

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2026. Т.24, №2

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. По результатам экспертной оценки ВАК журнал отнесен к категории К1. По результатам оценки межведомственной комиссии журнал включен в Единый государственный перечень научных изданий «Белый список» – 2 уровень. Журнал индексируется в международных и российских базах данных: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI, ядро РИНЦ, ВИНТИ и др. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольцев (Россия)

Т.Н. Александрова (Россия), Ж.-Б. Вогт (Франция),
С.Е. Гавришев (Россия), О.Е. Горлова (Россия),
В.Е. Громов (Россия), Я. Грум (Словения),
И.Г. Гун (Россия), М. Дабала (Италия),
Х. Дья (Польша), Р.О. Дюссан (Индия),
Р. Кавалла (Германия), В.Н. Калмыков (Россия),
Д.Р. Каплунов (Россия), А.Г. Корчунов (Россия),
О.С. Логунова (Россия), Д. Милованович (Сербия),
К. Мори (Япония), И. Мусирин (Малайзия),
А.Б. Найзабеков (Казахстан), Н.Н. Орехова (Россия),
М. Пьетшик (Польша), В.Ф. Рашников (Россия),
Г.А. Роджерсон (Великобритания), О.Н. Тулупов (Россия),
Ю Фенг (Китай), В.Р. Храмшин (Россия), Р. Цин (Великобритания)

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор О.Н. Тулупов
Первый заместитель главного редактора
М.А. Полякова
Заместители главного редактора:
А.Г. Корчунов, О.С. Логунова,
Н.Н. Орехова, В.Р. Храмшин
Редактор Н.П. Боярова
Технический редактор Т.В. Леонтьева
Перевод на английский А.Р. Карагузина
Дизайн обложки: А.Д. Григорьев

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2026

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС 77-59632 от 10.10.2014 г.

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова.
(455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38).

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.2010.

Адрес редакции:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
пр. К. Маркса, 45/2, оф. 402
Тел.: (3519) 22-14-93.
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>
Email: vestnik@mgtu.ru; rio_mgtu@mail.ru

Адрес издателя:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии
Выход в свет 30.06.2026. Заказ 190. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2026. Vol.24, no.2

The journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals, which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD theses. Following an expert assessment of the Higher Attestation Commission, the journal is classified as category K1. According to the results of the evaluation of the interdepartmental commission, the journal is included in the Unified State List of Scientific Publications "White List" level 2. The journal is indexed in international and Russian databases: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI, the core of RSCI, VINITI (the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences), and others. Digital versions of the journal are available at the network resource of the Scientific Electronic Library on the Internet.

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

Head of the Editorial Board V.M. Kolokoltsev (Russia)

T.N. Aleksandrova (Russia), M. Dabala' (Italy),
R.O. Dusane (India), H. Dyja (Poland), Ye Feng (China),
S.E. Gavrishev (Russia), O.E. Gorlova (Russia),
V.E. Gromov (Russia), J. Grum (Slovenia), I.G. Gun (Russia),
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),
R. Kawalla (Germany), V.R. Khramshin (Russia),
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia),
D. Milovanovic (Serbia), K. Mori (Japan),
I. Musirin (Malaysia), A.B. Naizabekov (Kazakhstan),
N.N. Orekhova, M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (UK),
V.F. Rashnikov (Russia), G.A. Rogerson (UK),
O.N. Tulupov (Russia), J.-B. Vogt (France)

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

Deputy Chief Editors:
A.G. Korchunov, O.S. Logunova,
V.R. Khramshin, N.N. Orekhova

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor T.V. Leontyeva

Translated into English A.R. Karaguzhina

The cover is designed by A.D. Grigorev

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2026

Registration certificate PI # FS 77-59632 dated October 10, 2014 is issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media.

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University
(38, pr. Lenina, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455000)

16+ in accordance with Federal Law №436-FZ dated 29.12.2010

Editorial office:

402, 45/2 Karl Marks prospekt,
Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University
Phone: +7 (3519) 221 493.
URL: <http://www.vestnik.mgtu.ru>
Email: vestnik@mgtu.ru; rio_mgtu@mail.ru

Publisher office:

45/2 Karl Marks prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Printing office:

38 Lenin prospekt, Magnitogorsk, Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University

Publication date: 30.06.2026. Order 190. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ	5
<i>Дегодя Е.Ю., Ляо Синцинь, Медяник Н.Л., Шадрунова И.В., Карелина Ю.А., Гмызина Н.В.</i> Молекулярно-динамические аспекты прогнозирования свойств структур кальцийсодержащих минералов для повышения их селективности	5
<i>Гузев О.А., Понамарева Е.А., Пыталев И.А.</i> Особенности комплексного использования самонагревающихся углеродных отвалов	14
Чебан А.Ю. Обеспечение гибкого управления качеством минерального сырья, выделяемого из некондиционных руд при их перемещении комбинированным транспортом	23
<i>Целищев В.А., Целищев Д.В.</i> Гидропривод буровой установки как объект регулирования	31
Максимов М.С. Бестранспортная технология вскрышных работ для пластовых месторождений в зоне вечной мерзлоты	40
<i>Пугачев И.Н., Архипова Ю.А.</i> Технологическая трансформация добычи и глубины переработки минерально-сырьевых ресурсов в стратегии развития Дальнего Востока (2026-2036)	47
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ	56
<i>Ерохин Ю.В., Макаров А.Б., Захаров А.В., Хиллер В.В., Леонова Л.В.</i> Вещественный состав медных шлаков Полевского металлургического завода	56
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	67
<i>Терентьев Д.В., Харитонов В.А., Шеметова Е.С., Усанов М.Ю., Платов С.И.</i> Влияние маршрута волочения на конкурентоспособность сталемедной проволоки	67
<i>Моллер А.Б., Тулупов О.Н., Левандовский С.А., Михалев С.В., Михалев А.В., Савва А.Д.</i> Выбор компоновочных решений непрерывного сортового стана для подшипниковой стали ШХ15 ...	75
<i>Ву Ю., Ю Х., Песин А.М., Пустовойтов Д.О.</i> Влияние криогенной асимметричной прокатки на микроструктуру и механические свойства высокоэнтропийного сплава CoCrFeNi	82
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ..	93
<i>Константинов Д.В., Корчунов А.Г., Огнева Е.М., Комкова Д.А.</i> Оценка возможности применения TRIP-сталей в производстве противообвальных кольчужных сеток	93
<i>Федоров А.А., Бредгауэр Ю.О., Полонянкин Д.А., Гаранин Д.В., Бобков Н.В., Остап С.В.</i> Имитационное моделирование и экспериментальное исследование прокатки диэлектрической жидкости в ходе проволочно-вырезной электроэрозионной обработки	102

CONTENTS

SUBSOIL USE	5
<i>Degodya E.Yu., Liao Xingjin, Medyanik N.L., Shadrunova I.V., Karelina Yu.A., Gmyzina N.V.</i> Molecular Dynamic Aspects of Predicting the Structural Properties of Calcium-Bearing Minerals to Increase Their Selectiveness	5
<i>Guzeev O.A., Ponamaryova E.A., Pytalev I.A.</i> Features of the Integrated Utilization of Self-Heating Coal-Mine Waste Dumps	14
Cheban A.Yu. Ensuring Flexible Quality Management Of Mineral Raw Materials Separated From Substandard Ores During Their Transportation By Combined Transport Systems	23
<i>Tselishchev V.A., Tselishchev D.V.</i> Hydraulic Drive of a Drilling Rig as a Control Object	31
Maksimov M.S. Non-Transport Overburden Mining Technology for Stratified Deposits in the Permafrost Zone	40
<i>Pugachev I.N., Arkhipova Yu.A.</i> Technological Transformation of Mineral Raw Material Extraction and its Processing Depth in the Development Strategy of the Russian Far East (2026-2036)	47
METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS.....	56
<i>Erokhin Yu.V., Makarov A.B., Zakharov A.V., Khiller V.V., Leonova L.V.</i> Material Composition of Copper Slags from the Polevskoy Metallurgical Plant	56
METAL FORMING.....	67
<i>Terentyev D.V., Kharitonov V.A., Shemetova E.S., Usanov M.Yu., Platov S.I.</i> Influence of the Drawing Route on the Competitiveness of Steel-Copper Wire	67
<i>Moller A.B., Tulupov O.N., Levandovsky S.A., Mikhalev S.V., Mikhalev A.V., Savva A.D.</i> Selection of Layout Solutions for a Continuous Bar Mill for ShKh15 Bearing Steel	75
<i>Wu Y., Yu H., Pesin A.M., Pustovoytov D.O.</i> Influence of Asymmetric Cryogenic Rolling on the Microstructure and Mechanical Properties of a CoCrFeNi High-Entropy Alloy	82
MATERIAL PROCESS ENGINEERING.....	93
<i>Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Ogneva E.M., Komkova D.A.</i> Assessment of the Feasibility of TRIP Steels Application in the Manufacturing of Rockfall Protection Ring-Net Barriers	93
<i>Fedorov A.A., Bredgauer Iu.O., Polonyankin D.A., Garanin D.V., Bobkov N.V., Ostash S.V.</i> Simulation and Experimental Study of Dielectric Fluid Flushing During Wire Electrical Discharge Machining	102

<i>Михеева Н.В., Тимофеев А.Н., Логачёва А.И., Басков Ф.А., Воёйко О.А.</i> К вопросу о качестве крупногабаритных сложнопрофильных деталей из алюминиевых сплавов, полученных методом прямого лазерного выращивания	115
<i>Носенко В.А., Кременецкий Л.Л., Кленцова И.В.</i> Исследование обработанной поверхности титанового сплава при глубинном шлифовании в различных условиях	127
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ	138
<i>Коновалов С.В., Дробышев В.К., Панченко И.А., Воробьёв С.В., Ю Ю.</i> Эволюция механических свойств среднеэнтропийных сплавов системы CoCrNbMnNi	138
<i>Галкин В.В., Баженов Е.О., Гаврилов Г.Н., Вашурин А.В., Черепенкин Д.В.</i> К вопросу построения зависимостей рекристаллизации металлических материалов	146
<i>Панов А.Г., Гуртовой Д.А., Шаехова И.Ф.</i> Перспективы развития изотермически закаленного чугуна с вермикулярным графитом для двигателестроения.....	156
НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ	165
<i>Теплоухов А.А., Серопян Г.М., Сычев С.А., Федосов Д.В., Семенюк Н.А., Скакун Д.В.</i> Исследование монодоменных сверхпроводящих керамических образцов YBCO с высокими критическими параметрами.....	165
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА	173
<i>Евсеев А.В., Яковлев Б.С., Карпилов Д.А., Черкаев Я.А., Петров С.А., Маркаров Е.Э.</i> Программа для производственного расчета свойств композитов с использованием диаграмм Исикавы-Парето – MIXPARETO V3.0	173
<i>Сафаров Д.Т., Касьянов С.В., Сафарова Л.Р.</i> Информационное сопровождение для прослеживания и устранения причин дефектов в потоках операций жизненного цикла автокомпонентов	181
ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ	188
<i>Григорьев М.Н., Щеглов Д.К.</i> Инновационный взгляд на перспективы комплексного использования энергетического потенциала Донбасса	188

<i>Mikheeva N.V., Timofeev A.N., Logacheva A.I., Baskov F.A., Voeyko O.A.</i> On The Quality Of Large-Scale Complex-Shaped Aluminum Alloy Components Manufactured By Direct Laser Deposition.....	115
<i>Nosenko V.A., Kremenetsky L.L., Klentsova I.V.</i> Study of the Surface Condition of a Titanium Alloy during Creep-Feed Grinding under Different Processing Conditions.....	127
MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS.....	138
<i>Kononov S.V., Drobyshev V.K., Panchenko I.A., Vorobyov S.V., Yu J.</i> Evolution of Mechanical Properties of Medium-Entropy Alloys of the Cocrnbmni System	138
<i>Galkin V.V., Bazhenov E.O., Gavrilov G.N., Vashurin A.V., Cherepenkin D.V.</i> On the Construction of Recrystallization Dependencies for Metallic Materials	146
<i>Panov A.G., Gurtovoy D.A., Shaekhova I.F.</i> Prospects for the Development of Austempered Compacted Graphite Iron for Engine Manufacturing.....	156
NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES	165
<i>Teploukhov A.A., Seropyan G.M., Sychev S.A., Fedosov D.V., Semenyuk N.A., Skakun D.V.</i> Study of Single-Domain YBCO Superconducting Ceramic Samples with High Critical Properties.....	165
PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT	173
<i>Evseev A.V., Yakovlev B.S., Karpilov D. A., Cherkaev Ya.A., Petrov S.A., Markarov E.E.</i> MIXPARETO V3.0: Software for Industrial Calculation of Composite Properties Using Ishikawa-Pareto Diagrams	173
<i>Safarov D.T., Kasyanov S.V., Safarova L.R.</i> Information Support for Tracking and Eliminating the Causes of Defects Across the Operational Flows Throughout the Automotive Component Life Cycle	181
ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET	188
<i>Grigoriev M.N., Shcheglov D.K.</i> An Innovative Approach to the Integrated Use of the Energy Potential	188



МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ СТРУКТУР КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩИХ МИНЕРАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ СЕЛЕКТИВНОСТИ

Дегодя Е.Ю.¹, Ляо Синцзинь², Медяник Н.Л.¹, Шадрунова И.В.³, Карелина Ю.А.¹, Гмызина Н.В.¹

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

² Шэньянская химическая компания Flotrea; Исследовательский центр по исследованию геологических и минеральных ресурсов Гуанси-Чжуанского автономного района, Китай

³ Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Весьма близкие свойства флюорита и кальцита определяют сложность их флотационного разделения при обогащении средне- и высококарбонатных флюоритовых руд. Химическое родство флюорита и кальцита, обусловленное наличием в узлах кристаллической решетки минералов катионов Ca^{2+} , определяет их физико-химические характеристики, ограничивает эффективность селективного флотационного разделения этих минералов и требуют новых подходов совершенствования реагентных режимов. **Цель работы.** Определение адсорбционных центров в структурах флюорита и кальцита для изыскания селективно действующих реагентов при обогащении труднообогатимых флюоритовых руд. **Используемые методы.** Результаты получены с использованием программного комплекса Materials Studio в модуле Forcite Plus, метода Charge Equilibration (QE) для расчёта зарядов на атомах кальцийсодержащих минералов, метода Эвальда для вычисления кулоновских взаимодействий. **Новизна.** Впервые в работе представлен сравнительный анализ реакционной способности поверхности флюорита и кальцита через изучение по Малликену распределения атомных зарядов и оценки влияния электронных заселенностей для связи $\text{Ca} - \text{X}$ (где X — F, O, C) при изучении свойств кристаллических решеток разделяемых минералов. **Результат.** Путем молекулярно-динамического моделирования выявлены активные хемосорбционные центры флюорита и кальцита, представленные атомами Ca с общим зарядом, соответственно равным 1,41 e – для флюорита и 1,45 e – для кальцита. Установлено, что контрастность флотационного разделения между флюоритом и кальцитом практически отсутствует и может быть достигнута подбором современных флотационных реагентов с заранее заданными свойствами, определёнными молекулярно-динамическими расчётами реакционной способности извлекаемого ценного компонента флюорита. **Практическая значимость.** Повышение селективности флотации труднообогатимых флюоритовых руд достигается применением предварительной дезактивации кальцита в начале технологического цикла при последующей флотации активированного флюорита.

Ключевые слова: кристаллическая решетка, флюорит, кальцит, заряд по Малликену, флотация, смачиваемость, моделирование

© Дегодя Е.Ю., Ляо Синцзинь, Медяник Н.Л., Шадрунова И.В., Карелина Ю.А., Гмызина Н.В., 2026

Для цитирования

Молекулярно-динамические аспекты прогнозирования свойств структур кальцийсодержащих минералов для повышения их селективности / Дегодя Е.Ю., Ляо Синцзинь, Медяник Н.Л., Шадрунова И.В., Карелина Ю.А., Гмызина Н.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 5-13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-5-13>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MOLECULAR DYNAMIC ASPECTS OF PREDICTING THE STRUCTURAL PROPERTIES OF CALCIUM-BEARING MINERALS TO INCREASE THEIR SELECTIVENESS

Degodya E.Yu.¹, Liao Xingjin², Medyanik N.L.¹, Shadrinova I.V.³, Karelina Yu.A.¹, Gmyzina N.V.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Shenyang Florrea Chemical Co., Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological and Mineral Resources Research Center, China

³ Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON), Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The similar properties of fluorite and calcite make their flotation separation difficult during the beneficiation of medium- and high-carbonate fluorite ores. The chemical affinity between fluorite and calcite, resulting from the presence of Ca^{2+} cations in the crystal lattice nodes of both minerals, determines their physical and chemical characteristics, limits the efficiency of their selective flotation separation, and necessitates new approaches to improving reagent regimes. **Objectives.** The research is aimed at identifying adsorption centers in the structures of fluorite and calcite for the development of selectively acting reagents in the beneficiation of refractory fluorite ores. **Methods Applied.** The results were obtained using the Materials Studio software package (Forcite Plus module), the Charge Equilibration (QE) method for calculating atomic charges in calcium-bearing minerals, and the Ewald method for evaluating Coulombic interactions. **Originality.** For the first time, a comparative analysis of the surface reactivity of fluorite and calcite is presented based on the study of Mulliken atomic charge distribution and the assessment of electron population effects on Ca-X bonds (where X is F, O, C) in the crystal lattices of the minerals under separation. **Result.** Molecular dynamic modeling identified active chemisorption centers in fluorite and calcite, represented by Ca atoms with total charges of 1.41 e for fluorite and 1.45 e for calcite, respectively. It was established that the contrast in flotation separation between fluorite and calcite is practically absent and can be achieved only through the selection of modern flotation reagents with predetermined properties identified by molecular dynamic calculations of the reactivity of the valuable fluorite component. **Practical Relevance.** Improved selectivity in the flotation of refractory fluorite ores can be achieved by preliminary deactivation of calcite at the beginning of the processing cycle, followed by flotation of activated fluorite.

Keywords: crystal lattice, fluorite, calcite, Mulliken charge, flotation, wettability, modeling

For citation

Degodya E.Yu., Liao Xingjin, Medyanik N.L., Shadrinova I.V., Karelina Yu.A., Gmyzina N.V. Molecular Dynamic Aspects of Predicting the Structural Properties of Calcium-Bearing Minerals to Increase Their Selectiveness. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 5-13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-5-13>

Введение

Флюорит (плавиковый шпат), согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р, входит в перечень основных видов стратегического минерального сырья, а распоряжением Правительства Российской Федерации № 939-р от 16.04.2024 он внесён в перечень дефицитных видов твёрдых полезных ископаемых. В соответствии со Стратегией развития минерально-сырьевой базы до 2050 года, утверждённой распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.07.2024 № 1838-р, флюорит относится к третьей группе полезных ископаемых по степени обеспеченности потребностей национальной экономики и необходимого экспорта запасами минерального сырья (с учётом геологических перспектив наращивания минерально-сырьевой базы), внутреннее потребление которых в существенной степени обеспечивается импортом [1].

Российская сырьевая база флюоритовых руд значительна, однако для гарантированного обеспечения

потребностей российской промышленности в данном сырье необходимо совершенствовать технологии обогащения. Анализ практики обогащения флюоритовых руд показал, что в результате истощения легкообогащаемых руд в переработку вовлекаются труднообогащаемые карбонатно-флюоритовые руды со средним и низким флюорито-карбонатным модулем [1]. Флотация является основным методом обогащения таких руд и единственным способом получения высококачественных флюоритовых концентратов, содержащих 92-97% флюорита, которые необходимы в химической, металлургической и других отраслях промышленности. Однако близкие свойства флюорита и кальцита определяют сложность их флотационного разделения и обуславливают неудовлетворительные показатели процесса флотации.

С целью совершенствования технологии обогащения средне- и высококарбонатных флюоритовых руд и получения высококачественных флюоритовых концентратов на протяжении последних лет проводились практические изыскания [2]. В работах Л.А. Киенко, Л.А.

Саматовой, О. В. Вороновой предприняты попытки флотации тонковкрапленных карбонатно-флюоритовых руд без подогрева пульпы с использованием комбинаций жирнокислотных собирателей различных по составу и строению углеводородного радикала в сочетании с фторидом натрия. Также предложено использование композиций модификаторов, состоящих из фторидов натрия и смесей на основе аммонийно-фтористых солей с лигно-сульфонатами. Ими же было изучено влияние ультразвуковой обработки пульпы на селективность флотации при обогащении карбонатно-флюоритовых руд [3-7]. Авторы изобретения [8] предложили применение модифицированного жирнокислотного собирателя с целью повышения селективности флотации и технологических показателей обогащения. В работе [9] показаны пути повышения эффективности рудоподготовки труднообогатимых флюоритовых руд, которые достигаются в получении узкокласифицированного неошламованного дробленого продукта перед измельчением и/или обогащением, а также повышении производительности дробления и сокращении затрат электроэнергии на рудоподготовку, а в работе [10] предприняты попытки интенсификации процесса флотации тонких частиц путем применения электролизной обработки жидкой фазы пульпы. Однако обзор литературных данных показал, что до настоящего времени исследования и научные изыскания по совершенствованию и разработке технологии обогащения труднообогатимых флюоритовых руд с низким флюорито-карбонатным модулем носят фрагментный характер.

