных составляющих в нормальном функционировании электролизера.

Особенностью структуры самообжигающихся анодов алюминиевых электролизеров с верхним токоподводом является образование расслоения анода из-за попадания пыли в образовавшиеся полости из сквозных отверстий в теле анода. Главной причиной образования трещин в аноде являются растягивающие напряжения вследствие теплового расширения установленных холодных стальных штырей в процессе перестановки. Это приводит не только к увеличению размеров поперечных трещин, но и образованию продольных трещин. На рис. 4 приведены примеры основных технологических нарушений в работе СА.

Расслоение анода являются одной из самых серьезных проблем в работе электролизера с анодом Содерберга, оно разделяет анод на изолированные участки и препятствует равномерному распределению тока в его горизонтальном сечении. В современных условиях такие дефекты значительно снижают производительность электролизеров.

Также при обслуживании анодного устройства возникают технологические нарушения при перестановке анодных штырей (протечи пека, гажения, попадание жидкой анодной массы в расплав электролита). В табл. 6 представлена сравнительная характеристика статистических данных о частоте технологических нарушений за период с июня по октябрь 2024 г. на электролизерах с анодами, работающими на нефтяном или пековом коксе в составе АМ.

Как можно видеть из данных табл. 6, количество технологических нарушений при проведении данной технологической операции на СА, работающих на нефтяном коксе, преобладает более чем в 2 раза.

Также на рис. 5 для сравнения представлен вид подошвы анодов, сформированных из анодной массы на разном виде кокса.

Таблица 5. Скорость сгорания самообжигающихся анодов за период июнь – октябрь 2024 г.
Table 5. Self-baking anode burnout rate for the period from June 2024 to October 2024

Месяц	Серия электролиза № 1 (в составе АМ нефтяной кокс)		Серия электролиза № 2 (в составе АМ пековый кокс)	
	Скорость сгорания, в среднем, см/сут			
	Корпус А1	Корпус Б1	Корпус А2	Корпус Б2
Июнь	1,48	1,53	1,46	1,53
Июль	1,50	1,55	1,49	1,46
Август	1,48	1,49	1,46	1,50
Сентябрь	1,47	1,53	1,47	1,46
Октябрь	1,48	1,55	1,46	1,47
Скорость сгорания анода, в среднем	1,50		1,47	