Труднообогатимость флюоритового сырья, связанная прежде всего с близкими свойствами кальцийсодержащих минералов, требует исследований в рамках прогнозной оценки особенностей кристаллических решеток флюорита и кальцита. Актуальность проблематики нацелена на выявление реакционных центров в структурах данных кристаллов, способных участвовать в химических реакциях для избирательной флотации флюорита и дезактивации кальцита. Из анализа литературных данных установлено, что предпринимались попытки молекулярного моделирования для выбора селективных собирателей для флотации флюорита, однако при этом не учитывалось влияние сродства флюорита и кальцита [11]. Контрастность флотационного разделения между флюоритом и кальцитом практически отсутствует, что указывает на применение предварительной дезактивации кальцита в начале технологического цикла и последующую флотацию активированного флюорита. Изыскание реагента-собирателя, содержащего в своем составе молекулы, селективно хемoadсорбирующиеся на поверхности флюорита, требует применения принципа «структура – свойство/активность – свойство», что позволяет квалифицированно выбирать флотационные реагенты с заранее заданными свойствами, определёнными в зависимости от квантово-химических, физико-химических и структурных параметров реакционной способности извлекаемого ценного компонента [12, 13].

Теория, материалы и методы исследования

Необходимость углубленного изучения свойств кристаллических решеток флюорита и кальцита обусловлена близостью флотационных свойств данных минералов и трудностью их разделения в процессе флотации. Для исследований кристаллических структур флюорита и кальцита применен метод молекулярно-динамического моделирования, позволяющий описать электронные структуры кристаллов и занятость молекулярных орбиталей.

Флюорит – кальцийсодержащий минерал с химической формулой CaF_2 , относится к кубической сингонии (рис. 1). В его структуре восемь атомов фтора образуют кубическую упаковку вокруг атома кальция, формируя кубическую плотную упаковку. Атом Ca^{2+} связан с ионами F^- в восьмикоординационной структуре, тогда как каждый ион F^- образует тетраэдрическую четырехкоординационную связь с соседними четырьмя атомами Ca [14].

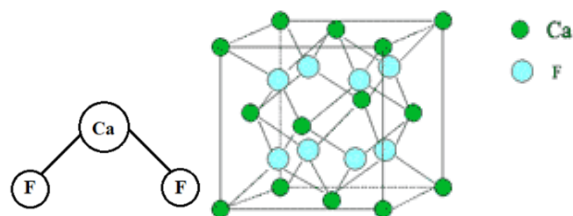


Рис. 1. Кристаллическая решетка флюорита
Fig. 1. Crystal lattice of fluorite

Кальцит представляет собой карбонатный минерал с химической формулой CaCO_3 , относящийся к ромбической сингонии (рис. 2). В его молекулярной формуле присутствуют ионы Ca^{2+} и CO_3^{2-} . Как видно из рис. 2, атомы в кристаллической решётке кальцита подчиняются принципу плотнейшей упаковки: атомы Ca занимают междуузлия решётки, а ионы CO_3^{2-} образуют гексагональную плотную упаковку вокруг них. Из анализа элементарной ячейки кальцита видно, что атом Ca формирует шестикоординационную структуру с атомами O из окружающих ионов CO_3^{2-} [14].

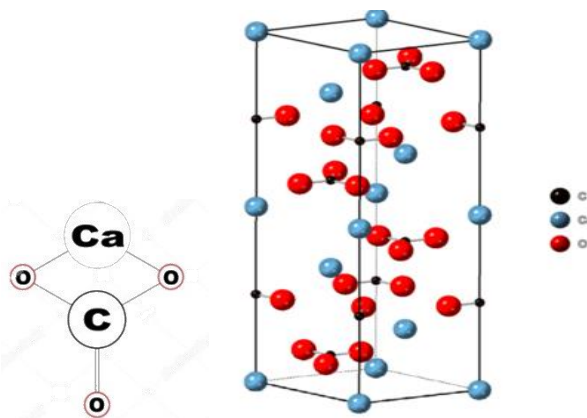


Рис. 2. Кристаллическая решетка кальцита
Fig. 2. Crystal lattice of calcite

Согласно литературным данным, плоскость спайности {104} кальцита является наиболее стабильной, поэтому для исследования была выбрана именно эта плоскость. Для флюорита наиболее стабильной считается плоскость спайности {111}, следовательно, объектом исследования стала плоскость {111}. Поверхностные модели минералов, построенные на основе этих стабильных плоскостей, представлены на рис. 3. Обе модели созданы из оптимизированных кристаллических структур минералов, при этом в качестве объекта исследования использовались крупные суперъядейки.

Полученные результаты и их обсуждение

Для описания группировок энергетических уровней электронов в кристаллах определены оптимизированные зонные структуры и плотности состояний, которые представлены на рис. 4. Расчётная ширина запрещённой зоны для кальцита составляет 4,966 эВ, что характерно для полупроводника. У флюорита ширина зоны выше и составляет 7,049 эВ, что затрудняет электронные переходы. В обоих минералах металлические ионы представлены атомами Ca, взаимодействия которого с окружающими атомами отражены на графиках плотности состояний (см. рис. 4).

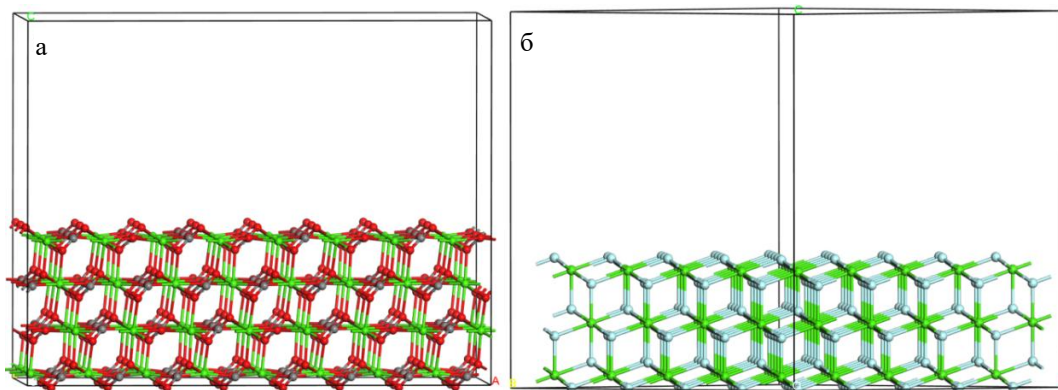


Рис. 3. Суперъядейки минеральной поверхности: а – кальцит; б – флюорит
 Fig. 3. Supercells of mineral surfaces: a is calcite; б is fluorite

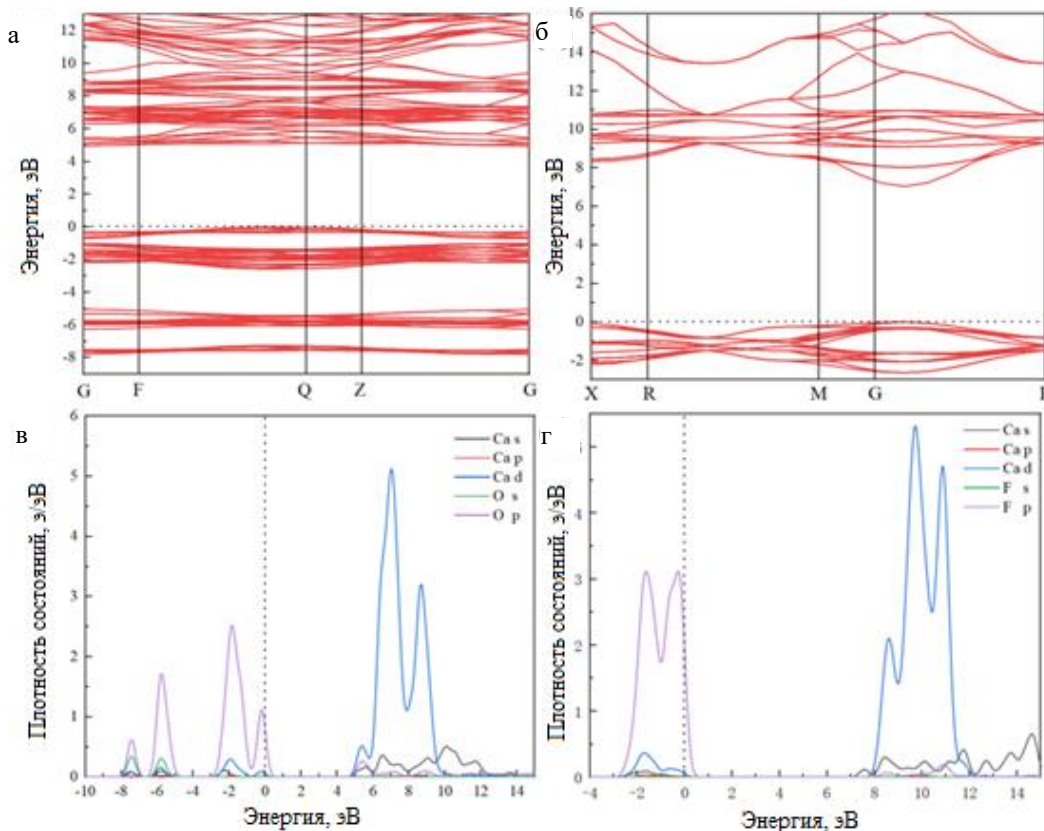


Рис. 4. Карта зон минеральной ячейки и плотности состояний: а, в – кальцит; б, г – флюорит
 Fig. 4. Mineral cell zone and state density map: а, в are calcite; б, г are fluorite

Из анализа **рис. 4** видно, что вблизи уровня Ферми доминируют p -орбитали неметаллов (O и F). На графике плотности состояний Ca — O для кальцита (**рис. 4, в**) основные взаимодействия сосредоточены в диапазоне от -4 до 1 эВ. Глубокие энергетические уровни преимущественно соответствуют $3d$ -орбиталям Ca. Поскольку эти уровни расположены глубоко, их активность относительно низка. Кроме того, в интервале от 1 до 4 эВ наблюдается явление расщепления энергетических уровней. В энергетическом диапазоне от -3 до 1 эВ преимущественно происходит взаимодействие $2p$ -орбиталей O с $3s$ - и $3d$ -орбиталями Ca. В глубоком энергетическом диапазоне от -7 до -5 эВ для связи Ca — O в кальците в основном наблюдается взаимодействие $2s$ -орбиталей O с $3d$ -орбиталями Ca. В высокоэнергетическом диапазоне от 5 до 10 эВ доминирует взаимодействие $3d$ -орбиталей Ca с $2p$ -орбиталями O, при этом пики $3d$ -орбиталей Ca имеют большую амплитуду, что указывает на высокую концентрацию электронов на этих орбиталях.

Во флюорите основные взаимодействия связаны со связью Ca — F (**рис. 4, г**). Вблизи уровня Ферми преимущественно наблюдается взаимодействие $3s$ - и $3d$ -орбиталей атомов Ca с $2p$ -орбиталями F. В интервале от 1 до 7 эВ присутствует явление расщепления уровней, причём по сравнению с кальцитом это расщепление выражено значительно сильнее. В глубоком энергетическом диапазоне от 8 до 12 эВ происходит гибридизация $3d$ -орбиталей Ca, p -орбиталей F и $3s$ -орбиталей Ca. На глубоких уровнях преимущественно присутствуют $3d$ -орбитали Ca, причём они, аналогично кальциту, демонстрируют высокие пики.

Следовательно, в обоих кристаллах основные взаимодействия связаны с $3d$ - и $3s$ -орбиталями Ca и неметаллическими атомами.

Проведен анализ распределения зарядов по Малликену для поверхностных атомов кальцита и флюорита. Из **таблицы** видно, что на d -орбиталях атомов Ca на поверхности кальцита и флюорита присутствуют электроны. Общий заряд атомов Ca на поверхности кальцита составляет $1,45e$, на поверхности флюорита — $1,41e$. Поскольку заряд атомов Ca на поверхности кальцита больше, чем на поверхности флюорита, считается, что поверхностные атомы Ca в кальците обладают большим положительным зарядом, что повышает вероятность их взаимодействия с молекулами реагентов. Атомы O на поверхности кальцита имеют отрицательный заряд, равный $-0,75e$, который преимущественно локализован на p -орбиталях. Атомы F на поверхности флюорита имеют заряд, равный $-0,71e$, также сосредоточенный на p -орбиталях. Значения отрицательного заряда O на флюорите несколько ниже, чем на кальците, что указывает на его меньшую реакционную способность.

В элементарной ячейке кальцита электронная заселенность по Малликену для связей C — O составляет $-0,83$ и $-0,84$, для связи O — O $-0,21$, а для связи Ca — O $-0,11$. Среди них наибольшая заселенность

наблюдается для связей C — O, что указывает на сильное ковалентное взаимодействие. Ковалентный характер связи Ca — O отсутствует, а отрицательное значение заселенности для связи O — O, равное $-0,21$ означает, что эта связь соответствует антисвязывающей орбитали и характеризуется слабым взаимодействием.

Таблица. Заряд по Малликену поверхностных атомов минералов

Table. Mulliken charges of surface atoms in the minerals

Тип	Атом	s	p	d	Итого	Заряд/ e
Кальцит	Ca	2,12	6,00	0,42	8,54	1,45
	O	1,81	4,94	0,00	6,75	-0,75
	C	0,85	2,38	0,00	3,23	0,77
Флюорит	Ca	2,13	6,00	0,46	8,59	1,41
	F	1,91	5,74	0,00	7,71	-0,71

Во флюорите электронная заселенность по Малликену для связи Ca — F составляет $-0,08$, а для связи F — F $-0,03$. Из чего следует, что характер связи Ca — F слабый, причём значительно слабее по сравнению со связью Ca — O в кальците. Кроме того, отрицательные значения заселенностей для связей F — F и O — O ($-0,03$ и $-0,21$ соответственно) подтверждают их антисвязывающую природу. Таким образом, среди изученных минералов ковалентный характер связи наблюдается для связи O — O ($-0,21$) в кальците, за которой следует ионная связь Ca — O, а в молекуле флюорита более слабая связь F — F ($-0,03$) предшествует ионной связи Ca — F.

Для оценки смачиваемости поверхности исследуемых минералов методом молекулярно-динамического моделирования были получены профили относительной концентрации молекул воды вдоль вертикального направления к поверхностям кальцита {104} и флюорита {111}. Эти данные характеризуют адсорбционные особенности воды на поверхностях минералов, а изменение гидрофильности поверхности оценивается через относительную концентрацию молекул воды в гидратной плёнке. Молекулярно-динамическое моделирование структур кальцийсодержащих минералов проводилось с применением Forcite Plus программного комплекса Materials Studio с использованием: силового поля Universal, метода QEQ для расчёта зарядов, метода Эвальда для вычисления кулоновских взаимодействий. Полученные результаты были проанализированы с помощью функции радиального распределения (RDF) для определения структуры адсорбции воды на поверхности минералов.

Для количественного сравнения распределения молекул воды на поверхностях кальцита {104} и флюорита {111} были рассчитаны зависимости относительной концентрации молекул воды от расстояния вдоль вертикальной оси (**рис. 5**).

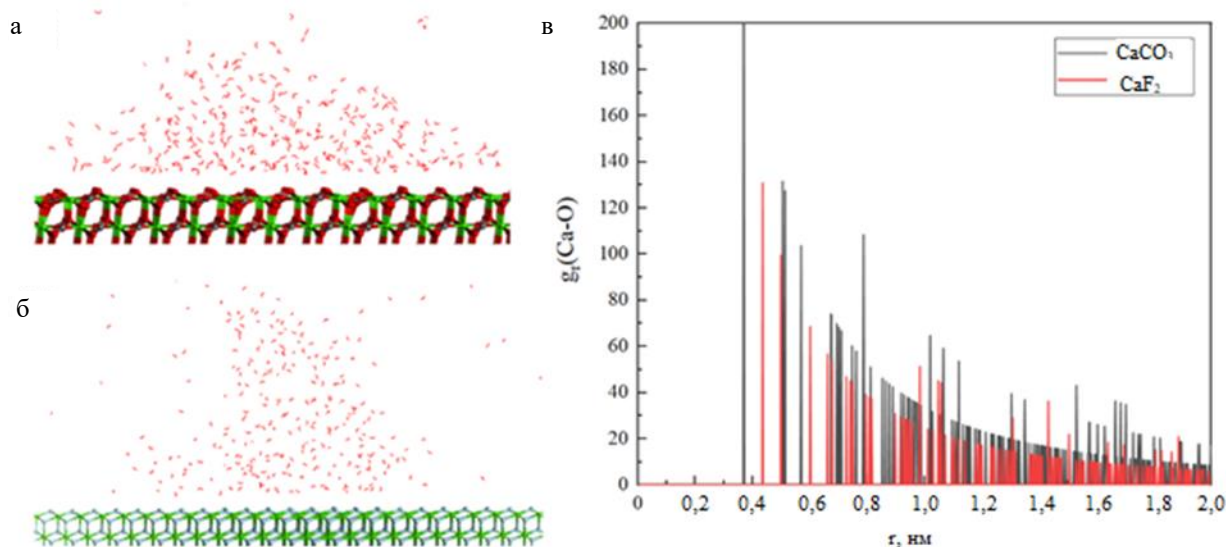


Рис. 5. Вычислительные модели воды с поверхностью кальцита (а) и поверхностью флюорита (б), радиальная функция распределения атома О в воде с поверхностями кальцита и флюорита на расстоянии (в)
 Fig. 5. Computational models of water with the calcite surface (a) and the fluorite surface (б); radial distribution function of the oxygen atom in water with calcite and fluorite surfaces at distance (в)

Результаты исследований (рис. 5, а, б) показывают, что на обеих поверхностях чётко наблюдаются многослойные структуры гидратной оболочки воды, подтверждающие формирование выраженных гидратных плёнок. Согласно результатам на рис. 5, в, определено, что первый пик атомов кислорода воды для кальцита расположен на расстоянии 0,38 нм от поверхности, тогда как для флюорита – на расстоянии 0,43 нм. Кроме того, молекулы воды равномерно распределены за пределами ~0,4 нм от поверхности минералов, что указывает на отсутствие адсорбции. Эти результаты свидетельствуют, что расстояние между атомами кислорода воды и поверхностью минералов практически одинаково, то есть кальцит и флюорит обладают схожей смачиваемостью, что не способствует флотационному разделению этих минералов.

Заключение

Исследованы кристаллические структуры кальцийсодержащих минералов путем молекулярно-динамического моделирования и доказано химическое сродство флюорита и кальцита, обуславливающее отсутствие их селективного флотационного разделения. Выявлено наличие хемосорбционных центров у флюорита и кальцита – катионы Ca^{2+} , способные активно взаимодействовать с реакционными центрами молекул флотационных реагентов. В частности, из анализа диаграмм плотности состояний поверхностей двух минералов видно, что на поверхностях кальцита и флюорита основное взаимодействие возможно между атомами Ca и неметаллами X (где X – F, O, S). На поверхности кальцита вблизи уровня Ферми наблюдается гибридизация *p*-орбиталей O с *3d*-орбиталями Ca, пересекающая уровень Ферми. В

энергетическом диапазоне от 4 до 5 эВ доминирует антисвязывающее взаимодействие *3d*-орбиталей Ca и *2p*-орбиталей O.

При изучении плотности состояний структуры кальцита чётко видно, что локализация плотности состояний для связи Ca — O на поверхности значительно возрастает, следовательно, реакционная способность поверхности увеличивается, что облегчает взаимодействие с молекулами реагентов. На поверхности флюорита взаимодействие атомов Ca с F преимущественно происходит в диапазоне -3–1 эВ, где наблюдается гибридизация *3d*-орбиталей Ca с *p*-орбиталями F. Однако это взаимодействие существенно слабее. Кроме того, концентрация электронов вблизи уровня Ферми у флюорита значительно ниже, чем у кальцита. В диапазоне от -3 до 1 эВ флюорит демонстрирует положительные значения, поэтому реакционная способность кальция флюорита заметно уступает Ca в кальците.

Анализ заселенностей связей по Малликену показал, что в кальците значительная электронная заселенность наблюдается для связи C — O, далее для связи Ca — O, что указывает на сильное ковалентное взаимодействие между ними. Во флюорите характер связи Ca — F слабый, причём значительно слабее по сравнению со связью Ca — O в кальците.

Моделированием взаимодействия молекул воды с поверхностью кальцийсодержащих минералов для оценки смачиваемости поверхности было установлено, что кальцит и флюорит обладают схожей смачиваемостью, что затрудняет их флотационное разделение.

Создать контрастность разделения кальцийсодержащих минералов при наличии однотипных актив-

ных центров взаимодействия с молекулами реагентов и практически одинаковой смачивостью поверхности кальцита и флюорита не представляется возможным. Для создания условий избирательной флотации минеральных частиц флюорита от кальцита необходимо последний первоначально убрать из зеркала флотации.