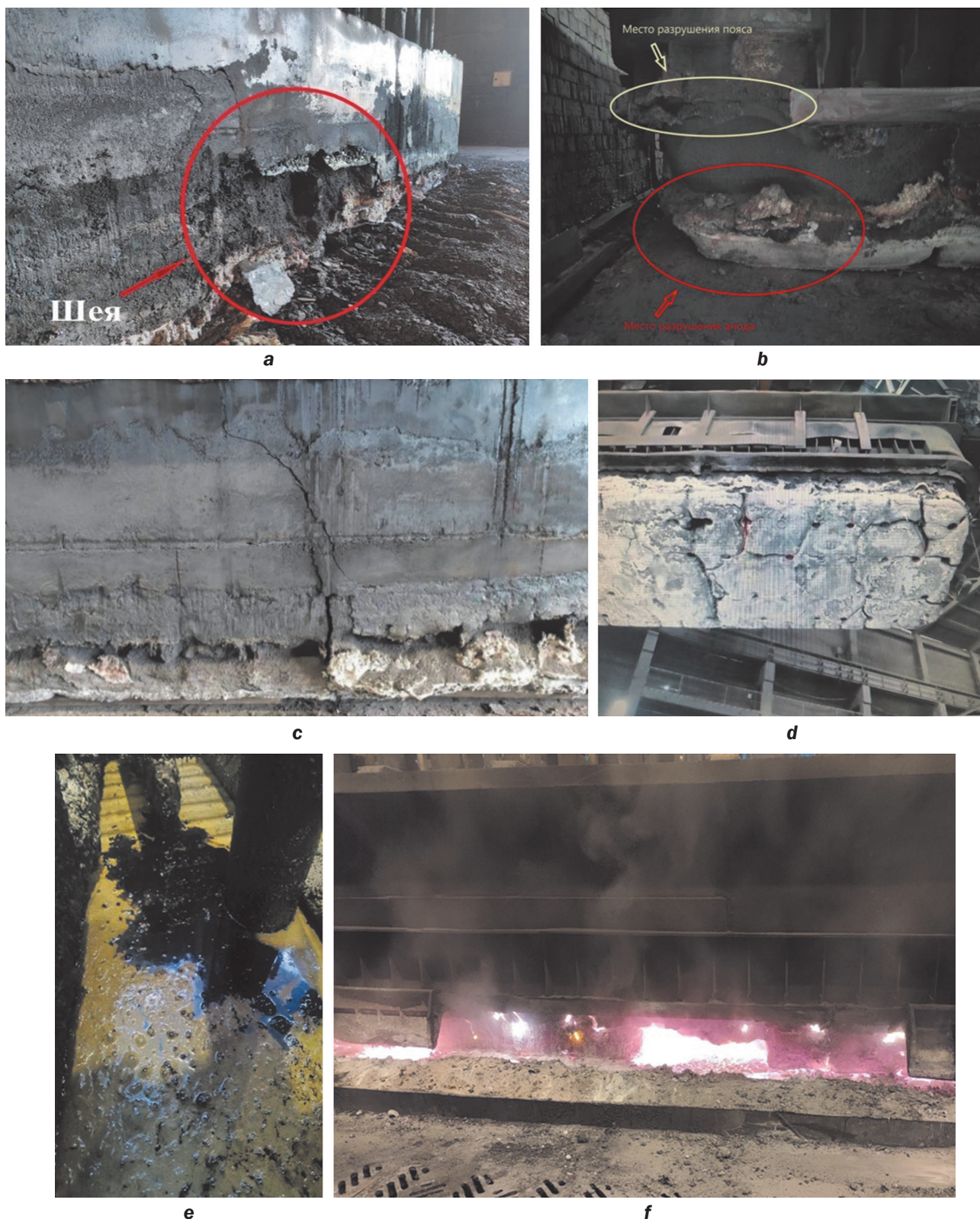


Рис. 4. Основные виды технологических нарушений при обслуживании самообжигающегося анода электролизера: а – выгорание боковой поверхности анода; б – отсутствие торцов и углов анода; в – наличие трещин в теле анода; д – образование сквозных отверстий и трещин под токоподводящими анодными сталеалюминевыми штырями и трещин на подошве анода; е – образование на поверхности анода лековых «карманов»; ф – осыпаемость анода

Fig. 4. Main types of technological failures during electrolytic cell self-baking anode maintenance: а – burnout of the anode side surface; б – absence of ends and corners of the anode; в – presence of cracks in the anode body; д – formation of through holes and cracks under the current-carrying anode steel-aluminum pins and cracks on the anode bottom; е – formation of pitch “pockets” on the anode surface; ф – anode crumbling

Таблица 6. Частота технологических нарушений при перестановке анодных штырей за период с июня по октябрь 2024 г.

Table 6. Frequency of process failures during the rearrangement of anode pins for the period from June to October 2024

Месяц	Серия электролиза № 1 (в составе АМ нефтяной кокс)	Серия электролиза № 2 (в составе АМ пековый кокс)
Июнь	53	20
Июль	70	31
Август	37	13
Сентябрь	66	25
Октябрь	59	32
Суммарное количество технологических нарушений за период на серию	285	121



а



б

Рис. 5. Подошва самообжигающегося анода, сформированного из анодной массы, содержащей в качестве наполнителя: а – пековый кокс; б – нефтяной кокс

Fig. 5. The bottom of a self-baking anode formed from the anode paste containing the following filler: a – pitch coke; b – petroleum coke

Как видно из рис. 5, вид кокса в составе АМ влияет на возникновение расслоений на подошве анода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самообжигающиеся аноды алюминиевых электролизеров являются одними из главных участников процесса электролиза при производстве первичного алюминия. Качество и стабильность нормальной работы анодов зависят от ряда условий, начиная от гранулометрического состава используемого в производстве АМ сырья, условий производства и хранения АМ и заканчивая ведением технологии электролиза.

Нами был проведен сбор данных о некоторых параметрах технологического процесса на электролизерах типа С-8Б(М) с анодом Содерберга, работающих на анодной массе, в состав которой входили нефтяной или пековый кокс (на примере двух серий электролиза алюминиевого завода).