Таким образом, выявленное химическое средство флюорита и кальцита, обусловленное наличием в узлах кристаллической решетки минералов катионов Ca^{2+} , определяет их физико-химические характеристики поверхности разделяемых минеральных частиц. Молекулярно-динамическими расчётами доказано, что избирательное флотационное разделение между флюоритом и кальцитом практически отсутствует и может быть достигнуто путем предварительной дезактивации кальцита в начале технологического цикла при последующей флотации активированного флюорита подбором современных флотационных реагентов с заранее заданными свойствами, определёнными реакционной способностью извлекаемого ценного компонента флюорита.

Список источников

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году» / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. М., 2023. 640 с.
2. Дегодя Е.Ю., Шадрунова И.В., Медяник Н.Л. Современное состояние и тенденции в развитии технологий обогащения флюоритовых руд // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2025), г. Екатеринбург, 29 сентября – 4 октября 2025 г. : материалы международной конференции. Екатеринбург : Изд-во «Форт-Диалог Исеть», 2025. С. 74-76.
3. Применение смесей собирателей при флотации тонковкрапленных карбонатно-флюоритовых руд / Л. А. Киенко, Л. А. Саматова, О. В. Воронова, Л. Н. Плюснина // Обогащение руд. 2009. № 3. С. 25-28. EDN KWAEMB.
4. К проблеме снижения температуры флотации при обогащении карбонатно-флюоритовых руд / Л. А. Киенко, Л. А. Саматова, В. Воронова, С. А. Кондратьев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2010. № 3. С. 97-104. EDN MSNTEN.
5. Киенко Л.А., Саматова Л.А., Воронова О.В. К проблеме повышения селективности флотации при обогащении карбонатно-флюоритовых руд месторождений Приморского края // Горный журнал. 2013. № 12. С. 63-67. EDN RUCOWJ.
6. Киенко Л.А., Воронова О.В. Использование высокоселективных модификаторов при флотации карбонатно-флюоритовых руд Приморья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S30. С. 213-219. EDN UQCPER.
7. Киенко Л.А., Воронова О.В., Шагина Ж.А. Повышение эффективности флотации флюорита на основе применения ультразвуковой обработки пульпы // Гор-

ный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № S21. С. 233-241. EDN WRKMBR.

8. Патент № 2826138 С1 Российская Федерация, МПК В03D 1/02 (2006/01). Способ флотации карбонатно-флюоритовых руд : заявл. 26.12.2023 : опубл. 04.09.2024 / А. И. Сосипаторов, А. Н. Слепнев, А. Г. Перетолчин, А. В. Фефелов; патентообладатель ООО «Эгитинский ГОК Плюс».
9. Патент № 2840149 С1 Российская Федерация, МПК В02С 23/00, В02С 1/02. Способ дробления флюоритовых руд : заявл. 04.12.2024 : опубл. 19.05.2025 / Е. Ю. Дегодя, С. Е. Гавришев, И. А. Пыталев, Н. В. Гмызина; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова».
10. Киенко Л.А., Воронова О.В. Исследования перспектив применения электролизной обработки жидкой фазы пульпы с целью интенсификации процесса флотации тонких частиц // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья : материалы XXVII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XX Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 года. Екатеринбург: ИП Русских А.В., 2022. С. 186-190. EDN MKKOIB.
11. Соложенкин П.М., Дегодя Е.Ю., Шавакулева О.П. Модифицированные жирные кислоты, их молекулярное моделирование для прогноза флотации руд шельночзёмельных элементов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 3(51). С. 16-22. EDN ULEZEF.
12. Медяник Н.Л. Реализация принципа «структурасвойство/активность-свойство для направленного выбора реагентов-собирателей // Новые технологии обогащения и комплексной переработки труднообогатимого природного и техногенного минерального сырья: матер. междунар. совещания «Плаксинские чтения». Екатеринбург: Изд-во «Форт-Диалог-Исеть», 2021. С. 213–217.
13. Медяник Н.Л., Чантурия В.А., Шадрунова И.В. Квантово-химический метод выбора реагента-собирателя и его использование в процессе флотационного извлечения катионов цинка и меди (II) из техногенных вод горных предприятий // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 1. С. 154-164.
14. Минералогическая энциклопедия: пер. с англ. / под ред. К. Фрея. Л.: Недра, 1985. 512 с.

References

1. State Report “On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2022. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation. Moscow, 2023. 640 p. (In Russ.).
2. Degodya E.Yu., Shadrunova I.V., Medyanik N.L. Current state and trends in the development of fluorite ore beneficiation technologies. *Innovatsionnye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki prirodnogo i netraditsionnogo mineralnogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2025). Materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [Innovative pro-

- cesses of integrated and deep processing of natural and non-traditional mineral raw materials (Plaksinsky Readings – 2025). Proceedings of the international conference]. Yekaterinburg, Fort-Dialog Iset Publishing House, 2025, pp. 74-76. (In Russ.).
3. Kienko L.A., Samatova L.A., Voronova O.V., Plyusnina L.N. Application of collector mixtures in the flotation of fine-grained carbonate-fluorite ores. *Obogashchenie Rud* [Ore Beneficiation]. 2009;(3):25-28. (In Russ.) EDN KWAEMB.
 4. Kienko L.A., Samatova L.A., Voronova V., Kondratev S.A. On reducing flotation temperature in the beneficiation of carbonate-fluorite ores. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Science]. 2010;(3):97-104. (In Russ.) EDN MSNTEN.
 5. Kienko L.A., Samatova L.A., Voronova O.V. Improving flotation selectivity in beneficiation of carbonate-fluorite ores from Primorsky Krai deposits. *Gorniy Zhurnal* [Mining Journal], 2013;(12):63-67. (In Russ.) EDN RUCOWJ.
 6. Kienko L.A., Voronova O.V. Application of highly selective modifiers in the flotation of carbonate-fluorite ores of Primorye. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2015;(S30):213-219. (In Russ.) EDN UQCPER.
 7. Kienko L.A., Voronova O.V., Shagina Zh.A. Improving fluorite flotation efficiency by applying ultrasonic pulp treatment]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2016;(S21):233-241. (In Russ.) EDN WRKMBR.
 8. Sosipatorov A.I., Slepnev A.N., Peretolchin A.G., Fefelov A.V. *Sposob flotatsii karbonatno-flyuoritovykh rud* [Method for flotation of carbonate-fluorite ores]. Patent RU, no. 2826138 C1, 2024.
 9. Degodya E.Yu., Gavrishev S.E., Pytalev I.A., Gmyzina N.V. *Sposob drobleniya flyuoritovykh rud* [Method for crushing fluorite ores]. Patent RU, no. 2840149 C1, 2025.
 10. Kienko L.A., Voronova O.V. Prospects for electrolytic treatment of the liquid phase of pulp to intensify fine particle flotation. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennoogo syrya. Materialy XXVII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, provodimoy v ramkakh XX Uralskoy gornopromyshlennoy dekady* [Scientific foundations and practice of ore and technogenic raw material processing. Proceedings of the XXVII International Scientific and Technical Conference dedicated to the XX Ural mining-industrial decade]. Yekaterinburg, 2022, pp. 186-190. (In Russ.)
 11. Solozhenkin P.M., Degodya E.Yu., Shavakuleva O.P. Modified fatty acids and their molecular modeling for predicting flotation of alkaline-earth element ores. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015;(3(51)):16-22. (In Russ.) EDN ULEZEF.
 12. Medyanik N.L. Implementation of the “structure-property/activity-property” principle for directed selection of collector reagents. *Novye tekhnologii obogashcheniya i kompleksnoy pererabotki trudnoobogatimogo prirodnogo i tekhnogennoogo mineralnogo syrya. Materialy mezhdunarodnogo soveshchaniya «Plaksinskie chteniya»* [New technologies for beneficiation and complex processing of refractory natural and technogenic mineral raw materials. Proceedings of the International Meeting “Plaksinsky Readings”]. Yekaterinburg, Fort-Dialog-Iset Publishing House, 2021, pp. 213-217. (In Russ.)
 13. Medyanik N.L., Chanturiya V.A., Shadrunova I.V. Quantum-chemical method for selecting a collector reagent and its application in flotation recovery of zinc and copper (II) cations from mining wastewaters. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Science]. 2012;(1):154-164. (In Russ.)
 14. Frey K. *Mineralogicheskaya entsiklopediya* [Encyclopedia of Mineralogy]. Translated from English. Leningrad: Nedra, 1985, 512 p. (In Russ.)

Поступила 14.01.2026; принята к публикации 21.02.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 14/01/2026; revised 21/02/2026; published 30/06/2026

Дегодя Елена Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, кандидат технических наук, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: magur@mail.ru. ORCID 0000-0002-4220-7371

Ляо Синцинь – доктор философии, старший инженер, Шэньянская химическая компания Флогтеа; Исследовательский центр по исследованию геологических и минеральных ресурсов Гуанси-Чжуанского автономного района, Китай.
E-mail: xingjinliao@126.com. ORCID 0009-0009-5616-1122

Медяник Надежда Леонидовна – доктор технических наук, профессор кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: chem@magtu.ru. ORCID 0000-0003-0973-8899

Шадрунова Ирина Владимировна – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом горной экологии, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия.
Email: shadrunova_@mail.ru. ORCID 0000-0003-3520-2705

Карелина Юлия Александровна – кандидат экономических наук, доцент кафедры химии, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: medyanik@inbox.ru. ORCID 0000-0001-8027-3567

Гмызина Наталья Викторовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, кандидат технических наук, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: gmnat1307@mail.ru. ORCID 0000-0002-7959-45-04

Elena Yu. Degodya – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geology, Mine Surveying and Mineral Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: magur@mail.ru. ORCID 0000-0002-4220-7371

Liao Xingjin – PhD (Eng.), Senior Engineer at Shenyang Florrea Chemical Co., Ltd. and the Guangxi Zhuang Autonomous Region Geological and Mineral Resources Research Center, China.
Email: xingjinliao@126.com. ORCID 0009-0009-5616-1122

Nadezhda L. Medyanik – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Chemistry, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: chem@magtu.ru. ORCID 0000-0003-0973-8899

Irina V. Shadrunova – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Mountain Ecology, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON, Moscow, Russia).
Email: shadrunova_@mail.ru. ORCID 0000-0003-3520-2705

Yulia A. Karelina – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Chemistry, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: medyanik@inbox.ru. ORCID 0000-0001-8027-3567

Natalia V. Gmyzina – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geology, Mine Surveying and Mineral Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: gmnat1307@mail.ru. ORCID 0000-0002-7959-45-04

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.822.22
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-14-22



ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САМОНАГРЕВАЮЩИХСЯ УГЛЕПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ

Гузеев О.А.¹, Понамарева Е.А.¹, Пыталев И.А.²

¹Институт физики горных процессов, Донецк, ДНР, Россия

²Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Настоящая работа посвящена выявлению и описанию особенностей комплексного использования самонагревающихся углепородных отвалов. В ходе выполнения работы применялись методы научного анализа и обобщения, а также сценарного проектирования. Самонагревающиеся углепородные отвалы представлены как многофункциональные техногенные георесурсы, отличающиеся триединством энергетического, вещественного и пространственного ресурсов. Установлены отличительные признаки таких отвалов, основными среди которых являются тепловое состояние, литолого-минералогический состав и расположение отвалов относительно геодинамически активной зоны. Показано, что в ходе освоения энергетического ресурса самонагревающийся углепородный отвал может использоваться в качестве генератора и аккумулятора тепла, а в процессах освоения вещественного или пространственного ресурсов – в качестве источника окисленных пород и элемента рельефа аккумулятивной формы соответственно. В качестве геотехнологической особенности комплексного использования самонагревающихся углепородных отвалов выделено первоочередное освоение их энергетических ресурсов, включающее утилизацию невозобновляемого тепла, сгенерированного отвалами, и возобновляемого тепла, запасенного породами приповерхностной зоны отвалов за счет поглощения солнечной радиации. В качестве биотехнологической особенности комплексного использования самонагревающихся отвальных массивов выделено создание благоприятных условий для длительной теплогенерирующей жизнедеятельности отвальной популяции микроорганизмов, что соответствует принципам биоэтики. Выявленные особенности необходимо учитывать в ходе создания и реализации сценариев комплексного использования самонагревающихся углепородных отвалов Донбасса.

Ключевые слова: углепородные отвалы, самонагревание, комплексное использование, техногенные георесурсы, популяция микроорганизмов, извлечение тепла, окисленные породы, элемент рельефа

© Гузеев О.А., Понамарева Е.А., Пыталев И.А., 2026

Для цитирования

Гузеев О.А., Понамарева Е.А., Пыталев И.А. Особенности комплексного использования самонагревающихся углепородных отвалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 14-22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-14-22>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

FEATURES OF THE INTEGRATED UTILIZATION OF SELF-HEATING COAL-MINE WASTE DUMPS

Guzeev O.A.¹, Ponamaryova E.A.¹, Pytalev I.A.²

¹Institute of Physics of Mining Processes, Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. This work is devoted to identifying and describing the features of the integrated utilization of self-heating coal-mine waste dumps. The research employed methods of scientific analysis and generalization, as well as scenario-based design. Self-heating coal-mine waste dumps are presented as multifunctional technogenic geo-resources characterized by the trinity of energy, material, and spatial resources. Distinctive features of such dumps have been identified, the main ones being their thermal state, lithological and mineralogical composition, and the location of the dumps relative to geodynamically active zones. It is demonstrated that during the exploitation of the energy resource, a self-heating coal-mine waste dump can be used both as a heat generator and a heat accumulator, while in the processes of exploiting material or spatial resources, it can serve respectively as a source of oxidized rocks and as an accumulative landform element. As a geotechnological feature of the integrated utilization of self-heating coal-mine waste dumps, the priority exploitation of their energy resources has been identified, including the utilization of non-renewable heat generated by the dumps and renewable heat accumulated by the near-surface rocks due to solar radiation absorption. As a biotechnological feature of the integrated utilization of self-heating waste masses, the creation of favorable conditions for the long-term heat-generating activity of the waste dump microbial population has been highlighted, which corresponds to the principles of bioethics. The identified features should be taken into account during the development and implementation of scenarios for the integrated utilization of self-heating coal-mine waste dumps in the Donbas.

Keywords: coal-mine waste dumps, self-heating, integrated utilization, technogenic geo-resources, microbial population, heat extraction, oxidized rocks, landform element.

For citation

Guzeev O.A., Ponamaryova E.A., Pytalev I.A. Features of the Integrated Utilization of Self-Heating Coal-Mine Waste Dumps. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 14-22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-14-22>

Введение

В результате многолетнего освоения угольных месторождений на территории Донбасса сформировано множество углепородных отвалов. Общий объем отходов угледобычи, накопленных в таких техногенных образованиях, превышает сотни миллионов кубических метров. Содержащиеся в отвалах (терриконах) породы часто характеризуются как углистые, пиритсодержащие. Средние по Донецкому бассейну потери угля в отвальной массе составляют около 1,5% объема его подземной добычи, а содержание горючих веществ в складированных отходах может превышать 15% [1].

Значительная часть углепородных отвалов данного региона проявляет склонность к самонагреванию и последующему самовозгоранию, что обусловлено совместным действием целого комплекса внутренних и внешних факторов [1, 2]. Одним из доминант-факторов, запускающих процесс отвального самонагревания, является жизнедеятельность бактерий. Сероокисляющие и железooksисляющие микроорганизмы разлагают в отвальной массе пирит. В процессе биохимического выщелачивания 1 моля пирита выделяется от 998 до 1350 кДж теплоты [3]. Нерассеянное тепло от разложения пирита инициирует про-

цесс самовозгорания углистых пород и угля, находящихся в отвалах.

Горение углепородных отвалов – процесс, сопровождающийся интенсивным теплохимическим загрязнением окружающей среды [4–6]. Наибольшее негативное воздействие отвальное горение оказывает на состояние атмосферного воздуха. Горящий террикон способен ежегодно выделять в атмосферу десятки тонн различных газообразных веществ. Такой отвал является источником загрязнения воздуха оксидом углерода, диоксидом серы, сероводородом, оксидом азота и метаном. В составе газовых выделений террикона могут присутствовать соединения кадмия, фосфора, мышьяка и других токсичных элементов [7].

Самонагревающиеся скопления отходов угледобычи относят к категории объектов повышенной экологической опасности. Для ликвидации очагов отвального самовозгорания обычно выполняют нагнетание воды или ингибиторов в тело террикона, а также осуществляют нанесение на его поверхность изолирующего материала. Однако результативность указанных мероприятий не всегда высока. Отвальные эндогенные очаги могут возникать и после выполнения соответствующих противопожарных мероприя-

тий. Например, подача хладагента для ликвидации очагов может вызывать перенос тепла в нижележащие слои отвальной породы, способствуя их ускоренному прогреву, тем самым повышая риск возникновения очередного пожара [1, 8].

Между тем, являясь мощными источниками загрязнения экологии, самонагревающиеся углепородные отвалы часто представляют собой длительно и устойчиво функционирующие генераторы и аккумуляторы тепловой энергии. Тепловая мощность самонагревающегося углепородного отвала может достигать $(5-8) \cdot 10^{10}$ ккал на 100 тыс. м³ отвальной массы [9]. В ходе жизненного цикла такой отвал может выступать сначала низкопотенциальным источником теплоты и характеризоваться как теплый, а затем существенно наращивать реализацию своего теплоэнергетического потенциала, становясь горячим, предельно нагретым и горящим.

Постановка задачи

Для снижения негативного воздействия углепородных отвалов Донбасса на окружающую среду необходима широкомасштабная утилизация складированных твердых отходов угледобычи. Одним из перспективных направлений такой утилизации является извлечение тепла самонагревающихся углепородных отвалов и последующее использование таких техногенных образований в качестве источников окисленных пород или элементов рельефа, обладающих аккумулятивной формой. Достичь успешной реализации данного направления возможно путем создания и воплощения соответствующих сценариев комплексного использования самонагревающихся углепородных отвалов.

Задачей настоящей работы является выявление и описание особенностей комплексного использования самонагревающихся углепородных отвалов применительно к созданию и реализации данных сценариев.

Материалы и методы исследования

В качестве основного материала для выполнения поставленной задачи использовался широкий массив научно-технической информации, отражающей современные представления об углепородных отвалах, склонных к самонагреванию и последующему самовозгоранию, а также тенденции и опыт использования накопленных в Донбассе отходов угледобычи. Поиск соответствующих публикаций произведен с использованием информационно-аналитических порталов Elibrary, Cyberleninka, Google Scholar, Elsevier и международных библиографических баз данных Web of Science и Scopus.

В ходе выполнения настоящей работы произведен анализ и обобщение научных статей и докладов, посвященных проблемам безопасности функционирования самонагревающихся углепородных отвалов, утилизации накопленных твердых отходов угледобычи, снижению негативного воздействия отвальных массивов на окружающую среду, исследованию эво-

люционирующих отвальных экосистем, архитектурно-градостроительному освоению терриконов. В процессе исследования применялся метод сценарного проектирования, который часто используется при разработке систем управления территориями, а также для выбора стратегий развития структурных объектов и инженерных сооружений, отличающихся сложностью их возведения и многофункциональностью.

Анализ и обобщение научной литературы позволили установить, что углепородные отвалы, склонные к самонагреванию и последующему самовозгоранию, описываются преимущественно с позиций дуализма характеристик таких техногенных образований. В экологическом аспекте скопления твердых отходов угледобычи характеризуются как объекты повышенной опасности и малоизученные экосистемы, а в геолого-экономическом аспекте представлены как техногенные георесурсы, освоение которых во многом зависит от уровня развития техники и технологий [10].

Вместе с тем в литературных источниках прослеживается единение экологических и геолого-экономических подходов к утилизации складированных отходов угледобычи. Наиболее четко данное единение отражено в научных статьях, так или иначе связанных с проблемами достижения устойчивого развития старопромышленных районов Донбасса, в основе которого лежит принцип сохранения баланса между освоением техногенных ресурсов, накопленных угольными предприятиями, и охраной окружающей среды [11].

В частности, в данных работах отмечено, что с ростом объема отвальных пород, прошедших биохимическое окисление, уменьшается теплоэнергетический потенциал углепородных отвалов, и одновременно возрастают валовые выбросы тепла и газообразных веществ в атмосферу такими техногенными образованиями. Иными словами, подчеркивается, что безвозвратная потеря (истощение) сосредоточенных в самонагревающихся отвалах энергетических запасов сопровождается длительным нанесением заметного ущерба окружающей среде [1].

Охват доступных источников научно-технической информации позволил установить, что большинство научных работ, посвященных утилизации накопленных в отвалах отходов угледобычи, не затрагивают проблемы освоения их теплоэнергетического потенциала. Указанные работы часто направлены на изучение углепородных отвалов как источников минерального сырья и техногенных образований, ликвидация которых позволит высвободить значительные земельные участки [12, 13].

Между тем использование отвальных пород в качестве техногенного минерального сырья весьма ограничено достаточно высоким и неравномерным содержанием в них органических горючих веществ, а малозатратную ликвидацию отвалов практически невозможно осуществить без эффективной утилизации соответствующих накопленных органоминеральных отходов.

Учитывая сказанное, применительно к разработке сценариев комплексного использования самонагревающихся углепородных отвалов представляется целесообразным различать накопленный в скоплениях отходов угледобычи георесурсный потенциал и рентабельно извлекаемые из них запасы. Георесурсный потенциал самонагревающегося углепородного отвала определим как степень его ресурсной мощности (скрытой ценности). Запасы, которые в настоящее время рентабельно извлекать из такого отвала, предлагается рассматривать как балансовые запасы, претерпевающие качественные и количественные изменения в ходе его жизненного цикла.

Активизация георесурсного потенциала углепородных отвалов дает возможность трансформировать его в эффективно осваиваемые запасы. Начальным этапом активизации георесурсного потенциала является формирование геолого-экологических предпосылок использования самонагревающихся массивов отвальных пород. В рамках создания геолого-экологических предпосылок наиболее «энергонасыщенные» отвальные массивы могут изучаться и систематизироваться как малые техногенные месторождения [14, 15] самонагревающихся осадочных горных пород [1].

Чтобы более корректно выполнить поиск наиболее «энергонасыщенных» отвальных массивов, необходимо установить отличительные признаки самонагревающихся скоплений твердых отходов угледобычи. Формирование первичной группы отличительных признаков, выполненное посредством использования известных систематизаций и классификаций

углепородных отвалов [16–19] и отходов угледобычи (ГОСТ Р 57011-2016 «Отходы добычи и обогащения углей. Классификация»), позволяет дать краткую характеристику типичному самонагревающемуся углепородному отвалу Донбасса. Указанная характеристика приведена в **таблице**.

Следует отметить, что среди представленных в краткой характеристике отличительных признаков самонагревающегося углепородного отвала, его литолого-минералогический состав и расположение относительно геодинамически активной зоны (ГДАЗ). В зависимости от температуры приповерхностной зоны самонагревающийся отвал может быть теплым (до 50°C), горячим (от 50 до 70°C), предельно-нагретым (от 70 до 80°C) и горящим (свыше 80°C) [17]. Кроме того, такой отвал, как правило, содержит значительные количества минералов пирита, углистых пород и угля, а его основание находится над ГДАЗ.

Самонагревающиеся углепородные отвалы отличаются неповторимым сочетанием энергетического, вещественного (минерального) и пространственного ресурсов (**рис. 1**). Энергетический ресурс играет ведущую роль в триединстве отвальных ресурсов. Например, балансовые запасы углистых аргиллитов, углистых алевролитов и угля в самонагревающемся отвале снижаются с повышением его возраста, а содержание окисленных пород неуклонно растет. Иными словами, в процессе истощения энергетического ресурса отвала качество вещественного ресурса существенно изменяется.

Таблица. Краткая характеристика самонагревающегося углепородного отвала Донбасса
Table. Brief characteristics of a self-heating coal-mine waste dump in the Donbas

Отличительные признаки	Региональная вариативность признаков
Тепловое состояние	Теплый, горячий, предельно нагретый, горящий, нагретый, остывший
Литолого-минералогический состав	Сульфидные (пирит, марказит), углеродистые породы и включения угля
Расположение относительно ГДАЗ	ГДАЗ пересекает отвал, отвал расположен в ГДАЗ
Источник образования	Отходы добычи угля (шахтная порода), породы терриконов
Возраст	Молодой, среднего возраста, значительно реже старый
Наличие биологической рекультивации	Не озеленённые, частично озеленённые
Высота	Высокий, средний
Форма	Конический, усеченный конический

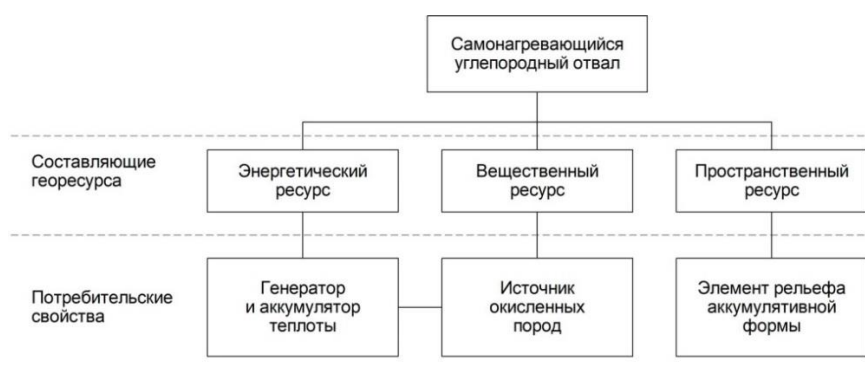


Рис. 1. Ресурсная многофункциональность самонагревающегося углепородного отвального отвала и его потребительские свойства

Fig. 1. Resource multifunctionality of a self-heating coal-mine waste dump and its consumer properties

По нашим представлениям, энергетический ресурс формируется за счет поступления в отвал топливных ресурсов (пиритсодержащих углистых пород и включений угля), а истощается (реализуется в виде отвального тепла) в том числе благодаря поступлению сопутствующих биоресурсов. Самонагревание отвала во многом детерминировано его контаминацией микроорганизмами, субстратом для которых выступает пирит. Состав и активность популяции микроорганизмов, а также упорство (сопротивление) отвального пирита биоокислению существенно влияют на возникновение, длительность и интенсивность самонагревания [20].

В ходе жизненного цикла склонный к самонагреванию и последующему самовозгоранию углепородный отвал часто последовательно проходит ряд тепловых состояний. Отвал характеризуется как теплый или горячий, когда стадия низкотемпературного окисления отходов угледобычи сменилась на стадию самонагревания. Отвал классифицируется как предельно-нагретый и горячий, если стадия самонагревания перешла в стадию самовозгорания и горения (рис. 2).

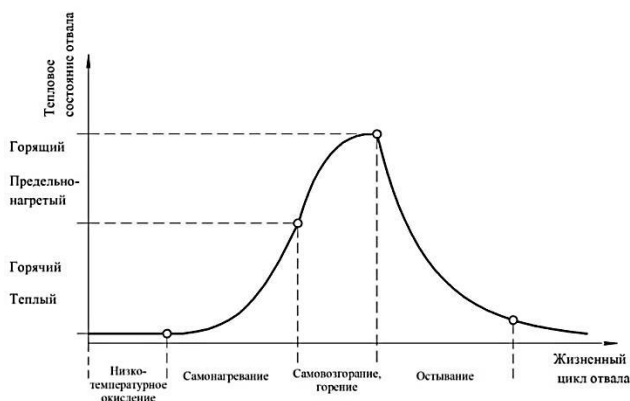


Рис. 2. Изменения теплового состояния углепородного отвала, склонного к самонагреванию и последующему самовозгоранию

Fig. 2. Changes in the thermal state of a coal-mine waste dump prone to self-heating and subsequent spontaneous combustion

Посредством введения в самонагревающийся отвал теплоуловителей можно достигнуть определенной термостабилизации состояния накопленных отходов угледобычи. Каждый теплоуловитель – функциональный элемент технологической системы извлечения тепловой энергии отвала, представляющий собой трубку или трубный пучок с циркулирующим внутри теплоносителем (например, водой). Теплоуловители размещают в скважинах, пробуренных в приповерхностной зоне самонагревающегося отвального массива и ориентированных в сторону внутреннего очага самонагревания [20].

Регулируемое отведение нерассеянной теплоты позволяет отвалу находиться в стадии контролируе-

мого самонагревания до окончания процесса биохимического окисления (рис. 3). Контроль теплового состояния самонагревающегося углепородного отвала обеспечивается с помощью сети теплопрофилеметров [20], размещенных в его приповерхностной зоне и связанных с удаленным центром мониторинга отвала и управления теплоуловителями. Для верификации показаний датчиков каждого термопрофилемера осуществляется также тепловой мониторинг отвала посредством тепловизора, установленного на беспилотном летательном аппарате, выполняющем периодические и, по необходимости, оперативные наблюдения за состоянием отвала по заданным профилям полета.

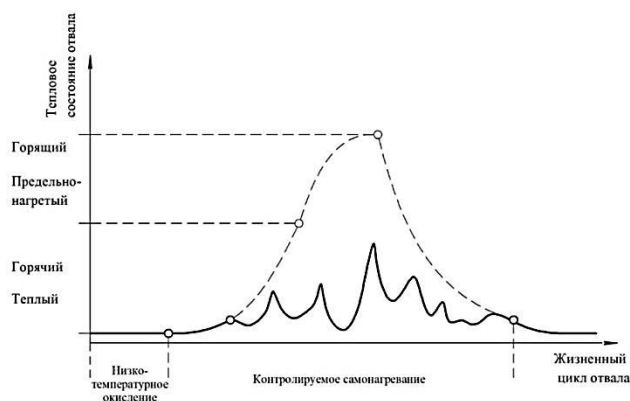


Рис. 3. Изменения теплового состояния самонагревающегося углепородного отвала, используемого в качестве генератора тепла

Fig. 3. Changes in the thermal state of a self-heating coal-mine waste dump used as a heat generator

Основанное на принципах биоэтики использование отвала в качестве теплогенератора дает возможность регулировать не только минимум отводимой тепловой мощности, необходимый для профилактики самовозгорания накопленных отходов угледобычи, но и максимум тепловой мощности, отдаваемой потребителю без нанесения ущерба популяции отвальных микроорганизмов, жизнедеятельность которых способствует устойчивой теплогенерации.

Освоение теплоэнергетических ресурсов отвалов ограничено периодом процесса самонагревания складированных отходов угледобычи. По сути, доступность использования отвалов в качестве теплогенераторов может быть охарактеризована как краткосрочная или среднесрочная в зависимости от содержаний в отвале пирита, угля и углистых пород, а также активности отвальной биоты и сезонных изменений климата. Теплые и горячие отвалы могут служить источником тепловой энергии как в период отработки шахтного поля, так и постотрабочный период, тем самым комплексно вовлекая в энергопотребление накапливаемые в отвалах шахт невозобновляемые энергетические ресурсы.

В отличие от ограниченного во времени использования углепородного отвала в качестве теплогенератора, использование такого инженерного сооружения в качестве аккумулятора, накапливающего солнечное тепло, представляется возможным в течение всего периода его функционирования. По данным Global Solar Atlas годовая прямая нормальная инсоляция DNI территории Донбасса составляет 1279 кВт·ч/м². Хотя теплопоглощающая способность отвальных пород невысокая (10–35 Вт/м²), вклад солнечной энергии в нагрев приповерхностной зоны отвалов достаточно велик. Так, для террикона с диаметром основания 200 м, высотой 50 м и углом отсыпки 35° снимаемая мощность (за счет солнечного прогрева 37 770 м² отвальной поверхности) может составить 567 кВт [21].

Важно отметить, что наиболее эффективное извлечение тепловой энергии достигается при сочетании отборе невозобновляемого тепла, генерируемого отвалом, и возобновляемого тепла, запасенного породами приповерхностной зоны отвала за счет поглощения солнечного излучения. Если в зимний период извлечение тепловой энергии горячего отвала может осуществляться погружными теплоуловителями (рис. 4, а), то в летний период утилизация тепловой энергии остывшего и горячего отвалов может выполняться посредством поверхностных (рис. 4, б) и поверхностно-погружных (гибридных) теплоуловителей (рис. 4, в) соответственно.

Остывшие отвалы могут служить источниками окисленных пород. Устойчивое потребление продуктов отвального биохимического окисления позволяет выполнять постепенную ликвидацию техногенного образования. Одним из перспективных направлений утилизации окисленных (горелых) пород является их использование в производстве бетонных изделий для шахтного строительства [22]. Данное направление позволяет выполнить «полезное возвращение» пород (в составе необходимых изделий) в подземное пространство. Полная утилизация окисленных пород

формирует условия для использования земельных угодий, находившихся под скоплением отходов, для ведения хозяйства или градостроительства.

Если качественные характеристики отвальных окисленных пород не соответствуют требованиям промышленных потребителей, то соответствующий остывший отвал может использоваться как элемент рельефа постиндустриальной территории, обладающий аккумулятивной формой. Поверхность террикона может подлежать архитектурно-градостроительному освоению, основанному на организации агропромышленного комплекса с каскадным террасным размещением тепличных модулей, проектирование которого основано на системе пассивного использования солнечной энергии [23].

Учитывая триединство энергетического, вещественного и пространственного ресурсов самонагреваемых углепородных отвалов, в основу создания и реализации сценариев их комплексного использования целесообразно положить принцип последовательно-параллельного освоения указанных ресурсов. На рис. 5 приведена диаграмма, позволяющая продемонстрировать концепт-сценарии, опирающиеся на заданный порядок освоения георесурсного потенциала самонагревающегося отвала и попутного использования возобновляемого ресурса (солнечной энергии).

Успешная реализация сценариев комплексного использования самонагреваемых отвалов приведет к получению экологических и социально-экономических эффектов. В первую очередь к таким положительным эффектам следует отнести снижение теплотехнического загрязнения атмосферы, создание новых рабочих мест, получение товарной продукции (тепловой энергии и продуктов биохимического окисления пород), экономию природных энергоносителей (газа, мазута, угля), частичное или полное высвобождение земельных участков, находящихся под отвалами, архитектурно-градостроительное освоение постиндустриальных территорий.

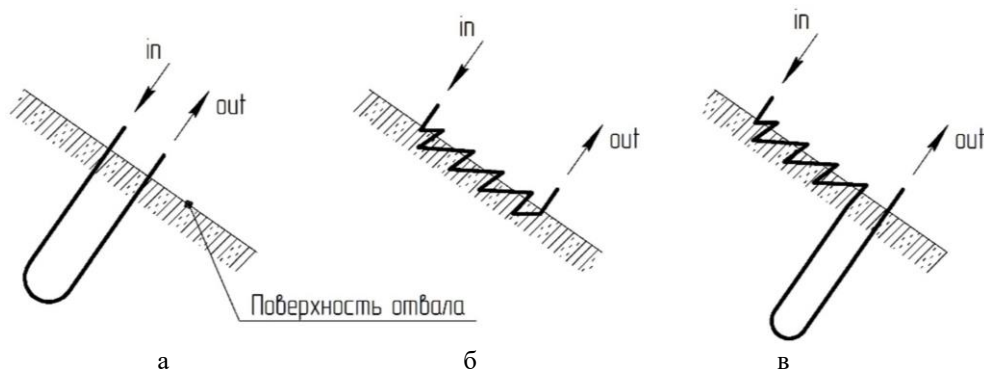


Рис. 4. Конструктивные схемы теплоуловителей: а – погружной; б – поверхностный; в – поверхностно-погружной

Fig. 4. Design schemes of heat trap-collectors: a is immersed; b is surface; v is surface-immersed

Стадия жизненного цикла отвала	Контролируемое самонагревание		Остывание	Архитектурно-градостроительное освоение	Ликвидация
	Теплый	Горячий			
Тепловое состояние отвала			Остывший		
Использование в качестве теплогенератора	■				
Использование в качестве теплоаккумулятора	■				
Использование в качестве источника окисленных пород					■
Использование в качестве элемента рельефа аккумулятивной формы				■	

Рис. 5. Диаграмма последовательно-параллельного освоения ресурсов самонагревающегося углепородного отвала
 Fig. 5. Diagram of sequential-parallel exploitation of the resources of a self-heating coal-mine waste dump

Заключение

Самонагревающиеся углепородные отвалы представляют собой многофункциональные техногенные георесурсы, отличающиеся триединством энергетического, вещественного и пространственного ресурсов. В ходе освоения энергетического ресурса самонагревающийся углепородный отвал может быть использован в качестве генератора и аккумулятора тепла, а в процессах освоения вещественного или пространственного ресурсов – в качестве источника окисленных пород и элемента рельефа аккумулятивной формы соответственно.

Основными отличительными признаками самонагреющихся углепородных отвалов Донбасса являются тепловое состояние, литолого-минералогический состав и расположение их относительно геодинамически активной зоны.

Геотехнологической особенностью комплексного использования самонагреющихся углепородных отвалов является первоочередное освоение их энергетических ресурсов, включающее утилизацию невозобновляемого тепла, сгенерированного отвалами, и возобновляемого тепла, запасенного породами приповерхностной зоны отвалов за счет поглощения солнечного излучения. Биотехнологической особенностью комплексного использования самонагреющихся углепородных отвалов является создание благоприятных условий для длительной теплогенерирующей жизнедеятельности отвальной популяции микроорганизмов.

В основу создания и реализации сценариев комплексного использования самонагреющихся углепородных отвалов Донбасса целесообразно положить принцип последовательно-параллельного освоения энергетического, вещественного и пространственного ресурсов. Оценка результативности использования самонагреющихся скоплений твердых отходов угледобычи может выполняться на основании получения сочетанных экологических и социально-экономических эффектов.

Список источников

1. Гузеев О.А., Корвякова Н.П. О классификации и обусловленности факторов самонагревания углепородного отвала Донбасса // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2024. № 2(222). С. 84-91.
2. Гамов М.И., Гордеев И.В. Основные факторы и экологические последствия самовозгорания отвалов угольных шахт Восточного Донбасса // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2017. № 2(194). С. 92-100.
3. Верех-Белоусова Е.И. Переработка отвалов угольных шахт Луганщины как техногенных месторождений металлов // Экологическая химия. 2019. Т. 28. № 2. С. 107-113.
4. Heavy metal-and organic-matter pollution due to self-heating coal-waste dumps in the Upper Silesian Coal Basin (Poland) / Nádudvari Á. et al. // Journal of Hazardous Materials. 2021, vol. 412, 125244.
5. The origin of GHG's emission from self-heating coal waste dump: Atmogeochemical interactions and environmental implications / Górka M. et al. // International Journal of Coal Geology. 2022, vol. 250, 103912.
6. Potential Water and Soil Contaminants from Coal Waste Dump Being at the Late Stage of Self-Heating (Rymer Cones, Poland) / Lupanciuc M. et al. // 30th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG 2021). – European Association of Geoscientists & Engineers, 2021, vol. 2021, no. 1, pp. 1-2.
7. Девятова А.Ю. Газофазные выбросы в атмосферу при горении угля // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 5. С. 29-34.
8. Использование очагов самовозгорания угля для получения тепловой энергии / Портола В.А., Ярош А.С., Бобровникова А.А., Портола А.А. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 5 (159). С. 92-103.
9. Ишхнели О.Г., Лиманский А.В., Воронков Г.Я. Снижение загрязнения окружающей среды при ликвидации углепородных отвалов // Уголь. 2013. № 10. С. 68-71.
10. Черникова С.А., Левицкий С.И., Торопов А.В. Использование отходов добычи и обогащения угля // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. 2023. № 10(76). С. 154-157.