Сравнительный анализ данных при обслуживании электролизеров с СА показал, что наименьшие значения выхода угольной пены, удельного расхода электроэнергии, расхода АМ и скорости сгорания анода отвечают анодам, сформированным из АМ на основе пекового кокса.

Список источников

1. Dudin M.N., Voykova N.A., Frolova E.E., Artemieva J.A., Rusakova E.P., Abashidze A.H. Modern trends and challenges of development of global aluminum industry // *Metalurgija*. 2017. Vol. 56. No. 1-2. P. 255–258. EDN: XDPBLL.
2. Горланов Е.С., Бричкин В.Н., Поляков А.А. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Часть 1. Традиционные направления развития // *Цветные металлы*. 2020. № 2. С. 36–41. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.02.04>. EDN: UTKUVO.

3. Корнеев С.И. Алюминиевая промышленность Китая и перспективы мировой алюминиевой индустрии // Цветные металлы. 2021. № 4. С. 5–11. <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.04.01>. EDN: NLIPVD.
4. Сизяков В.М., Поляков П.В., Бажин В.Ю. Современные тенденции и стратегические задачи в области производства алюминия и его сплавов в России // Цветные металлы. 2022. № 7. С. 16–23. EDN: QRECGA.
5. Zhaowen Wang, Bingliang Gao, Zhongning Shi, Xianwei Hu, Fengguo Liu, Wenju Tao, Youjian Yang Проблемы и технические решения в развитии китайской промышленности первичного алюминия // Цветные металлы и минералы – 2024: сб. тез. докл. XII Междунар. конгр. (г. Красноярск, 9–13 сентября 2024 г.). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2024. Р. 2–11. EDN: CDPJHW.
6. Agnihotri A. Пути развития индийской алюминиевой промышленности // Цветные металлы и минералы – 2024: сб. тез. докл. XII Междунар. конгр. (г. Красноярск, 9–13 сентября 2024 г.). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2024. Р. 12–2418. EDN: BJDQYW.
7. Горланов Е.С., Кавалла Р., Поляков А.А. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Часть 2. Перспективные направления развития // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 42–49. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.06>. EDN: JBGFYQ.
8. Виноградов А.М., Пинаев А.А., Виноградов Д.А., Пузин А.В., Шадрин В.Г., Зорько Н.В. [и др.]. Повышение эффективности укрытия электролизеров Содерберга // Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. № 1. С. 19–30. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>. EDN: XWTXTX.
9. Пузанов И.И., Волохов И.Н., Быков Р.Ю., Муравьев С.А. Пуск РА-400 на Тайшетском алюминиевом заводе // Цветные металлы и минералы – 2024: сб. тез. докл. XII Междунар. конгр. (г. Красноярск, 9–13 сентября 2024 г.). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2024. Р. 213–218. EDN: ZZCDFB.
10. Горланов Е.С., Сизяков В.М., Шариков Ф.Ю., Спекторук А.А., Бутакова Т.В. Проблемы и решения защиты углеграфитовых электродов // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 3. С. 513–537. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-513-537>. EDN: AEDFQP.
11. Shoppert A., Valeev D., Loginova I. Novel method of bauxite treatment using electroreductive Bayer process // Metals. 2023. Vol. 13. Iss. 9. P. 1502. <https://doi.org/10.3390/met13091502>.
12. Пинаев А.А., Радионов Е.Ю., Орлов И.А., Немчинова Н.В. Изучение особенностей магнитогидродинамики электролизёров С-8БМ (С-8Б) при модернизации алюминиевых заводов // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 162–177. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-162-177>. EDN: XHFGYC.
13. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC RUSAL's aluminum smelters sustainable development // Light Metals. The Minerals, Metals and Materials Series / eds. C. Chesonis. Cham: Springer, 2019. P. 553–563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70. EDN: SIHUYU.
14. Фризоргер В.К., Гильдебрандт Э.М., Вершинина Е.П. Мониторинг показателей работы алюминиевых электролизеров с анодом Содерберга // Известия вузов. Цветная металлургия. 2013. № 4. С. 11–14. EDN: QZRKFB.
15. Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В., Гавриленко Л.В., Гавриленко А.А. Изучение вещественного состава глиноземсодержащего материала алюминиевых электролизеров для использования в технологии первичного алюминия // Цветные металлы. 2018. № 3. С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>. EDN: YUCHKI.
16. Grjotheim K. Introduction to aluminium electrolysis: understanding the Hall-Héroult process. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 с.
17. Thonstad J. Aluminium electrolysis: fundamentals of the Hall Héroult process. Aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 2001. 359 с.
18. Ветюков М.М., Цыпляков А.М., Школьников С.Н. Металлургия алюминия и магния. М.: Металлургия, 1987. 320 с.
19. Чалых В.И., Немчинова Н.В., Аюшин Б.И., Богданов Ю.В. Техничко-экономическое сравнение электролизеров с обожженными анодами и самообжигающимися анодами и верхним токоподводом // Известия вузов. Цветная металлургия. 2005. № 2. С. 21–26. EDN: JVUCFH.
20. Янко Э.А. Аноды алюминиевых электролизеров. М.: Руда и металлы, 2001. 671 с.
21. Гильдебрандт Э.М., Вершинина Е.П., Фризоргер В.К. Качество анодной массы в технологии электролиза алюминия с анодом Содерберга // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2014. № 1. С. 17–20. EDN: RYLGUB.
22. Сидоров О.Ф., Селезнёв А.Н. Перспективы производства и совершенствования потребительских свойств каменноугольных электродных пеков // Российский химический журнал. 2006. Т. 50. № 1. С. 16–24. EDN: GZQCPJ.
23. Ткач Е.А., Немчинова Н.В. Влияние коксопечевой композиции на качество анодов Содерберга в алюминиевом производстве // Перспективы развития, совершенствования и автоматизации высокотехнологичных производств: материалы XV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 23–24 апреля 2025 г.). Иркутск: ИРНТУ, 2025. С. 117–122. EDN: OSNOOR.
24. Аншиц А.Г., Куртеева Л.И., Цыганова С.И., Суздорф А.Р., Аншиц Н.Н., Морозов С.В. Сравнительная оценка эмиссии канцерогенных веществ при использовании средне- и высокотемпературных пеков в производстве алюминия в электролизерах Содерберга // Химия в интересах устойчивого развития. 2001. № 9. С. 345–352.
25. Таскина А.В., Немчинова Н.В. Аттестация стандартных образцов предприятия углеродных материалов, используемых для получения первичного алюминия // Молодежный вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. № 4. С. 82–88. EDN: MMVTKS.