11. Свечкаренко Е.Н., Трусова, Т.В., Гомаль И.И. Комплексный подход к ликвидации экологического ущерба от породных отвалов угольных шахт // Вести Автомобильно-дорожного института. 2024. № 2(49). С. 76-85.
12. Хоменко Я.В., Солдатова А.С. Оценка проблемы терриконов Донбасса // Экономічний вісник Донбасу. 2015. №1(39). С. 12-19.
13. Шаповалов В.В., Козырь Д.А. Ресурсосберегающая технология утилизации породных отвалов горнодобывающих производств // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 4. С. 175-184.
14. Гавришев С. Е., Заляднов В. Ю., Пыталев И. А. Расширение области рационального использования техногенных георесурсов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. №. 9. С. 252-258.
15. Рыльникова М. В., Радченко Д. Н., Экс В. В. Классификация техногенных георесурсов в свете перспектив комплексного освоения рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. №. 2. С. 318-324.
16. Гайворонский Е.А. Композиционно-художественное освоение формы терриконов в архитектурных решениях объектов угольно-отраслевой принадлежности, а также объектов общегородского назначения // Современное промышленное и гражданское строительство. 2015. Т. 11. № 3. С. 155-156.
17. Морфогенетическая диагностика процессов почвообразования на отвалах каменноугольных разрезов Сибири / Д.А. Соколов, В.А. Андронов, С.П. Кулижский и др. // Почвоведение. 2015. №1. С. 106-117.
18. Батугин А.С., Кобылкин А.С., Мусина В.Р. Исследование влияния геодинамической позиции угленосных отвалов на их эндогенную пожароопасность // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 526-533.
19. Монах С.И., Бафталовский Р.Э. Исследование возможности применения геотермальных тепловых насосов (ГТН) с использованием теплоты грунтов терриконов для автономного теплоснабжения // Современное промышленное и гражданское строительство. 2008. Т. 4. № 3. С. 113-118.
20. Гузев О.А., Понамарева Е.А. О предпосылках создания системы извлечения теплоты самонагревающегося угленосного отвала Донбасса // Мониторинг. Наука и технологии. 2025. №2. С. 66-72.
21. Накорчевский А.И., Недбайло А.Н., Беляева Т.Г. Извлечение возобновляемой теплоты терриконов // Промышленная теплотехника. 2007. Т. 29. №7. С. 22-26.
22. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Материалы из горелых пород для бетонной шахтной крепи // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2022. № 1(33). С. 106-114.
23. Семченков Л.В., Гайворонский Е.А. Направления апробации универсальной системы пассивного использования солнечной энергии в архитектурных решениях зданий и сооружений в городах Донбасса // Современное промышленное и гражданское строительство. 2017. Т. 13. №1. С. 5-16.
24. Severo-Kavkazskii region. *Seriya: Estestvennye nauki* [University News. North-Caucasian Region. Natural Sciences Series]. 2024;(2(222)):84-91. (In Russ.)
25. Gamov M.I., Gordeev I.V. Main factors and environmental consequences of spontaneous combustion of coal mine dumps in Eastern Donbass. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki* [University News. North-Caucasian Region. Natural Sciences Series]. 2017;(2(194)):92-100. (In Russ.)
26. Verekh-Belousova E.I. Processing of coal mine dumps of Lugansk region as technogenic metal deposits. *Ekologicheskaya khimiya* [Ecological Chemistry]. 2019;28(2):107-113. (In Russ.)
27. Nádudvari Á. et al. Heavy metal-and organic-matter pollution due to self-heating coal-waste dumps in the Upper Silesian Coal Basin (Poland). *Journal of Hazardous Materials*. 2021;412:125244.
28. Górka M. et al. The origin of GHG's emission from self-heating coal waste dump: Atmogeochemical interactions and environmental implications. *International Journal of Coal Geology*. 2022;250:103912.
29. Lupanciu M. et al. Potential water and soil contaminants from coal waste dump being at the late stage of self-heating (Rymer Cones, Poland). 30th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG 2021). European Association of Geoscientists & Engineers. 2021;2021(1):1-2.
30. Devyatova A.Yu. Gas-phase emissions into the atmosphere during coal combustion. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [University News. Mining Journal]. 2013;(5):29-34. (In Russ.)
31. Portola V.A., Yarosh A.S., Bobrovnikova A.A., Portola A.A. Use of coal spontaneous combustion centers for thermal energy generation. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. 2023;(5(159)):92-103. (In Russ.)
32. Ishkneli O.G., Limanskii A.V., Voronkov G.Ya. Reduction of environmental pollution during elimination of coal waste dumps. *Ugol* [Coal]. 2013;(10):68-71. (In Russ.)
33. Chernikova S.A., Levitskii S.I., Toropov A.V. Use of coal mining and beneficiation waste. *Vestnik Luganskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Vladimira Dalya* [Bulletin of Vladimir Dahl Lugansk State University]. 2023;(10(76)):154-157. (In Russ.)
34. Svechkarenko E.N., Trusova T.V., Gomal I.I. Integrated approach to elimination of environmental damage caused by coal mine waste dumps. *Vesti Avtomobilno-dorozhnogo instituta* [Proceedings of the Automobile and Road Institute]. 2024;(2(49)):76-85. (In Russ.)
35. Khomenko Ya.V., Soldatova A.S. Assessment of the problem of Donbass spoil tips. *Ekonomichnii visnik Donbasu* [Economic Herald of Donbass]. 2015;(1(39)):12-19. (In Russ.)
36. Shapovalov V.V., Kozyr D.A. Resource-saving technology for utilization of mining waste dumps. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2023;334(4):175-184. (In Russ.)
37. Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Yu., Pytalev I.A. Expansion of the rational use area of technogenic georesources. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2006;9:252-258. (In Russ.)

References

1. Guzev O.A., Korvyakova N.P. On the classification and conditionality of self-heating factors of the Donbass coal waste dump. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii*.

15. Rylnikova M.V., Radchenko D.N., Eks V.V. Classification of technogenic georesources in the context of prospects for integrated development of ore deposits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2012;(2):318-324. (In Russ.)
16. Gaivoronskii E.A. Compositional and artistic development of spoil tip forms in architectural solutions of coal industry and urban facilities. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Modern Industrial and Civil Construction]. 2015;11(3):155-156. (In Russ.)
17. Sokolov D.A., Androkhanov V.A., Kulizhskii S.P. et al. Morphogenetic diagnostics of soil formation processes on dumps of Siberian coal pits. *Pochvovedenie* [Soil Science]. 2015;(1):106-117. (In Russ.)
18. Batugin A.S., Kobylkin A.S., Musina V.R. Study of the influence of geodynamic position of coal waste dumps on their endogenous fire hazard. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute]. 2021;250:526-533. (In Russ.)
19. Monakh S.I., Baftalovskii R.E. Study of the possibility of using geothermal heat pumps with spoil tip ground heat for autonomous heat supply. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Modern Industrial and Civil Construction]. 2008;4(3):113-118. (In Russ.)
20. Guzeev O.A., Ponamareva E.A. On prerequisites for creating a heat extraction system for a self-heating Donbass coal waste dump. *Monitoring. Nauka i tekhnologii* [Monitoring. Science and Technologies]. 2025;(2):66-72. (In Russ.)
21. Nakorchevskii A.I., Nedbailo A.N., Belyaeva T.G. Extraction of renewable heat from spoil tips. *Promyshlennaya teploekhnika* [Industrial Heat Engineering]. 2007;29(7):22-26. (In Russ.)
22. Buravchuk N.I., Guryanova O.V. Materials from burnt rocks for concrete mine support. *Innovatika i ekspertiza: nauchnye trudy* [Innovation and Expertise: Scientific Works]. 2022;(1(33)):106-114. (In Russ.)
23. Semchenkov L.V., Gaivoronskii E.A. Directions for approbation of a universal passive solar energy use system in architectural solutions of buildings and structures in Donbass cities. *Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Modern Industrial and Civil Construction]. 2017;13(1):5-16. (In Russ.)

Поступила 20.11.2025; принята к публикации 21.01.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 20/11/2025; revised 21/01/2026; published 30/06/2026

Гузев Олег Александрович – научный сотрудник,
Институт физики горных процессов, Донецк, ДНР, Россия.
Email: oleg.coin@mail.ru. ORCID 0009-0002-2786-6077

Понамарева Елена Александровна – младший научный сотрудник,
Институт физики горных процессов, Донецк, ДНР, Россия.
Email: ponamary.ifgp@mail.ru. ORCID 0000-0002-4154-160X

Пыталев Иван Алексеевич – доктор технических наук, профессор, директор НИИ КОГ,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: vehicle@list.ru. ORCID 0000-0002-5415-8079

Oleg A. Guzeev – Researcher,
Institute of Physics of Mining Processes, Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia.
Email: oleg.coin@mail.ru. ORCID 0009-0002-2786-6077

Elena A. Ponamaryova – Junior Researcher,
Institute of Physics of Mining Processes, Donetsk, Donetsk People's Republic, Russia.
Email: ponamary.ifgp@mail.ru. ORCID 0000-0002-4154-160X

Ivan A. Pytalev – DrSc (Eng.), Professor, Director of Research Institute of Integrated Development of Georesources,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: vehicle@list.ru. ORCID 0000-0002-5415-8079

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.271
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-23-30



ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГИБКОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ, ВЫДЕЛЯЕМОГО ИЗ НЕКОНДИЦИОННЫХ РУД ПРИ ИХ ПЕРЕМЕЩЕНИИ КОМБИНИРОВАННЫМ ТРАНСПОРТОМ

Чебан А.Ю.

Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

Аннотация. **Актуальность исследования.** Рост объемов горных работ и увеличение глубины карьеров определяют необходимость совершенствования технологических схем с переходом на комбинированные виды транспорта – автомобильно-конвейерный или автомобильно-железнодорожный. В процессе открытой разработки сложноструктурных месторождений вместе с кондиционными рудами извлекается большой объем некондиционной рудной массы, при этом в процессе взрывного рыхления руд некоторых формационных типов образуется рудная мелочь с повышенным содержанием полезного компонента, достаточным для ее рентабельной переработки. **Цель работы.** Обоснование адаптивной технологической схемы, предполагающей гибкое управление качеством минерального сырья в ходе выделения продуктивных мелких фракций из некондиционной рудной массы на усовершенствованном бункерно-экскаваторном перегрузочном пункте при ее перегрузке из автосамосвалов на железнодорожный транспорт. **Результаты.** Предлагаемая адаптивная схема с усовершенствованным перегрузочным пунктом, снабженным вибрационными грохотами-питателями и другим классификационным оборудованием, позволяет выделять продуктивные фракции рациональной крупности в зависимости от содержания металла в некондиционной рудной массе. Полученная рудная мелочь аккумулируется в накопительном бункере, а затем транспортируется на фабрику, где перерабатывается вместе с кондиционной рудой. **Выводы.** Регулирование размеров выделяемых мелких фракций позволит получать более качественное минеральное сырье в сравнении с известными технологическими решениями, а совмещение перевалки и классификации рудной массы обеспечит сравнительно небольшую себестоимость технологического процесса и быстрые сроки окупаемости затрат на модернизацию. Применение предлагаемой технологии даст возможность дополнительно направить на обогащение минеральное сырье, содержащее более 4% металла, извлекаемого из недр, и снизить отрицательную нагрузку на окружающую среду.

Ключевые слова: сложноструктурные месторождения, глубокие карьеры, некондиционная руда, автомобильно-железнодорожный транспорт, перегрузочный пункт, грохочение, продуктивные фракции

© Чебан А.Ю., 2026

Для цитирования

Чебан А.Ю. Обеспечение гибкого управления качеством минерального сырья, выделяемого из некондиционных руд при их перемещении комбинированным транспортом // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 23-30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-23-30>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ENSURING FLEXIBLE QUALITY MANAGEMENT OF MINERAL RAW MATERIALS SEPARATED FROM SUBSTANDARD ORES DURING THEIR TRANSPORTATION BY COMBINED TRANSPORT SYSTEMS

Cheban A.Yu.

Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The growth in mining volumes and increasing pit depths necessitate the improvement of technological schemes with a transition to combined transportation systems, such as truck-conveyor and truck-rail haulage. During the open-pit mining of complex-structured deposits, a significant amount of substandard ore is extracted together with marketable ore. At the same time, blasting and fragmentation of ores of certain formation types generate fine ore fractions enriched with valuable components, the content of which is sufficient for economically viable processing. **Objectives.** The research is aimed at substantiation of an adaptive technological scheme providing flexible quality management of mineral raw materials through the separation of productive fine fractions from substandard ore mass at an upgraded hopper-excavator transfer station during its reloading from dump trucks to railway transport. **Result.** The proposed adaptive scheme, incorporating an improved transfer station equipped with vibrating grizzly feeders and other classification equipment, makes it possible to separate productive fractions of rational size depending on the metal content in the substandard ore mass. The recovered fine ore is accumulated in a storage bunker and subsequently transported to the processing plant, where it is treated together with marketable ore. **Conclusions.** Regulation of the size range of the separated fine fractions enables the production of higher-quality mineral raw materials compared with existing technological solutions. The integration of ore transfer and classification processes ensures relatively low operating costs and a short payback period for modernization investments. Application of the proposed technology makes it possible to additionally direct for beneficiation mineral raw materials containing more than 4% metal recovered from the subsurface, while also reducing the environmental impact of mining operations.

Keywords: complex-structured deposits, deep open pits, substandard ore, truck-rail transportation, transfer station, screening, productive fractions

For citation

Cheban A.Yu. Ensuring Flexible Quality Management of Mineral Raw Materials Separated from Substandard Ores During Their Transportation by Combined Transport Systems. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 21, pp. 23-30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-23-30>

Введение

В связи увеличением потребности в металлах при одновременном снижении содержания полезного компонента в рудах масштабы ведения открытых горных работ непрерывно возрастают, увеличиваются площадь и глубина карьеров, растёт объём извлекаемой из недр горной массы, для перемещения которой используются различные виды карьерного транспорта [1-4]. Железнодорожный транспорт благодаря возможности обеспечения практически любой величины грузооборота при неограниченном расстоянии перевозок, сравнительно небольших удельных затратах на перемещение грузов, надёжности работы в различных климатических и горно-геологических условиях достаточно широко применяется на крупных горнодобывающих предприятиях. Перемещение грузов железнодорожным транспортом осуществляется на Лебединском, Соколовско-Сарбайском, Качканарском ГОКах, Алмалыкском ГМК, Коркинском разрезе и других крупных предприятиях.

Так, на руднике Кальмакыр, осуществляющем добычу медно-порфировых руд и входящем в промышленный комплекс Алмалыкского ГМК, общая протя-

женность железнодорожных путей составляет 55 км, из них 43 км – внутрикарьерные и 12 км – на отвалах, средняя дальность транспортировки вскрышных и вмещающих пород в отвалы составляет 8 км, а руды – 15 км [2]. По мере углубления карьеров эффективность применения железнодорожного транспорта снижается, поскольку попытка завести его на более глубокие горизонты требует больших затрат на ведение горнокапитальных работ для обеспечения относительно небольших уклонов пути, значительных радиусов поворота и большой протяженности фронта работ. В связи с чем, согласно концепции «переходных процессов», возникает необходимость использования на карьере комбинированного транспорта [5-8], при котором горная масса с нижних горизонтов карьера поднимается автосамосвалами к перегрузочным пунктам, а далее перемещается к месту назначения железнодорожным транспортом на значительное расстояние. Таким образом, перманентное снижение качества руд при одновременном увеличении затрат на их добычу и транспортировку требует совершенствования известных технико-технологических решений для обеспечения конкурентоспособности горного производства [9-12].

Состояние вопроса и постановка проблемы

Чаще всего на крупных глубоких карьерах используется комбинация автомобильного транспорта с конвейерным или железнодорожным [2, 13]. При использовании железнодорожного транспорта обычно создаются перегрузочные пункты, располагающиеся на уступе карьера, автосамосвал разгружается в штабель или с откоса уступа непосредственно на площадку, откуда горная масса экскаватором или погрузчиком загружается в вагоны. Данные перегрузочные пункты просты по устройству, но имеют относительно высокую себестоимость перегрузки, небольшую производительность и длительное время погрузки состава, на крупных карьерах в работе обычно находится 4-6 таких пунктов. Повысить эффективность перегрузочных работ позволяет внедрение на карьерах эстакадно-бункерных перегрузочных пунктов с применением вибропитателей, это позволяет в 2-3 раза увеличить производительность перегрузки [6, 14].

Эстакадно-бункерный перегрузочный пункт представляет собою металлоконструкцию, примыкающую к скальному уступу, на которой установлен бункер, отбойный щит, предохранительная заслонка и вибропитатели. Автосамосвалы разгружаются в бункер, откуда вибропитателями горная масса подается в думпкары, после загрузки которого подача приостанавливается, состав передвигается на требуемый шаг, и работа повторяется. Также известна схема бункерно-экскаваторного перегрузочного пункта с бункером большой емкости, загружаемым экскаватором-драглайном, зачерпывающим горную массу из приемной ямы, в которую разгружаются автосамосвалы [6], применение экскаватора-драглайна позволяет автосамосвалам вести разгрузку на более низком горизонте карьера, что сокращает дальность транспортировки груза автотранспортом и уменьшает себестоимость работ.

Необходимо отметить, что на ряде месторождений после взрывного рыхления мелкокусковая рудная масса имеет повышенное содержание металла [15-21]. Например, на медно-никелевом руднике «Заполлярный» с уменьшением размеров кусков руды с 300 до 5 мм содержание меди возрастает с 0,45 до 0,75%, а никеля – с 0,33 до 0,59% [16]. В рудном отсеке (-5 мм) Лермонтовского вольфрамового месторождения содержание металла примерно в два раза выше, чем в исходной руде – 0,45 и 0,24% соответственно [17]. На Яковлевском месторождении в классах -100+50 и -50+25 мм содержится соответственно 39,67 и 40,34% железа, а в классе -25+0 мм – 46,20%, подобное содержание металла позволяет направлять рудную мелочь в доменный передел без предварительного обогащения [18]. Эта особенность характерна как для товарных, так и для некондиционных руд, в частности, исследования, проведенные для некондиционной руды одного из дальневосточных медно-порфировых месторождений, выявили, что мелкая фракция (-15 мм) имеет кондиционное содержание по меди, а тонкая фракция (-2,5 мм) – кондиционное содержание по меди и золоту [19]. На основании полученных данных была предложена схема, предполагающая двухста-

дийное грохочение некондиционной руды с выделением фракций -15+2,5 и -2,5+0 мм, с последующим кучным выщелачиванием меди из фракции -15+2,5 мм и стадийным кюветным выщелачиванием золота и меди из фракции -2,5+0 мм [19].

Недостатком технологических схем, предполагающих выделение продуктивных мелких фракций на специальных грохотильных пунктах, являются дополнительные затраты на классификацию и перевалку некондиционной рудной массы, что значительно снижает их эффективность. Минимизировать подобные затраты позволяет применение технико-технологических решений, обеспечивающих выделение продуктивных мелких фракций в процессе перегрузки рудной массы. Так, в работе [7] обоснована технология, предполагающая выделение обогащенной рудной мелочи при перевалке некондиционной золотосодержащей руды на перегрузочном пункте в процессе ее транспортировки автомобильно-конвейерным транспортом. Конвейерный транспорт в сравнении с железнодорожным обеспечивает возможность перемещения грузов под более значительным углом подъема, однако для обеспечения транспортировки взорванной горной массы на конвейере необходимо ее предварительное крупное дробление до размеров -300–400 мм, что требует размещения на перегрузочном пункте дробильного оборудования и ведет к дополнительным затратам [7, 22]. При этом необходимо учесть, что при открытой разработке месторождений преимущественно извлекаются, транспортируются и складываются пустые породы [7], дробление которых не имеет последующего практического значения, в то же время применение железнодорожного транспорта позволяет перемещать горную массу забойной крупности.

Целью исследования является обоснование адаптивной технологической схемы, предполагающей гибкое управление качеством минерального сырья в ходе выделения продуктивных мелких фракций из некондиционной рудной массы на усовершенствованном бункерно-экскаваторном перегрузочном пункте при ее перегрузке из автосамосвалов на железнодорожный транспорт.

Результаты исследования

В Институте горного дела ДВО РАН с участием автора были проведены исследования проб некондиционной медной руды забойной крупности одного из дальневосточных месторождений, отличающихся по содержанию металла. Исследования показали значительную изменчивость содержания полезного компонента по фракциям рудной массы (рис. 1). Среднее содержание меди в пробе №1 составило 0,261 у.е., а в пробе №2 – 0,193 у.е., при этом содержание металла в мелких фракциях (-20 мм) в 1,18–1,61 раза превышает среднее содержание в пробах. Очевидно, что чем ниже среднее содержание металла в рудной массе, тем оно меньше и в отдельных фракциях, соответственно, если в пробе №1 кондиционное содержание меди (более 0,30 у.е.) имеет фракции -5+0, -10+5 и -20+10 мм, то в пробе №2 – только фракция -5+0 мм.

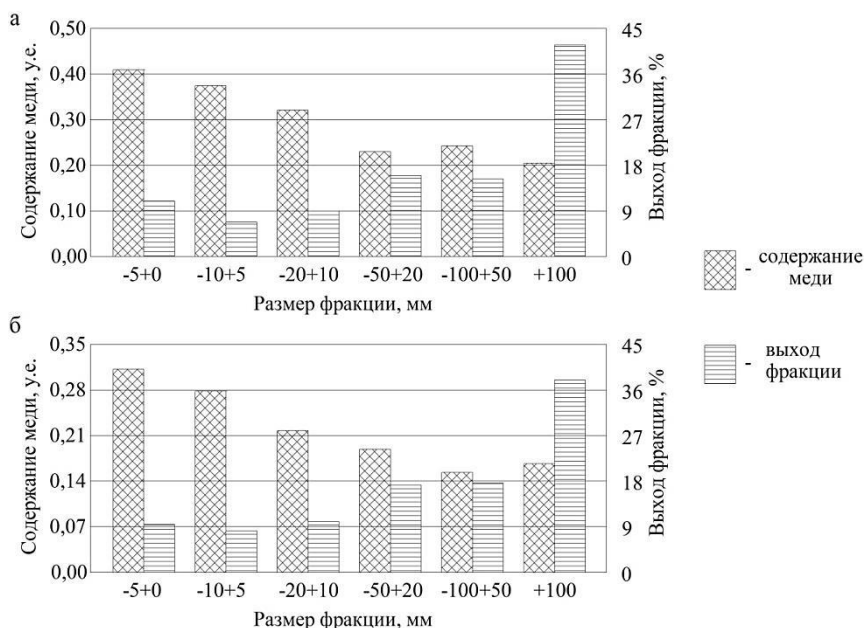


Рис. 1. Содержание меди по выделенным фракциям некондиционной руды: а – проба №1; б – проба №2
 Fig. 1. Copper content in the selected fractions of substandard ore: a is sample No. 1; б is sample No. 2

Исходя из данных эксплуатационной разведки рассматриваемого выемочного блока, среднее содержание меди в некондиционной руде составляет 0,224 у.е. С учетом данных распределения металла по фракциям для проб №1 и 2 для среднего содержания 0,224 у.е. можно пропорционально принять, что фракции -5+0 и -10+5 мм будут иметь кондиционное содержание меди. Однако необходимо учесть, что в случае выделения из всего объема некондиционных руд класса крупности -10+0 мм в качестве продуктивной фракции, при работе с рудой с содержанием менее 0,20 у.е. в продуктивную фракцию будут включены куски крупностью -10+5 мм, не имеющие кондиционного содержания полезного компонента, а при работе с рудой, имеющей содержание более 0,25 у.е., в продуктивную фракцию не попадет рудная масса крупностью -20+10 мм с кондиционным содержанием металла.