26. Немчинова Н.В., Таскина А.В. Разработка методики определения примесей в углеродных материалах, используемых в производстве первичного алюминия // Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации (Сагиновские чтения № 12): тр. Междунар. науч.-практ. online-конф. (г. Караганда, 18–19 июня 2020 г.). Караганда: КарГТУ им. Абылкаса Сагинова, 2020. Ч. 2. С. 156–158.
27. Foosnæs T., Naterstad T., Bruheim M., Grjotheim K. Anode dusting in Hall-Heroult cells // Essential Readings in Light Metals: Electrode Technology for Aluminum Production / eds. A. Tomsett, J. Johnson. 2016. Vol. 4. P. 633–642. <https://doi.org/10.1002/9781118647745.ch83>.
28. Белоусова Н.В., Шарыпов Н.А., Шахрай С.Г., Безруких А.И. Угольная пена в алюминиевом электролизере: проблемы и некоторые пути их решения // Цветные металлы. 2017. № 8. С. 43–49. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.08.06>. EDN: ZIBLAJ.
29. Bugnion L., Fischer J.-C. Effect of carbon dust on the electrical resistivity of cryolite bath // Light Metals / eds. E. Williams. Cham: Springer, 2016. Vol. 92. No. 1-2. P. 587–591. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4_99.
30. Sadler B., Welch B. Reducing carbon dust? – Needs and possible directions // 9th Australasian Aluminium Smelting Technology Conference and Workshops. Terrigal, 2007. P. 1–14.
31. Perruchoud R.C., Hulse K.L., Fischer W.K., Schmidt-Hatting W. Dust generation and accumulation for changing anode quality and cell parameters // Light Metals / eds. A. Tomsett, J. Johnson. 1999. P. 649–656. <https://doi.org/10.1002/9781118647745.ch85>.
32. Gudmundsson H. Anode dusting from a potroom perspective at Nordural and correlation with anode properties // Essential Readings in Light Metals / eds. A. Tomsett, J. Johnson. Cham: Springer, 2011. P. 657–662. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2_86.

References

1. Dudin M.N., Voykova N.A., Frolova E.E., Artemieva J.A., Rusakova E.P., Abashidze A.H. Modern trends and challenges of development of global aluminum industry. *Metalurgija*. 2017;56(1-2):255-258. EDN: XDPBLL.
2. Gorlanov E.S., Brichkin V.N., Polyakov A.A. Electrolytic production of aluminium. Review. Part 1. Conventional areas of development. *Tsvetnye Metally*. 2020;2:36-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.02.04>. EDN: UTKUV0.
3. Korneev S.I. China's aluminium sector and prospects of global aluminium industry. *Tsvetnye Metally*. 2021;4:5-11. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2021.04.01>. EDN: NLIPVD.
4. Sizyakov V.M., Polyakov P.V., Bazhin V.Yu. Modern trends and strategic objectives in the production of aluminum and its alloys in Russia. *Tsvetnye Metally*. 2022;7:16-23. (In Russ.). EDN: QRECGA.
5. Zhaowen Wang, Bingliang Gao, Zhongning Shi, Xianwei Hu, Fengguo Liu, Wenju Tao, Youjian Yang. Problems and technical measures in the development of China's primary aluminum industry. In: *Tsvetnye metally i mineraly – 2024: sbornik tezisev dokladov XII Mezhdunarodnogo kongressa = Non-ferrous metals and minerals–2024: book of abstracts of the Twelfth International Congress*. 9–13 September 2024, Krasnoyarsk: Nauchno-innovacionnyj centr; 2024, p. 2-11. (In Russ.). EDN: CDPJHW.
6. Agnihotri A. Charting a promising path: the evolving landscape of India's aluminium industry. In: *Tsvetnye metally i mineraly – 2024: sbornik tezisev dokladov XII Mezhdunarodnogo kongressa = Non-ferrous metals and minerals–2024: book of abstracts of the Twelfth International Congress*. 9–13 September 2024, Krasnoyarsk: Nauchno-innovacionnyj centr; 2024, p. 12-18. (In Russ.). EDN: BJDQYW.
7. Gorlanov E.S., Kawalla R., Polyakov A.A. Electrolytic production of aluminium. Review. Part 2. Development prospects. *Tsvetnye Metally*. 2020;10:42-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.10.06>. EDN: JBGFYQ.
8. Vinogradov A.M., Pinaev A.A., Vinogradov D.A., Puzin A.V., Shadrin V.G., Zor'ko N.V., et al. Increasing covering efficiency of Soderberg cells. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;1:19-30. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>. EDN: XWTXTX.
9. Puzanov I.I., Volokhov I.N., Bykov R.YU., Muravyev S.A. Launch of RA-400 at Taishet aluminium smelter. In: *Tsvetnye metally i mineraly – 2024: sbornik tezisev dokladov XII Mezhdunarodnogo kongressa = Non-ferrous metals and minerals– 2024: book of abstracts of the Twelfth International Congress*. 9–13 September 2024, Krasnoyarsk: Nauchno-innovacionnyj centr; 2024, p. 213-218. (In Russ.). EDN: ZZCDFB.
10. Gorlanov E.S., Sizyakov V.M., Sharikov F.Yu., Spektoruk A.A., Butakova T.V. Problems and solutions to protection of carbon-graphite electrodes. *iPolytech Journal*. 2024;28(3):513-00. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-3-513-537>. EDN: AEDFQP.
11. Shoppert A., Valeev D., Loginova I. Novel method of bauxite treatment using electroreductive Bayer process. *Metals*. 2023;13(9):1502. <https://doi.org/10.3390/met13091502>.
12. Pinaev A.A., Radionov E.Yu., Orlov I.A., Nemchinova N.V. Analysis of the magnetohydrodynamic parameters of S-8BM (S-8B) electrolyzers in the modernization of aluminum smelters. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):162-177. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-162-177>. EDN: XHFGYC.
13. Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A., Grigoriev V. Environmental aspects of UC RUSAL's aluminum smelters sustainable development. In: Chesonis C. (eds.). *Light Metals. The Minerals, Metals and Materials Series*. Cham: Springer; 2019, p. 553-563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_70. EDN: SIHUYU.