С учетом выявленной изменчивости содержания металла по фракциям некондиционной рудной массы автором предлагается адаптивная технологическая схема с гибким управлением качеством дополнительно получаемого минерального сырья в виде мелких фракций. Просеивание продуктивных мелких фракций осуществляется на усовершенствованном бункерно-экскаваторном перегрузочном пункте (рис. 2), который включает приемные ямы 1, 2, подпорную стенку 3 с бункером 4, а также экскаватор-драглайн 5. В нижней части бункера 5 размещены вибрационные грохоты-питатели 6, одновременно обеспечивающие крупное грохочение и подачу материала в транспортные средства и заменяя, таким образом, два агрегата – пластинчатый питатель и наклонный грохот, что уменьшает габариты и металлоемкость комплекса оборудования [23]. Под вибрационным грохотом-питателем 6 размещены вибрационные грохоты 7, 8 для выделения средних и мелких фракций, а также приемная емкость 9 и

сборочный конвейер 10. При этом вибрационный грохот 8 для выделения мелких фракций имеет функциональную возможность регулирования размера разгрузочных щелей [24, 25].

При разработке сложноструктурного рудного блока на глубоком карьере взорванная рудная масса селективно извлекается экскаватором. В автосамосвалы 11 ведется погрузка кондиционных руд с содержанием меди более 0,30 у.е., некондиционных руд – с содержанием 0,23-0,30 и 0,16-0,23 у.е., а также минерализованных вмещающих пород. Автосамосвалы 11 с глубоких горизонтов карьера перемещаются на соответствующие бункерно-экскаваторные перегрузочные пункты. При этом некондиционная руда с различным содержанием полезного компонента отсыпается в соответствующие приемные ямы 1, 2 усовершенствованного бункерно-экскаваторного перегрузочного пункта. Экскаватором-драглайном 5 ведется последовательное черпание некондиционной руды из приемных ям 1 или 2 с подачей в бункер 4, откуда вибрационными грохотами-питателями 6 (количество которых принимается исходя из возможности одновременного заполнения думпкара 12 по всей его длине) подается в железнодорожный транспорт. В процессе грохочения в думпкар 12 сыпается крупно- и среднекусовая рудная масса, мелкая продуктивная фракция в виде подрешетного продукта вибрационных грохотов 8 подается в приемные емкости 9 и далее сборочным конвейером 10 отправляется в накопительный бункер 13, из которого осуществляется загрузка колесного транспортного средства 14. При этом в случае загрузки в бункер 4 некондиционной руды с содержанием металла 0,23-0,30 у.е. разгрузочные щели вибрационных грохотов 8 настроены на получение подрешетного продукта размером -20 мм, а при работе с некондиционной рудой с содержанием металла 0,16-0,23 у.е. – на получение подрешетного продукта -5 мм.

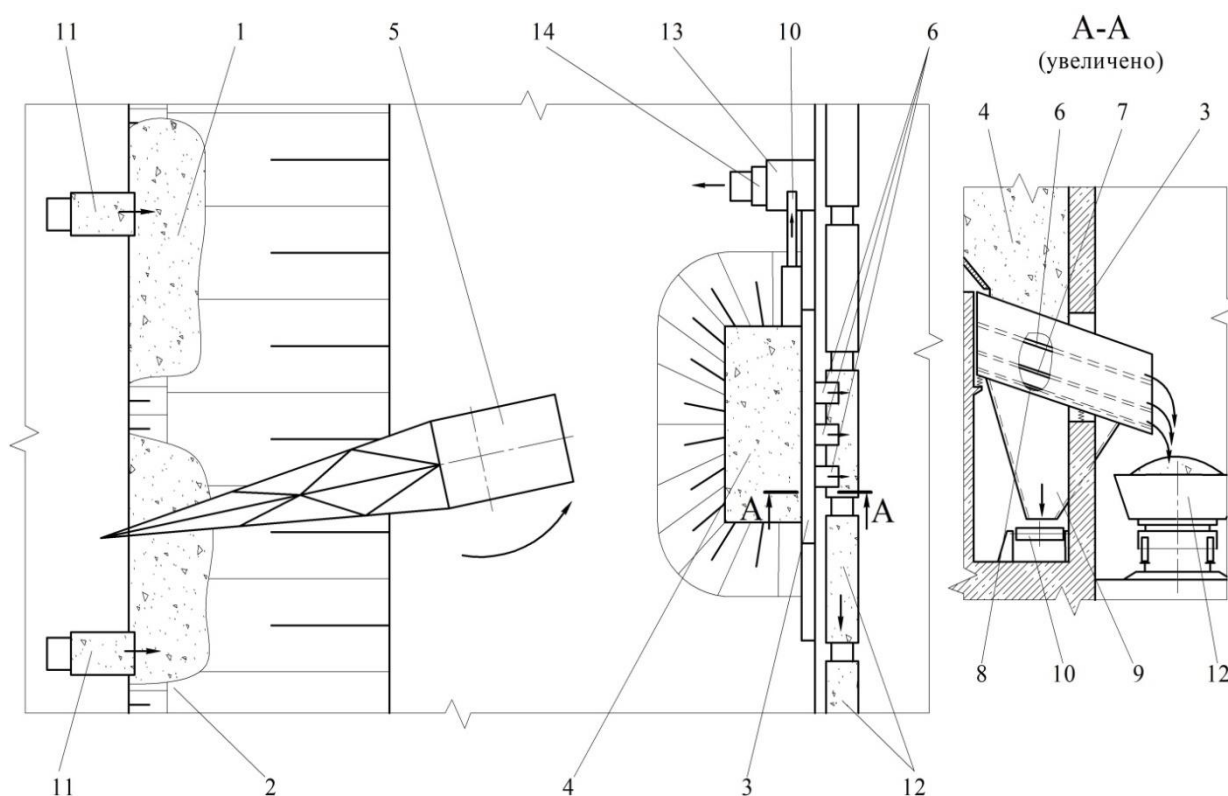


Рис. 2. Схема усовершенствованного бункерно-экскаваторного перегрузочного пункта для работы с некондиционной рудной массой

Fig. 2. Scheme of an improved hopper-excavator transfer station for handling substandard ore mass

Загруженная в колесное транспортное средство 14 продуктивная фракция может быть направлена напрямую к месту переработки кондиционной руды либо на перегрузочный пункт для кондиционной руды с последующей транспортировкой железнодорожным транспортом.

Количество металла, содержащегося в продуктивных мелких фракциях, выделяемых из некондиционной руды сложноструктурного выемочного блока, может быть определено по формуле

$$M_{\Pi} = V_{\text{н}} q_{\text{н}} c_{\text{н}} E_{\text{н}} + V_{\text{п}} q_{\text{п}} c_{\text{п}} E_{\text{п}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{н}}$, $V_{\text{п}}$ – объем некондиционной руды с содержанием меди соответственно 0,23-0,30 и 0,16-0,23 у.е.; $q_{\text{н}}$, $q_{\text{п}}$ – доля продуктивной фракции в объеме некондиционной руды с содержанием меди соответственно 0,23-0,30 и 0,16-0,23 у.е.; $c_{\text{н}}$, $c_{\text{п}}$ – среднее содержание меди в выделяемых продуктивных мелких фракциях соответственно -20+0 и -5+0 мм; $E_{\text{н}}$, $E_{\text{п}}$ – эффективность грохочения при выделении соответствующих мелких продуктивных фракций.

С учетом того, что для организации работ по выделению из некондиционных руд мелких продуктивных фракций требуются дополнительные капитальные и эксплуатационные затраты, необходимо при

планировании производства обеспечить соблюдение условия

$$M_{\Pi} K_{\text{и}} C > 3 \cdot P, \quad (2)$$

где $K_{\text{и}}$ – коэффициент извлечения металла при переработке руды; C – цена металла; 3 – затраты на выделение, транспортировку и переработку продуктивных мелких фракций; P – уровень рентабельности производства.

Выполненные укрупненные технико-экономические расчеты показывают, что предлагаемая технология рентабельна, а дополнительные затраты, связанные с ее внедрением, окупятся менее чем за 1 год. Расчеты, выполненные с учетом результатов, полученных при исследовании проб некондиционной руды, и данных эксплуатационной разведки рассматриваемого выемочного блока, показывают, что применение предлагаемого технико-технологического решения позволит выделить продуктивные мелкие фракции, содержащие порядка 24% металла, находящегося в некондиционной рудной массе. С учетом того, что на некондиционную руду приходится 17,5% металла рассматриваемого сложноструктурного блока, то на обогащение будет дополнительно направлена рудная масса, в которой находится 4,2% металла.

Выводы

Рост глубины карьеров предопределяет необходимость использования комбинированного транспорта, когда с глубоких горизонтов горная масса перемещается автосамосвалами, а затем перегружается на более экономичные и производительные виды транспорта, например конвейерный или железнодорожный. При разработке сложноструктурных месторождений цветных металлов из недр извлекается и складирована большое количество некондиционных руд, которые содержат существенную долю запасов металла залежи.

В процессе взрывного рыхления руд некоторых формационных типов образуется рудная мелочь с повышенным содержанием полезного компонента, достаточным для ее рентабельной переработки. Так, проведенные исследования проб некондиционной медной руды одного из дальневосточных месторождений показали, что коэффициент концентрации полезного компонента для мелких классов -20+10, -10+5 и -5+0 мм составляет 1,18–1,61.

В статье предлагается технико-технологическое решение, обеспечивающее выделение продуктивных мелких фракций из некондиционной рудной массы при ее перевалке на усовершенствованном бункерно-экскаваторном перегрузочном пункте, снабженном вибрационными грохотами-питателями и другим классификационным оборудованием. При этом осуществляется гибкое управление качеством дополнительно получаемого минерального сырья за счет выделения продуктивных классов рациональной крупности в зависимости от содержания металла в некондиционной рудной массе.

Применение предлагаемой технологии даст возможность дополнительно направить на обогащение минеральное сырье, содержащее более 4% металла, извлекаемого из недр. Кроме того, обеспечивается уменьшение пыления штабелей и образования токсичных элементов при выпадении осадков в связи с удалением из складированной некондиционной руды основной части рудной мелочи.

Список источников

1. Совершенствование логистической схемы Светлинского рудника при переходе на циклично-поточную технологию / А.Г. Шадронов, С.А. Саблев, И.А. Пыгалев, О.В. Фридрихсон // Известия Тульского государственного университета. Науки и Земле. 2020. №4. С. 535-547.
2. Повышение эффективности и рациональное использование железнодорожного транспорта в глубоких карьерах / У.Ф. Насиров, Ш.В. Каримов, Х.А. Машарипов, Э.И. Туйчибоев // Уголь. 2024. №10. С. 85-90.
3. Depressurization of the north wall at the Escondida Copper Mine, Chile / McKelvey P., Beale G., Taylor A., Mansell S., Mira B., Valdivia C., Hitchcock W. // Geological Society, London, Special Publications. 2002, vol. 198, no. 1, pp. 107-119.
4. A transitional perspective of global and regional mineral material flows / Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R.,

- Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. // Resources, Conservation and Recycling. 2019, vol. 140, pp. 91-101.
5. Яковлев В.Л. Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. Екатеринбург, УрО РАН, 2019. 284 с.
6. Левенсон С.Я., Гендлина Л.И., Морозов А.В. Использование вибротехники в технологических процессах при освоении глубоких карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. №11. С. 249-256.
7. Чебан А.Ю. Повышение эффективности открытых горных работ за счет совершенствования грохотильно-дробильных перегрузочных пунктов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 28-34.
8. Karimov Sh.V. The research of rock mass transportation in deep quarries // Technical science and innovation. 2020, no. 4, pp. 87-91.
9. Научное обоснование технологий комплексного ресурсосберегающего освоения месторождений стратегического минерального сырья / К.Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунов, С.Д. Викторов, М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. №12. С. 5-12.
10. Управление рудопотоками на карьерах с использованием ЭВМ / Б.П. Юматов, З.И. Валатка, А.Г. Секисов, Н.В. Зыков // Горный журнал. 1984. №12. С. 33-41.
11. Recent progress on smart mining in China / Yu Jiang, Zhixiong Li, Guang Yang, Yuele Zhang, Xiaogang Zhang // Unmanned electric locomotive. Advances in Mechanical Engineering. 2017, vol. 9, no. 3, pp. 1-10.
12. Lucio J.C., Senra C.T., Souza. A. Paving the future – A case study replacing truck-and-shovels by shovel-and-conveyor continuous mining at Carajas open pit mines // IronOre 2009 Conference. Perth, WA., 2009, July 27-29, pp. 269-276.
13. Grujic M., Erdeljan D. Advantages of High Angle Belt Conveyors (Hac) in Mining // Applied Mechanics and Materials. 2014, vol. 683, pp. 73-77.
14. Юдин А.В., Линев В.П. Перспективность применения типовых решений переносных перегрузочных пунктов в глубоких карьерах // Горный журнал. 1982. №5. С. 21-25.
15. Чебан А.Ю., Секисов А.Г. Карьерный экскаватор с рабочим оборудованием для отделения обогащенной рудной мелочи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. № 1. С. 16-22.
16. Ломоносов Г.Г., Туртыгина Н.А. Влияние класса крупности медно-никелевого рудного сырья и его изменчивости на показатели обогащения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. №3. С. 104-107.
17. Саматова Л.А., Шепета Е.Д. Комбинированные технологии переработки бедных, забалансовых вольфрамовых руд и отвалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. №4. С. 187-199.
18. Shibaeva D.N., Kompanchenko A.A. Preparability of iron ore from Yakovlevo deposit, Kursk Magnetic Anomaly, using coarse particle separation methods // Journal of Mining Science. 2023, vol. 59, no. 6, pp. 988-1000.

19. Чебан А.Ю. Обоснование возможности вовлечения в переработку продуктивных фракций некондиционных поликомпонентных руд // Горная промышленность. 2024. №6. С. 168-172.
 20. Adams M. D. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.
 21. Рассказов И.Ю., Секисов А.Г., Чебан А.Ю. Повышение эффективности разработки сложноструктурных месторождений при опережающей выемке особо богатых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 4. С. 5-19.
 22. Minkin A., Wolpers F.M., Hellmuth T. Overcoming a mines embankment: IPCG system with new belt conveying concept for steep opencast minewalls // Bulk Solids Handling. 2019, vol. 37, no. 2, pp. 18-23.
 23. Результаты промышленных испытаний вибрационно-го питателя-грохота / А.В. Юдин, В.А. Панов, В.С. Пекарский, А.Н. Косолапов, Л.К. Балабатько, А.А. Шарифиев, В.М. Захаров, Г.Д. Воронкин // Горный журнал. 1987. №10. С. 45-48.
 24. А.с. 910228 СССР. Колосниковый грохот с регулируемым размером щели / А.В. Юдин, Л.К. Балабатько, В.Е. Иванов. Оpubl. 07.03.1982. Бюл. №9.
 25. Исследование неравномерности промышленного оруденения жильных месторождений и его влияние на эффективность разработки / Назарчик А.Ф., Фрейдин А.М., Емельянов В.И., Бовин А.А., Латышев М.З., Попов Н.И. Магадан: Магаданское книжное издательство, 1976. 144 с.
- ### References
1. Shadrinov A.G., Sablev S.A., Pytalev I.A., Friedrichson O.V. Improvement of the Svetlinsky gold deposit logistics scheme with transition to cycle-flow technology. *Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle* [Izvestiya Tula State University. Earth Science Series]. 2020;(4):535-547. (In Russ.)
 2. Nasirov U.F., Karimov Sh.V., Masharipov H.A., Tuychiboev E.I. Enhancing the efficiency and rational use of railway transport in deep open pit mines. *Ugol* [Coal]. 2024;(10):85-90. (In Russ.)
 3. McKelvey P., Beale G., Taylor A., Mansell S., Mira B., Valdivia C., Hitchcock W. Depressurization of the north wall at the Escondida Copper Mine, Chile. Geological Society, London, Special Publications. 2002;198(1):107-119.
 4. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. A transitional perspective of global and regional mineral material flows. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019;140:91-101.
 5. Yakovlev V.L. *Issledovanie perehodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitií metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov* [Study of transient processes - a new direction in the development of the methodology for the integrated development of georesources]. Ekaterinburg, UrO RAN, 2019, 284 p. (In Russ.)
 6. Levenson S.Ya., Gendlina L.L., Morozov A.V. Use of vibration machines in deep open pit mining. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2016;(11):249-256. (In Russ.)
 7. Cheban A.Yu. Increasing the efficiency of open mining through improving screening and crushing transfer points. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025;23(2):28-34. (In Russ.)
 8. Karimov Sh.V. The research of rock mass transportation in deep quarries. *Technical science and innovation*. 2020;(4):87-91.
 9. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Viktorov S.D., Rylnikova M.V., Radchenko D.N. Scientific rationale of technologies for comprehensive resource-saving exploitation of strategic mineral resources. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2014;(12):5-12. (In Russ.)
 10. Yumatov B.P., Valatka Z.I., Sekisov A.G., Zykov N.V. Ore flow management in quarries using computers. *Gorniy zhurnal* [Mining Journal]. 1984;(12):33-41. (In Russ.)
 11. Yu Jiang, Zhixiong Li, Guang Yang, Yuelei Zhang, Xiaogang Zhang Recent progress on smart mining in China. *Unmanned electric locomotive. Advances in Mechanical Engineering*. 2017;9(3):1-10.
 12. Lucio J.C., Senra C.T., Souza. A. Paving the future – A case study replacing truck-and-shovels by shovel-and-conveyor continuous mining at Carajas open pit mines. *IronOre 2009 Conference*. Perth, WA. July 27-29, pp. 269-276.
 13. Grujic M., Erdeljan D. Advantages of High Angle Belt Conveyors (Hac) in Mining. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;683:73-77.
 14. Yudin A.V., Linev V.P. Prospects of using standard solutions for portable transfer points in deep quarries. *Gorniy zhurnal* [Mining Journal]. 1982;(5):21-25. (In Russ.)
 15. Cheban A.Yu., Sekisov A.G. Mining excavator with the capability to separate concentrated ore fines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020;18(1):16-22. (In Russ.)
 16. Lomonosov G. G., Turtygina N. A. Influence of coarse-grained copper-nickel ore raw materials class and its changeability upon the beneficiation indication. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2015;(3):104-107. (In Russ.)
 17. Samatova L.A., Shepeta E.D. Combined technologies for processing lean and waste tungsten ores. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2013;(S4):187-199. (In Russ.)
 18. Shibaeva D.N., Kompanchenko A.A. Preparability of iron ore from Yakovlevo deposit, Kursk Magnetic Anomaly, using coarse particle separation methods. *Journal of Mining Science*. 2023;59(6):988-1000.
 19. Cheban A.Yu. Justification of the possibility to involve productive fractions of the off-grade polycomponent ores in processing. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry]. 2024;(6):168-172. (In Russ.)
 20. Adams M. D. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.
 21. Rasskazov I.Yu., Sekisov A.G., Cheban A.Yu. Enhancement of mining efficiency at structurally complex deposits with advanced extraction of very high-grade ore. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2023;(4):5-19. (In Russ.)
 22. Minkin A., Wolpers F.M., Hellmuth T. Overcoming a mines embankment: IPCG system with new belt conveying concept for steep opencast minewalls. *Bulk Solids Handling*. 2019;37(2):18-23.

23. Yudin A.V., Panov V.A., Pekarsky V.S., Kosolapov A.N., Balabatko L.K., Sharafiev A.A., Zakharov V.M., Voronkin G.D. Results of industrial tests of a vibrating feeder-screen. *Gorniy zhurnal [Mining Journal]*. 1987;(10):45-48. (In Russ.)
24. Yudin A.V., Balabatko L.K., Ivanov V.E. Kolosnikoviy grokhot s reguliruemym razmerom shheli [Grate screen with adjustable gap size]. Patent USSR, no. 910228, 1982.
25. Nazarchik A.F., Frejdin A.M., Emel'janov V.I., Bovin A.A., Latyshev M.Z., Popov N.I. Issledovanie neravnomernosti promyshlennogo orudneniya zhilnykh mestorozhdeniy i ego vliyanie na effektivnost razrabotki [Study of unevenness of industrial mineralization of vein deposits and its influence on development efficiency]. Magadan: Magadan book publishing house, 1976, 144 p. (In Russ.)

Поступила 28.08.2025; принята к публикации 10.12.2025; опубликована 30.06.2026
Submitted 28/08/2025; revised 10/12/2025; published 30/06/2026

Чебан Антон Юрьевич – ведущий научный сотрудник,
Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного
отделения Российской академии наук
(ИГД ХФИЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия.
Email: chebanay@mail.ru.