14. Frizorger V.K., Gil'debrandt E.M., Vershinina E.P. Monitoring performance of aluminum electrolyzers with Soderberg anode. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2013;4:11-14. (In Russ.). EDN: QZRKFB.
15. Burdonov A.E., Zelinskaya E.V., Gavrilenko L.V., Gavrilenko A.A. Investigation of substantial composition of alumina-bearing material of aluminium electrolyzers for usage in primary aluminium technology. *Tsvetnye metally*. 2018;3:32-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>. EDN: YUCHKI.
16. Grjotheim K. *Introduction to aluminium electrolysis: understanding the Hall-Héroult process. Introduction to aluminium electrolysis*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag; 1993, 260 p.
17. Thonstad J. *Aluminium electrolysis: fundamentals of the Hall Héroult process. Aluminium electrolysis*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag; 2001, 359 p.
18. Vetyukov M.M., Tsyplakov A.M., Shkol'nikov S.N. *Metallurgy of aluminum and magnesium*. Moscow: Metallurgiya; 1987, 320 p. (In Russ.).
19. Chalykh V.I., Nemchinova N.V., Ayushin B.I., Bogdanov Yu.V. Technical and economic comparison of electrolyzers with baked anodes and self-baking anodes and upper current carrier. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2005;2:21-26. (In Russ.). EDN: JVUCFH.
20. Yanko E.A. *Anodes of aluminum electrolyzers*. Moscow: Ruda i metally; 2001, 671 p. (In Russ.).
21. Gil'debrandt E.M., Vershinina E.P., Frizorger V.K. *Anode paste quality in aluminum electrolysis technology with Soderberg anode. Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2014;1:17-20. (In Russ.). EDN: RYLGB.
22. Sidorov O.F., Seleznyov A.N. Prospects for the production and consumer property improvement of coal tar electrode pitches. *Rossiyskij himicheskij zhurnal*. 2006;50(1):16-24. (In Russ.). EDN: GZQCPJ.
23. Tkach E.A., Nemchinova N.V. Influence of coke-pitch composition on Soderberg anode quality in aluminum production. In: *Perspektivy razvitiya, sovershenstvovaniya i avtomatizatsii vysokotekhnologichnykh proizvodstv: materialy XV Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem = Prospects for development, improvement and automation of high-tech industries: Proceedings of the 15th All-Russian scientific and practical conference with international participation*. 23–24 April 2025, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2025, p. 117-122. (In Russ.). EDN: OSNOOR.
24. Anshits A.G., Kurteeva L.I., Tsyganova S.I., Suzdorf A.R., Anshits N.N., Morozov S.V. Comparative assessment of carcinogenic emissions when using medium- and low-temperature pitches in aluminum production in Soderberg cells. *Chemistry for Sustainable Development*. 2001;9:345-352. (In Russ.).
25. Taskina A.V., Nemchinova N.V. Certification of reference materials for carbon materials used in the production of primary aluminum. *Molodezhnyy vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019;4:82-88. (In Russ.). EDN: MMVTKS.
26. Nemchinova N.V., Taskina A.V. Developing methods to determine impurities in carbon materials used in primary aluminum production. In: *Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva – osnova realizatsii Plana natsii (Saginovskie chteniya no. 12): trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy online-konferencii = Integration of science, education and production as the basis for implementing the Nation Plan (Saginov Readings No. 12): Proceedings of the International scientific and practical online conference*. 18–19 June 2020, Karaganda. Karaganda: Abylkar Saginov Karaganda Technical University; 2020, part 2, p. 156-158. (In Russ.).
27. Foosnæs T., Naterstad T., Bruheim M., Grjotheim K. Anode dusting in Hall-Héroult cells. In: Tomsett A., Johnson J. (eds.). *Essential Readings in Light Metals: Electrode Technology for Aluminum Production*. 2016, vol. 4, p. 633-642. <https://doi.org/10.1002/9781118647745.ch83>.
28. Belousova N.V., Sharypov N.A., Shakhrai S.G., Bezrukh A.I. Coal froth in an aluminium electrolyzer: the problems and proposed solutions. *Tsvetnye Metally*. 2017;8:42-49. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.08.06>. EDN: ZIBLAJ.
29. Bugnion L., Fischer J.-C. Effect of carbon dust on the electrical resistivity of cryolite bath. In: Williams E. (eds.). *Light Metals*. Cham: Springer; 2016, vol. 92, no. 1-2, p. 587-591. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4_99.
30. Sadler B., Welch B. Reducing carbon dust? – Needs and possible directions. In: *9th Australasian Aluminium Smelting Technology Conference and Workshops*. Terrigal; 2007, p. 1-14.
31. Perruchoud R.C., Hulse K.L., Fischer W.K., Schmidt-Hatting W. Dust generation and accumulation for changing anode quality and cell parameters. In: Tomsett A., Johnson J. (eds.). *Essential Readings in Light Metals*. 1999, p. 649-656. <https://doi.org/10.1002/9781118647745.ch85>.
32. Gudmundsson H. Anode dusting from a potroom perspective at Nordal and correlation with anode properties In: Tomsett A., Johnson J. (eds.). *Essential Readings in Light Metals*. Cham: Springer; 2011, p. 657-662. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48200-2_86.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Немчинова Нина Владимировна,
 д.т.н., профессор,
 заведующий кафедрой металлургии цветных металлов,
 Иркутский национальный исследовательский
 технический университет,
 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
 ✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nina V. Nemchinova,
 Dr. Sci. (Eng.), Professor,
 Head of the Department of Non-Ferrous
 Metals Metallurgy,
 Irkutsk National Research Technical University,
 83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
 ✉ ninavn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9895-1709>

Ткач Евгений Александрович,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
djon-ds@mail.ru

Тютрин Андрей Александрович,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
an.tu@inbox.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

Бельский Сергей Сергеевич,
к.т.н., доцент,
доцент кафедры металлургии цветных металлов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия
bss@istu.edu
<http://orcid.org/0009-0009-3171-7446>

Evgenii A. Tkach,
Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
djon-ds@mail.ru

Andrey A. Tyutrin,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Non-Ferrous Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
an.tu@inbox.ru
<http://orcid.org/0000-0001-9983-2680>

Sergei S. Belskii,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Non-Ferrous Metals Metallurgy,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia
bss@istu.edu
<http://orcid.org/0009-0009-3171-7446>

Заявленный вклад авторов

Немчинова Н.В. осуществляла научное руководство исследованиями и провела общее редактирование текста рукописи. Ткач Е.А. собрал экспериментальные и аналитические данные, обобщил полученные результаты. Тютрин А.А. сделал выводы по результатам исследований, осуществил графическую интерпретацию результатов исследований. Бельский С.С. провел подбор литературных источников по тематике.

Конфликт интересов

Немчинова Нина Владимировна является членом редакционной коллегии журнала «iPolytech Journal» с 2000 года, но не имеет отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 13.05.2025 г.; одобрена после рецензирования 27.06.2025 г.; принята к публикации 13.07.2025 г.

Authors' contribution

Nina V. Nemchinova supervised the scientific research and conducted general editing of the manuscript. Evgenii A. Tkach collected experimental and analytical data, summarized the obtained results. Andrey A. Tyutrin derived conclusions and built diagrams based on the research results. Sergei S. Belskii selected literary sources on the research topic.

Conflict of interests

Nina V. Nemchinova has been a member of the iPolytech Journal Editorial Board since 2000, but she was not involved in making decision about accepting the present article for publication. The article was subjected the Journal's review procedure. The authors do not report any other conflicts of interest.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 13.05.2025; approved after reviewing 27.06.2025; accepted for publication 13.07.2025.

ПЕРСОНАЛИЯ

Светлане Ивановне Половневой – 80 лет

Работа на преподавательском поприще стала для Светланы Ивановны делом всей жизни, призванием и благородной миссией. Она кандидат технических наук, доцент, профессор Российской Академии Естествознания, Действительный член Метрологической Академии.