Anton Yu. Cheban – Leading Researcher,
Federal State Budgetary Institution of Science Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center
of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia.
Email: chebanay@mail.ru.



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.234.5
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-31-39

ГИДРОПРИВОД БУРОВОЙ УСТАНОВКИ КАК ОБЪЕКТ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Целищев В.А., Целищев Д.В.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Исследования направлены на понимание того, какие особенности теории структурно-параметрического синтеза применимы для исполнительного привода буровой установки, какие факторы многокритериальных сигналов управления и компенсации внешних воздействий комбинированного типа и каким образом влияют на формирование совокупных гидромеханических и электрогидравлических эффектов, осуществляющих коррекцию и регулирование статических и динамических характеристик гидродвигателей привода вращения и подачи бурового инструмента. **Цель работы.** Целью работы является определение направлений улучшения характеристик буровой установки с гидравлическим приводом бурового инструмента за счет внедрения гидромеханических регуляторов для повышения точности, устойчивости, управляемости. **Используемые методы.** Рассмотрены основные возмущающие, управляющие и регулирующие воздействия на гидравлический привод бурового инструмента. **Новизна.** Современные тенденции к цифровизации процессов бурения, обслуживания, планирования и регистрации работ определяют необходимость рассматривать в качестве объекта исследования схему гидропривода бурового инструмента с бортовой цифровой вычислительной машины. **Результат.** Предложены новые гидромеханические регуляторы системы адаптивного управления процессом бурения: регулятор давления, регулятор мощности, регулятор динамического давления и LS-регулятор. Результат достигается за счет сбора, обработки и использования данных о потребляемой мощности привода буровой установки на переходных режимах при случайной нагрузке и при работе в режиме «холодного хода». Данные используются в соответствующей задаче регулирования регулятора, который корректирует работу насоса за счет изменения его производительности. **Практическая значимость.** Исследования позволили сформировать структурную базу регуляторов гидропривода буровой установки для коррекции статических и динамических характеристик и подготовить основу для синтеза структуры регуляторов.

Ключевые слова: гидропривод, буровая установка, система регулирования, гидромеханический регулятор, синтез структуры, регулятор давления, регулятор мощности

© Целищев В.А., Целищев Д.В., 2026

Для цитирования

Целищев В.А., Целищев Д.В. Гидропривод буровой установки как объект регулирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 31-39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-31-39>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

HYDRAULIC DRIVE OF A DRILLING RIG AS A CONTROL OBJECT

Tselishchev V.A., Tselishchev D.V.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The studies are aimed at understanding which features of the theory of structural-parametric synthesis are applicable to the actuator drive of a drilling rig, which factors of multi-criteria control signals and compensation of combined external disturbances influence the formation of integrated hydromechanical and electro-hydraulic effects that provide correction and regulation of the static and dynamic characteristics of hydraulic motors for the rotation and feed drives of drilling tools. **Objectives.** The purpose of the study is to determine directions for improving the performance characteristics of a drilling rig with a hydraulic drilling tool drive through the implementation of hydromechanical regulators in order to increase accuracy, stability, and controllability. **Methods Applied.** The main disturbing, control, and regulating effects acting on the hydraulic drive of the drilling tool are considered. **Originality.** Current trends toward the digitalization of drilling processes, maintenance, planning, and operation recording determine the necessity of considering the hydraulic drive system of the drilling tool integrated with an on-board digital computer as the object of research. **Result.** New hydromechanical regulators for the adaptive drilling process control system are proposed: a pressure regulator, a power regulator, a dynamic pressure regulator, and an LS regulator. The result is achieved through the collection, processing, and utilization of data on the power consumption of the drilling rig drive during transient operating modes under random loading conditions and during idling. The obtained data are used in the corresponding control task of the regulator, which adjusts pump operation by changing its capacity. **Practical Relevance.** The studies have made it possible to form a structural basis for hydraulic drive regulators of drilling rigs aimed at correcting static and dynamic characteristics and to prepare the foundation for the synthesis of regulator structures.

Keywords: hydraulic drive, drilling rig, control system, hydromechanical regulator, structure synthesis, pressure regulator, power regulator

For citation

Tselishchev V.A., Tselishchev D.V. Hydraulic Drive of a Drilling Rig as a Control Object. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 31-39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-31-39>

Введение

Широкое распространение получили буровые установки роторного типа разной мощности и производительности для различных областей применения. Применяют разные методы и принципы управления процессом бурения с различной степенью автоматизации и методами контроля. Показатели процесса бурения, наряду с физико-механическими свойствами породы, зависят от двух рабочих параметров: усилия (скорость) подачи и частоты вращения бурового инструмента. При этом наиболее характерными являются следующие способы их регулирования [1]:

1. Регулирование постоянной величины удельной подачи бурового инструмента. Скорость вращения и давление подачи регулируются.
2. Поддержание постоянной величины момента на буровом инструменте (в теории подачи без прерываний). Скорость вращения регулируется.
3. Поддержание стабильного значения скорости при регулировке усилия подачи.
4. Обеспечение максимальной производительности бурения за счет микропроцессорного управления усилием подачи и скоростью вращения бурового инструмента.
5. Поддержание рационального соотношения скорости вращения и усилия подачи бурового ин-

струмента в зависимости от прочности породы (адаптивное управление параметрами).

Все вышеперечисленные способы характеризуются определенными проблемами в управлении бурением при воздействии факторов, требующих участия оператора бурильной машины.

Принимая во внимание факты, известные из публикаций [2-9], и опыт использования аналогичного адаптивного привода, наиболее целесообразным с точки зрения простоты решения задачи при минимальных затратах является использование адаптивного гидропривода. В этом вопросе представляет интерес концепция управления процессом бурения без привлечения компьютерных технологий. Этот метод известен, он был разработан рядом исследователей и апробирован в промышленности [1, 3]. Адаптивный привод буровой установки автоматически регулирует скорость бурения и параметры для режимов работы, близких к рациональным, при изменении условий работы буровой установки. В данной статье рассматривается возможность автоматизации процесса бурения за счет использования гидравлического привода буровой установки с двумя рабочими движениями (вращение и подача бурового инструмента), который имеет адаптивную структуру. В работе использованы технологии, предложенные автором [10-12] при разработке авиационной техники.

Материалы и методы исследования

В качестве базовой схемы гидравлического привода бурового инструмента предлагается рассмотреть объемный гидропривод, содержащий насосную станцию с нерегулируемым насосом, гидрораспределители управления скоростью вращения и направлением движения инструмента (рис. 1).

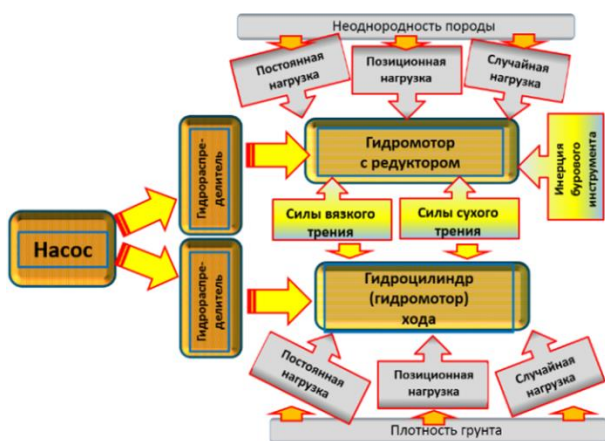


Рис. 1. Функциональная схема привода бурового инструмента
Fig. 1. Functional diagram of the drilling tool drive

Насосная станция содержит один или два насоса с приводом от двигателя внутреннего сгорания, специализированный бак хранения рабочей жидкости, фильтр, возможен теплообменник, предохранительные клапаны. Гидрораспределители могут быть как с ручным, так и с электрическим управлением, включая возможную многокаскадность конструкции. Но в данном контексте гидрораспределители не являются многопозиционными, исключая возможность регулирования величины подачи рабочей жидкости к гидродвигателям. Гидромотор привода вращения бура для повышения крутящего момента и, соответственно, снижения числа оборотов оснащается редуктором. Для осуществления подачи бурового инструмента может быть использован гидроцилиндр с односторонним штоком или гидромотор с редуктором.

Неоднородность породы сказывается прежде всего на нагружающем гидромотор привода бурового инструмента крутящем моменте. На работе гидроцилиндра (гидромотора) привода хода бурового инструмента оказывает влияние плотность перемолотого грунта. В процессе работы гидродвигатели привода бурового инструмента испытывают нагрузки постоянного и позиционного характера и зачастую случайного характера.

Современные тенденции к использованию цифровизации процессов бурения, обслуживания, планирования и регистрации работ определяют возможность рассмотреть в качестве основы объекта исследования схему гидропривода бурового инструмента с применением бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) (рис. 2).

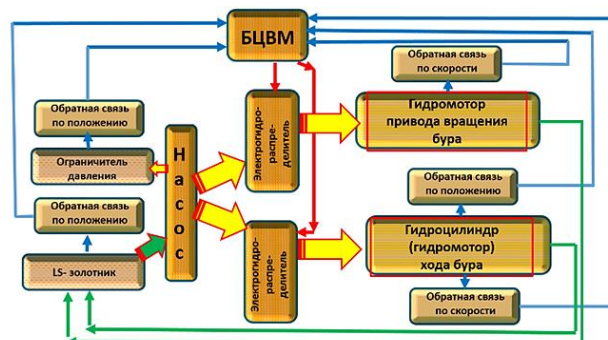


Рис. 2. Функциональная схема электрогидравлического привода бурового инструмента
Fig. 2. Functional diagram of the electrohydraulic drive of the drilling tool

Основной особенностью привода бурового инструмента при использовании БЦВМ является обеспечение информации для моделирования ситуации датчиками обратной связи. Датчики обратной связи устанавливаются на гидродвигатели вращения и подачи бурового инструмента. Они могут быть как электрические, так и гидромеханические или комбинированные. Информационный сигнал определяет действительное положение и скорость рабочего инструмента.

Электрогидрораспределители подачи рабочей жидкости к гидродвигателям могут быть как трехпозиционными, так и многопозиционными. В последнем случае за счет использования БЦВМ привод рабочего органа можно назвать следящим, обеспечивающим контроль управляющих сигналов на работу гидродвигателей. Насос (насосы) может быть регулируемым, как с электрогидравлическим (связанным с БЦВМ), так и гидромеханическим управлением. Насос может иметь датчики обратной связи и ограничитель давления.

Команда от БЦВМ в виде управляющего воздействия поступает на насос, обеспечивая заданный режим работы, и на электрогидрораспределители, обеспечивая в соответствии с неоднородностью и плотностью породы различную скорость работы гидродвигателей привода бурового инструмента. Регулирующие воздействия, отслеживая информацию с датчиков гидродвигателей, включая гидромеханические параметры регулятора чувствительности к нагрузке (LS-регулятор), обеспечивают стабилизацию отработки управляющих сигналов.

В конечном итоге автоматизация работы гидропривода бурового инструмента с использованием БЦВМ приводит к организации работы системы автоматического управления и регулирования (рис. 3).

В качестве первого приближения к пониманию силовой части гидропривода буровой установки как объекта управления и регулирования может послужить схема, приведенная на рис. 4. К исполнительным органам буровой установки прилагаются управляющие, регулирующие и возмущающие воздействия. Управляющие воздействия, исходя из особен-

ностей разрабатываемой породы, определяются оператором установки или БЦВМ. Управляющий сигнал, обеспечивающий установку величины расхода рабочей жидкости, определяющей скорость работы исполнительных гидродвигателей в контурах бурения и подачи бурового инструмента, поступает на многопозиционные гидрораспределители (при дроссельном способе управления) или на регулятор изменения характерного рабочего объема насоса (насосов) (при объемном способе управления). Режим работы буровой установки выбирается на основе условий геологического характера, проектных параметров будущей скважины, обеспечения желательных экономических показателей.



Рис. 3. Схема системы регулирования гидропривода бурового инструмента

Fig. 3. Regulation system scheme of the drilling tool hydraulic drive



Рис. 4. Схема объекта регулирования – гидропривода буровой установки

Fig. 4. Scheme of a regulation object – the hydraulic drive of a drilling rig

Регулирующие воздействия, определяющие режим адаптации к постоянным и случайным нагружающим буровой инструмент воздействиям, могут быть реализованы как на базе насоса, так и на базе гидромоторов привода бурового устройства. Регулятор топливоподачи двигателя внутреннего сгорания (ДВС) обеспечивает поддержание постоянных оборотов двигателя независимо от потребляемой насосом мощности.

По большому счету, в объекте регулирования могут быть использованы датчики, формирующие различные информационные сигналы и подаваемые как

на регуляторы, так и на БЦВМ. Это могут быть гидромеханические датчики, определяющие величину давления в полостях гидродвигателей, а значит, и величину нагрузки. Датчики перемещения штока гидродвигателя подачи бурового инструмента, датчики перемещения гидроцилиндров управления характерным рабочим объемом насоса, датчики скорости вращения вала гидромоторов, датчики перемещения золотников электрогидрораспределителей, датчик скорости оборотов приводного ДВС. Кроме того, возможно использование датчиков гидродинамики и утечек рабочей жидкости.

Возмущающие воздействия определяют нагрузку на гидропривод бурового инструмента. Нагрузки можно разделить на три вида: статические, динамические и трения.

Статическая нагрузка возникает как при вращении бурового инструмента, так и при его возвратно-поступательном движении. В определенной степени эту нагрузку можно назвать и позиционной, определяемой положением бурового инструмента в грунте.

Динамическая нагрузка определяется особенностью работы буровой установки, пласты породы всегда имеют разную плотность и физико-механические свойства. Случайный характер мгновенной нагрузки определить затруднительно даже при подробном анализе структуры породы. Неравномерная мгновенная нагрузка при бурении горной породы с чередующимися слоями разной плотности существенно сказывается на работе гидропривода. Необходимо учесть и возможные вибрации бурового инструмента как в процессе работы, так и в период заклинивания с последующим резким освобождением.

Нагрузки, вызванные трением в устройствах привода бурового инструмента, трением инструмента в породе, являются сложными для определения и моделирования. Тем не менее следует учесть наличие как сухого, так и вязкого трения, приводящего к погрешностям и неустойчивости в работе буровой установки.

Анализ сложного характера действующих на буровой инструмент нагрузок статического и динамического характера требует разработки теории системы автоматического регулирования буровых установок, разработки регуляторов адаптации к проблемам бурения скважин. Определенными преимуществами в системах автоматического регулирования обладают гидромеханические регуляторы, прежде всего благодаря высокой надежности и независимости от работы БЦВМ. Ниже будут рассмотрены варианты организации гидромеханических регуляторов привода бурового инструмента, в основу которых положены технологии организации систем регулирования авиационной техники [10-12].

Полученные результаты и их обсуждение

Гидропривод буровой установки с регулятором давления. В данной схеме гидропривода обеспечивается поддержание постоянного давления в гидроси-

стеме вне зависимости от однородности грунта и воздействия случайных нагрузок. В режиме «холостого хода» гидросистема обеспечивает минимальное потребление энергии за счет вывода насоса на минимальную производительность. При бурении жидкость подается в гидроцилиндры гидромеханического регулятора давления, который путем изменения характерного рабочего объема насоса подстраивает насос под режим бурения и обеспечивает заданный постоянный уровень давления в системе.

Гидропривод буровой установки работает следующим образом. Рабочая жидкость из линии бака 6 подается насосом 1 к гидромотору вращения бура 3 и гидроцилиндру подачи бура 4 (рис. 5, а). При подаче соответствующего электронного управляющего сигнала на многопозиционные электрогидрораспределители 8 осуществляется подключение гидромотора 3 и гидроцилиндра 4 к линии нагнетания насоса 1 и определяет режим работы. Рабочий ход гидродвигателей осуществляется со скоростью, определяемой величиной управляющих сигналов. При реверсе гид-

рораспределителей 8 осуществляется реверс гидродвигателей (гидромотора и гидроцилиндра) буровой установки. Предохранительные клапаны 5 предотвращают поломку гидропривода вследствие перегрузки или засорения фильтра. Всасывая жидкость из бака 6, насос 1 компенсирует в том числе и объёмные утечки в гидродвигателях.

Принцип работы регулятора давления следующий: при отсутствии управляющего сигнала на электрогидрораспределителях 8 насос 1 выходит на минимальную производительность, при этом с помощью гидроцилиндра 11 обеспечивается минимальный характерный рабочий объем насоса. Поршень цилиндра 12 смещается в крайнее левое положение. Давление в системе поддерживается на постоянном уровне, соответствующем номинальному значению подачи насоса. При подаче управляющего сигнала на электрогидрораспределители 8 вал гидромотора 3 начинает вращать буровой инструмент через редуктор. За подачу бурового инструмента отвечает гидроцилиндр 4.

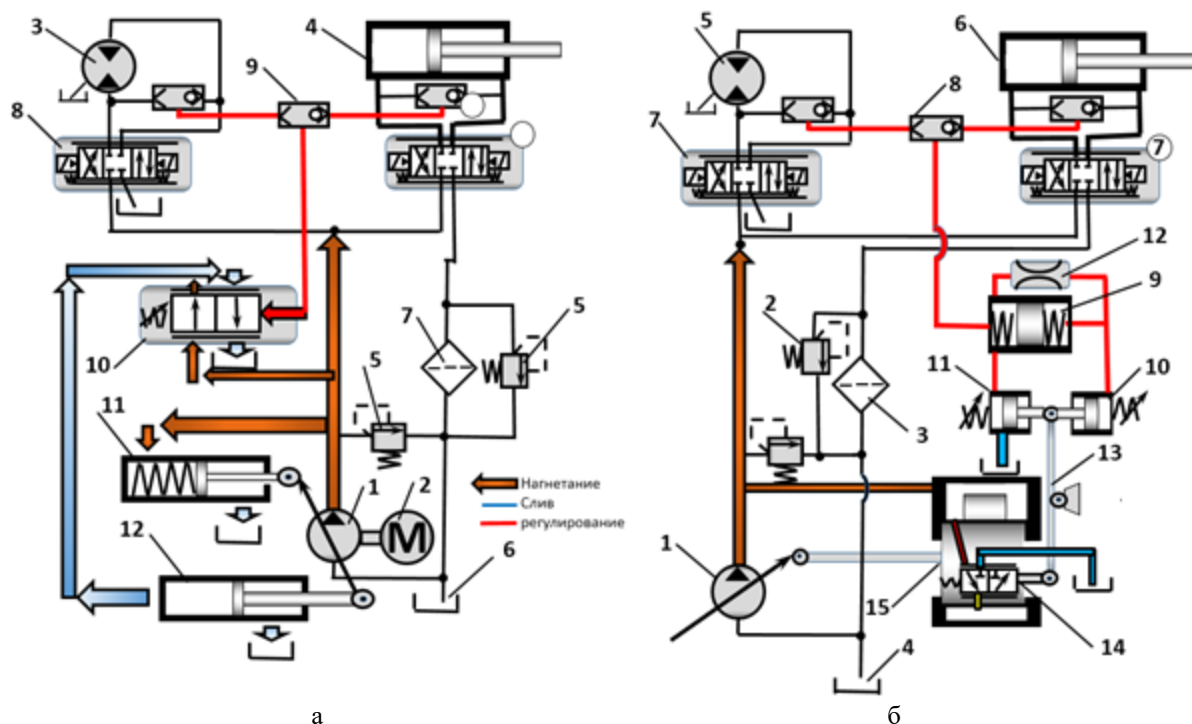


Рис. 5. Гидропривод буровой установки: а – с регулятором давления: 1 – насос; 2 – ДВС; 3 – гидромотор; 4 – гидроцилиндр; 5 – клапан предохранительный; 6 – бак; 7 – фильтр; 8 – электрогидрораспределитель; 9 – клапан «или»; 10 – гидрораспределитель; 11, 12 – гидроцилиндры; б – с регулятором обратной связи по динамическому давлению: 1 – насос; 2 – клапан предохранительный; 3 – фильтр; 4 – бак; 5 – гидромотор; 6 – гидроцилиндр; 7 – электрогидрораспределитель; 8 – клапан «или»; 9-11 – плунжеры; 12 – дроссель; 13 – коромысло; 14 – гидрораспределитель; 15 – толкатель-золотник

Fig. 5. Hydraulic drive of the drilling rig: а is with pressure regulator: 1 is pump; 2 is internal combustion engine; 3 is hydraulic motor; 4 is hydraulic cylinder; 5 is safety valve; 6 is tank; 7 is filter; 8 is electrohydraulic distributor; 9 is shuttle valve; 10 is hydraulic distributor; 11, 12 are hydraulic cylinders; б is with dynamic pressure feedback regulator: 1 is pump; 2 is safety valve; 3 is filter; 4 is tank; 5 is hydraulic motor; 6 is hydraulic cylinder; 7 is electrohydraulic distributor; 8 is shuttle valve; 9-11 are plungers; 12 is throttle; 13 is rocker arm, 14 is hydraulic distributor, 15 is spool plunger

Потребный расход рабочей жидкости от насоса растет, давление падает. Для компенсации снижения давления регулятор давления, а именно пружина пропорционального гидрораспределителя 10, смещает управляющий золотник на величину, пропорциональную снижению давления в системе. При этом через пропорциональный гидрораспределитель 10 в поршневую полость гидроцилиндра 12 подается жидкость, что приводит к увеличению характерного рабочего объема насоса 1 и увеличению его подачи, что компенсирует снижение давления в системе вплоть до номинального значения. Регулятор обеспечивает создание оптимального давления для преодоления нагрузки на валу гидромотора и гидроцилиндра подачи бурового инструмента, тем самым обеспечивая энергоэффективность гидропривода. При превышении нагрузки на буровом инструменте вследствие изменения состава грунта давление в системе закономерно возрастает и регулятор, чувствительный к давлению, с помощью клапанов «или» уменьшает подачу насоса и поддерживает в системе постоянное давление. Таким образом, регулятор обеспечивает постоянный момент на буровом инструменте, но с меньшей частотой вращения и скоростью подачи. В обратной ситуации – в случае уменьшения величины нагрузки на буровом инструменте – регулятор увеличивает подачу насоса 1, что приводит к увеличению скорости вращения и подачи бурового инструмента. Регулятор давления обеспечивает автоматическое регулирование работы бурового инструмента с учетом неоднородности грунта и глубины бурения.