В 1975 году С.И. Половнева успешно защитила кандидатскую диссертацию на тему «Изучение закономерностей изменения удельной поверхности осадков промышленного разложения алюминатных растворов», которая имела большое научное и практическое значение применительно к условиям новой для того времени технологии переработки нефелинового сырья строящегося Ачинского глиноземного комбината. Лично и в соавторстве С.И. Половнева написала свыше 20 учебных и методических пособий, более 100 научных статей, кроме того, в ее научном багаже патенты на изобретения и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Высокий профессионализм, богатый опыт и знания, чувство ответственности и требовательность в сочетании с чутким, внимательным отношением к людям снискали Светлане Ивановне заслуженный авторитет и уважение среди коллег. Долгие годы она успешно совмещала преподавательскую деятельность с административной работой в качестве заместителя декана металлургического факультета, руководителя метрологической службы нашего вуза. Ее энергия, талант, умение работать, ставить и решать сложные задачи служат примером, который воодушевляет, заставляет поверить в собственные силы ее учеников и коллег по работе.

Педагогический стаж работы Юбилера в родном «Политехе» составил 57 лет! Выпускница (с отличием!) 1968 года, Светлана Ивановна посвятила всю свою трудовую жизнь подготовке студентов – будущих специалистов по автоматизации производственных процессов. При этом она не только настоящий профессионал, но и внимательный, интеллигентный, всегда открытый для общения человек, эффективный куратор, ставший для своих студентов поистине родным человеком. На протяжении многих лет С.И. Половнева была ответственной за НИРС кафедры, и надо отдать должное ее организаторскому таланту, высокой научной и ин-





женерной подготовке, что практически ежегодно при подведении итогов конкурса среди студентов-исследователей вуза, призеров неизменно были студенты кафедры автоматизации, в том числе и ее ученики. Один из студентов в 2015 году сказал: «Светлана Ивановна – мотор кафедры! Вся студенческая наука на ней! Чуткий и компетентный преподаватель! На пару бежишь к ней с огромным желанием!» И с этим утверждением нельзя не согласиться.

Шесть лет Светлана Ивановна возглавляла отдел метрологии и стандартизации ИрГТУ, выполняя обязанности Главного метролога по совместительству (1999–2005 гг.). За годы научно-педагогической деятельности имеет благодарственные письма от Министерства по молодежной политике, Министерства информационных технологий, инновационного развития и связи Иркутской области, администрации ИРНИТУ, ООО «СибВАМИ». Была награждена грамотой Министерства образования и науки Российской Федерации.

В этот знаменательный восьмидесятый день рождения мы хотим пожелать уважаемой Светлане Ивановне, прежде всего, крепкого здоровья и много сил. Не терять своего вдохновения и с улыбкой встречать каждый день! Пусть теплое отношение многочисленных выпускников кафедры автоматизации и управления, коллег по работе, родных и близких согревают ей сердце! Желаем Юбиляру всех благ и гармонии души!

Уважаемые коллеги!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

I. Рукопись статьи направляется в редакцию через online-форму (после предварительной регистрации авторов). Рекомендуемый объем статьи не менее 20 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение от аффилированной организации о возможности публикации в открытой печати.
2. Лицензионный договор.
3. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (5–7); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон, e-mail и ORCID (вся информация предоставляется одним файлом).

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: pgp@istu.edu **в виде файла с расширением *.DOCX** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – 2 см; слева и справа – 2 см; табуляция – 2 см; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются курсивом; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) рисунки, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением *.BMP, *.TIFF, *.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Министерства науки и высшего образования РФ (**Категория К-1**), в Единый государственный перечень научных изданий «Белый список» (**Уровень 2**), в DOAJ, международный каталог периодических изданий «Ulrichs Periodicals Directory», EBSCO, Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «Киберленинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «iPolytech Journal», реферируются и рецензируются. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный секретарь.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgp@istu.edu.

Редактор Я.В. Макшанцева
Дизайнер В.Г. Лисицин
Ответственный секретарь
Г.П. Привалова
Перевод на английский язык
Tomas A. Beavitt,
Н.Г. Поповой, В.В. Батицкой
Верстка Ю.В. Макаровой

Выход в свет 30.09.2025 г.
Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 17.
Тираж 500 экз. Номер по реестру 77/Зн.

Издание распространяется бесплатно



iPolytech Journal

ISSN 2782-4004 (print) ISSN 2782-6341 (online)