Гидропривод буровой установки с регулятором обратной связи по динамическому давлению. Неустойчивость при работе буровой установки на резонансных частотах при случайном динамическом воздействии на рабочие органы со стороны породы приводит к неконтролируемому изменению давления рабочей жидкости в гидросистеме как на гидромоторе привода вращения бура, так и на выходе гидроцилиндра подачи бура. Для компенсации динамического воздействия на гидродвигатели буровой установки пульсаций позиционной и инерционной нагрузок необходимо использовать скорость изменения давления в гидросистеме.

Задача повышения надежности работы гидропривода рабочего органа буровой машины, увеличение точности и устойчивости при работе на резонансных частотах при воздействии позиционных и инерционных нагрузок случайного характера вследствие изменения структуры породы решается за счет использования дополнительной обратной связи. В зависимости от действительной величины колебаний давления перед гидродвигателями дополнительная гидромеханическая обратная связь по динамическому давлению изменяет характерный рабочий объем насоса.

Гидропривод с регулятором обратной связи по динамическому давлению (рис. 5, б) задействуется на высоких частотах вращения бурового инструмента, при случайном резком изменении позиционной и инерционной нагрузок на рабочих органах. Опережающий сигнал гибкой обратной связи, формируемой гидравлическим конденсатором в виде подпружиненного плунжера 9 и

сопротивлением 12, приводит с помощью перемещения плунжеров 10 и 11 к повороту коромысла 13 и соответствующему смещению распределителя 14 и толкателя-золотника 15. Точность работы при больших частотах вращения обеспечивается за счет перемещения толкателя-золотника 15, механически связанного с насосом 1, что приводит к изменению характерного рабочего объема насоса 1 в соответствии с корректирующим сигналом гидромеханического устройства обратной связи.

Гидропривод буровой установки с регулятором мощности. Для устранения неустойчивой работы буровой установки при случайной и попутной нагрузке, значительного потребления мощности при работе на малых режимах, статической ошибки, обусловленной взаимным влиянием контуров вращения и подачи бурового инструмента друг на друга при различной нагрузке на исполнительных гидродвигателях рекомендуется к применению гидромеханический регулятор мощности (рис. 6, а).

Регулятор мощности работает следующим образом: при отсутствии сигналов управления на электрогидрораспределителя 8 насос 1 выходит на минимальную производительность, контролируя с помощью гидроцилиндра 10 минимальный характерный рабочий объем насоса 1. Поршень цилиндра 11 при этом смещается в крайнее левое положение. Давление в системе поддерживается постоянным, на номинальном значении. При подаче сигналов управления на электрогидрораспределителя 8 вал гидромотора 3 через редуктор начинает вращать бур установки, а гидроцилиндр 4 осуществляет подачу бура. Потребление рабочей жидкости от насоса возрастает.

Регулирование мощности насоса 1 осуществляется бесступенчатым изменением его производительности пропорционально давлению нагрузки случайного или нестационарного характера на исполнительных гидродвигателях 3 и 4, подаваемого к гидроцилиндрам 10 и 11 механизма управления характерным рабочим объемом насоса. Рабочее давление, соответствующее действительным нагрузкам на гидромотор привода бура 3 и гидроцилиндр подачи 4, передается через гидроцилиндр 10 на коромысло 12 и на насос 1. Противодействующей силой пружины многопозиционного гидрораспределителя 13, настраиваемой извне, задается уровень мощности. Если сила действия давления превышает силу пружины, то поршень гидроцилиндра 10 плавно смещается в сторону уменьшения рабочего объема насоса. При этом увеличивается действующая длина рычага на коромысло 12, способствующего перемещению многопозиционного распределителя 13 и соединению поршневой полости гидроцилиндра 11 с линией слива. Это, в свою очередь, позволяет бесступенчато изменять рабочий объем насоса пропорционально давлению нагрузки случайного или нестационарного характера на исполнительных гидродвигателях 3 и 4, контролируя произведение величин давления за насосом и характерного объема насоса величиной постоянной, что позволяет регулятору обеспечивать постоянство потребляемого момента и потребляемой мощности.

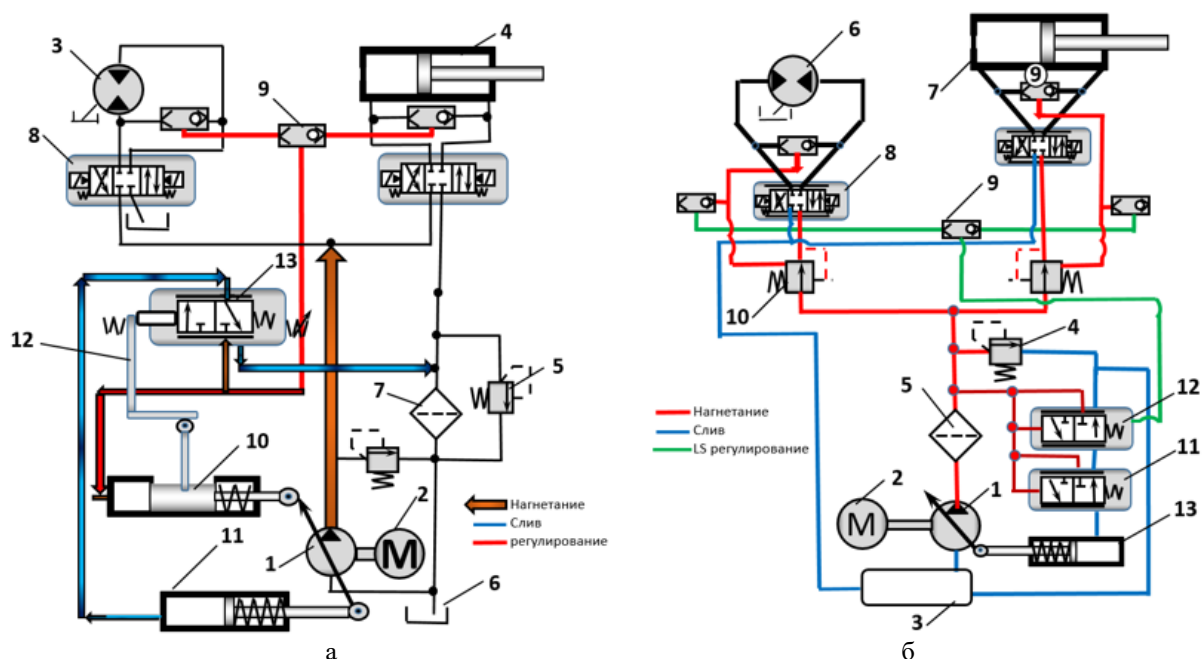


Рис. 6. Гидропривод буровой установки: а – с регулятором мощности: 1 – насос; 2 – ДВС; 3 – гидромотор; 4 – гидроцилиндр; 5 – клапан предохранительный; 6 – бак; 7 – фильтр; 8 – электрогидрораспределитель; 9 – клапан «или»; 10, 11 – гидроцилиндры; 12 – коромысло, 13 – гидрораспределитель; б – с LS-регуляцией: 1 – насос; 2 – ДВС; 3 – бак; 4 – клапан предохранительный; 5 – фильтр; 6 – гидромотор; 7 – гидроцилиндр; 8 – электрогидрораспределитель; 9 – клапан «или»; 10 – клапан предохранительный; 11 – клапан; 12 – клапан компенсации давления; 13 – гидроцилиндр

Fig. 6. Hydraulic drive of the drilling rig: а is with power regulator: 1 is pump; 2 is ICE; 3 is hydraulic motor; 4 is hydraulic cylinder; 5 is safety valve; 6 is tank; 7 is filter; 8 is electrohydraulic distributor; 9 is shuttle valve; 10, 11 are hydraulic cylinders; 12 is rocker arm, 13 is hydraulic distributor; б is with LS - regulation: 1 is pump; 2 is ICE; 3 is tank; 4 is safety valve; 5 is filter; 6 is hydraulic motor; 7 is hydraulic cylinder; 8 is electrohydraulic distributor; 9 is shuttle valve; 10 is safety valve; 11 is valve; 12 is pressure compensation valve; 13 is hydraulic cylinder

В системе обеспечивается оптимальное потребление мощности на переходных режимах при случайной нагрузке и при работе в режиме «холостого хода» на минимальном потреблении мощности за счет регулирования насоса. Изменение давления в системе, вызванное неоднородностью грунта и, как следствие, изменением нагрузки запланированного или случайного характера, передается на гидроцилиндры гидромеханического регулятора мощности, которые изменяют характерный рабочий объем насоса, подстраиваясь под ситуацию и обеспечивая потребление мощности по оптимальной гиперболической зависимости.

Гидропривод буровой установки с LS-регуляцией. Обеспечение нечувствительности к нагрузке гидропривода рабочего органа буровой машины, исключение взаимного влияния контуров гидропривода друг на друга, повышение КПД и устойчивости с сохранением массогабаритных характеристик достигается путём внедрения в гидропривод чувствительной к нагрузке системы регулирования (LS-регуляция).

Регулятор чувствительности по нагрузке (LS-регулятор) (рис. 6, б) способен корректировать рабо-

ту гидропривода рабочего органа буровой машины (скорость перемещения штока гидроцилиндра хода и частоту вращения гидромотора привода бура) в зависимости от различных видов нагрузки разной величины, действующих извне на рабочие органы буровой установки со стороны породы. В начальный момент времени при отсутствии сигналов управления на многопозиционные электрогидрораспределители 8 пружины выставляют золотники многопозиционных электрогидрораспределителей 8 в нейтральное положение. Но так как проходные сечения золотников закрыты, то связанное с этим повышение давления посредством воздействия на золотник клапана 11 перемещает его, подавая давление к поршню управляющего цилиндра 13 насоса 1 и выводит насос на минимальную производительность, а исполнительные гидродвигатели 6 и 7 не перемещаются.

Клапан компенсации давления 12 встроен в LS-систему управления. Когда давление на выходе насоса достигает значения, установленного клапаном компенсации давления 12, происходит уменьшение подачи насоса для ограничения давления в системе.

При подаче управляющего сигнала на многопозиционные электрогидрораспределители 8 их золотники перемещаются пропорционально входному сигналу и рабочая жидкость поступает в рабочие полости гидромотора привода бура 6 и гидроцилиндра подачи бура 7. При этом другие полости гидродвигателей соединяются со сливом. Давление после многопозиционных электрогидрораспределителей 8 определяется действующими на гидродвигатели (механически связанных с устройством бурения) нагрузками. Клапан постоянного перепада давления 10 фиксирует это изменение давления и открывается, пропуская расход и создавая давление, достаточное для преодоления внешней нагрузки. В результате открытия клапана 10 давление до него падает и поршень управляющего цилиндра регулятора 13 основного насоса 1 перемещается под действием пружины, рабочий объем насоса 1 увеличивается. Это приводит к увеличению перепада давлений на исполнительных гидродвигателях 6 и 7 и, соответственно, к увеличению частоты вращения гидромотора привода бура 6, а также скорости перемещения поршня гидроцилиндра подачи бура 7, что соответствует управляющему сигналу согласно программе управления. Номинальное давление в системе регулирования устанавливается в соответствии с текущей нагрузкой, для чего с помощью клапанов «или» 9 отбирается давление из наиболее нагруженного контура и сообщается на клапан компенсации давления 12 регулятора насоса 1. Регулятор выставляет давление питания гидродвигателей, достаточное для преодоления внешней нагрузки и обеспечивающее наилучшие энергетические характеристики.

Таким образом, предлагаемый гидромеханический регулятор с LS-регулированием позволяет улучшить устойчивость хода и энергетическую эффективность управления устройствами гидропривода рабочего органа буровой машины за счет исключения взаимного влияния гидравлических контуров друг на друга путем использования в гидроприводе чувствительной к нагрузке системы регулирования. Это позволяет обеспечить независимость работы привода при изменении нагрузки на гидродвигателях привода, необходимый индивидуальный расход и давление в гидроприводе.

Заключение

Совершенствование гидропривода рабочего органа буровой машины целесообразно направлять в развитие электрогидравлических систем управления приводом подачи и частотой вращения бурового инструмента. Для повышения точности, устойчивости, управляемости системы автоматического управления и регулирования гидропривода рабочего органа буровой машины желательно использовать гидромеханические регуляторы.

В качестве гидромеханических регуляторов, обладающих высокой надежностью и полностью авто-

матизированной работой, можно предложить регулятор давления, регулятор динамического давления, регулятор мощности и LS-регулятор. Это позволило сформировать структурную базу регуляторов гидропривода буровой установки для коррекции статических и динамических характеристик и подготовить основу для синтеза структуры регуляторов.

Определены факторы многокритериальных сигналов управления и компенсации внешних воздействий комбинированного типа и характер их влияния на формирование совокупных гидромеханических и электрогидравлических эффектов, осуществляющих коррекцию и регулирование статических и динамических характеристик гидропривода буровой машины.

Список источников

1. Yuanling Shi, Pingsong Zhang Modeling and Dynamic Performance Analysis of Hydraulic Top Drive Main Transmission System with Long Hydraulic Pipelines // *Hindawi Geofluids Volume 2022*, Article ID 1304176, 15 pages. DOI:10.1155/2022/1304176.
2. Mikhail Lemesko, Inessa Deyneka, Aleksey Iliev. Providing adaptive properties of the drive of a rotary drilling machine// *MATEC Web of Conferences*, 2020, 329, 03001, ICMTE 2020.
3. Vardhan, A. Comparison of the steady-state performance of hydrostatic drives used in the rotary head of the drill machine / A. Vardhan, K. Dasgupta, N. Kumar // *J Braz Soc Mech Sci Eng* 39:4403–4419.
4. Савченков К.А., Вербицкий С.В., Лобанов А.В. Мобильные ледостойкие буровые установки. Обзор мирового опыта // *Труды Крыловского государственного НЦ*. 2024. Т. 2, № 408. С. 157-168.
5. Ракуленко С.В., Дергачева Л.В., Грищенко В.И. Гидропривод рабочих движений мобильной буровой установки с функцией мониторинга технологического процесса бурения // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2024. №1. С. 427-435.
6. Pershin V.A., Khinikadze T.A. Technique of functional unification of adaptive hydraulic drive module capable of load stabilization on the working body of mobile machines // *Vestnik Don State Tech Univer*. 2018, 18(3), pp. 318–325. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-3-318-325>.
7. Lemesshko M.A., Stradanchenko S.G., Iliev A.G. Study of adaptive hydraulic drive of rotary drilling machine// *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019, 680, 012006, DTS-2019.
8. Васильев В.Б., Муслимов А.П., Васильев В.А. Экспериментальное исследование автоматического регулятора расхода жидкости для гидравлической буровой машины // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2020. Т. 7. № 2. С. 130-133.
9. Адаптивный гидропривод с объемным регулированием подачи инструмента технологической машины / Сидоренко В.С., Грищенко В.И., Ракуленко С.В., Полешкин М.С. // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2017. №2(89). С. 88-98.

10. Целищев В.А. Гидропривод квадрокоптера как объект регулирования // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2025. № 2. С. 6-25.
11. Petrov P.V., Tselishchev V.A., Kuderko D.A. Numerical study of nonlinear hydromechanical aircraft systems // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024. Т. 58. № 3. С. 917-922.
12. Петров П.В., Целищев В.А., Кудерко Д.А. Основные подходы и особенности проектирования гидромеханических систем управления самолёта // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2024. Т. 23. № 1. С. 67-79.
6. Pershin V.A., Khinikadze T.A. Technique of functional unification of adaptive hydraulic drive module capable of load stabilization on the working body of mobile machines. *Vestnik Don State Technical University*. 2018;18(3):318-325. doi:10.23947/1992-5980-2018-18-3-318-325
7. Lemeshko M.A., Stradanchenko S.G., Iliev A.G. Study of adaptive hydraulic drive of rotary drilling machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;680. article 012006, DTS-2019.
8. Vasilev V.B., Muslimov A.P., Vasilev V.A. Experimental study of an automatic fluid flow regulator for a hydraulic drilling machine. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk* [Fundamental and Applied Problems of Mining Sciences]. 2020;7(2):130-133. (In Russ.)
9. Sidorenko V.S., Grishchenko V.I., Rakulenko S.V., Poleshkin M.S. Adaptive hydraulic drive with volumetric regulation of tool feed in a process machine. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Don State Technical University]. 2017;(2(89)):88-98. (In Russ.)
10. Tselishchev V.A. Hydraulic drive of a quadcopter as a control object. *Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk* [Crede Experto: Transport, Society, Education, Language]. 2025;(2):6-25. (In Russ.)
11. Petrov P.V., Tselishchev V.A., Kuderko D.A. Numerical study of nonlinear hydromechanical aircraft systems. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024;58(3):917-922.
12. Petrov P.V., Tselishchev V.A., Kuderko D.A. Main approaches and features of aircraft hydromechanical control system design. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aero-kosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering]. 2024;23(1):67-79. (In Russ.)

References

1. Shi Y., Zhang P. Modeling and dynamic performance analysis of hydraulic top drive main transmission system with long hydraulic pipelines. *Geofluids*. 2022;15. article ID 1304176 doi:10.1155/2022/1304176
2. Lemesko M., Deyneka I., Iliev A. Providing adaptive properties of the drive of a rotary drilling machine. *MATEC Web of Conferences*. 2020;329. article 03001, ICMTME.
3. Vardhan A., Dasgupta K., Kumar N. Comparison of the steady-state performance of hydrostatic drives used in the rotary head of the drill machine. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2017;39:4403-4419.
4. Savchenkov K.A., Verbitskii S.V., Lobanov A.V. Mobile ice-resistant drilling rigs. Review of global experience. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Transactions of the Krylov State Research Centre]. 2024;2(408):157-168. (In Russ.)
5. Rakulenko S.V., Dergacheva L.V., Grishchenko V.I. Hydraulic drive of working motions of a mobile drilling rig with drilling process monitoring function. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences]. 2024;(1):427-435. (In Russ.)

Поступила 25.11.2025; принята к публикации 16.04.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 25/11/2025; revised 16/04/2026; published 30/06/2026

Целищев Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор,
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: pgl.ugatu@mail.ru. ORCID 0009-0002-1329-0732

Целищев Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент,
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: nuked@mail.ru. ORCID 0000-0001-5141-7904

Vladimir A. Tselishchev – DrSc (Eng.), Professor,
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: pgl.ugatu@mail.ru. ORCID 0009-0002-1329-0732

Dmitry V. Tselishchev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: nuked@mail.ru. ORCID 0000-0001-5141-7904

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.271.7:621
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-40-46



БЕСТРАНСПОРТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВСКРЫШНЫХ РАБОТ ДЛЯ ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Максимов М.С.

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН, Якутск, Россия

Аннотация. В статье изложены результаты исследований по адаптации бестранспортной технологии разработки вскрышных пород к условиям криолитозоны, ведущиеся в ИГДС СО РАН, г. Якутск. В научных исследованиях значительное внимание уделяется вопросам улучшения бестранспортной разработки месторождений. Как известно, бестранспортная технология разработки является наиболее экономичной в сравнении с другими технологиями. Однако в основном исследования сосредоточены на условиях разработки месторождений, расположенных в умеренных широтах, а не в территориях, где присутствует вечная мерзлота. Отрицательная температура горных пород на таких месторождениях придает им высокую прочность, что делает буровзрывное рыхление обязательным технологическим процессом по подготовке пород к выемке. Однако после взрыва взорванная горная масса склонна к повторному смерзанию, что значительно затрудняет экскавацию и снижает эффективность бестранспортной технологии. В результате разработка таких повторно смерзшихся многолетнемерзлых горных пород драглайном в разы увеличивает его время рабочего цикла и приводит к значительному снижению общей производительности экскаватора. Данная проблема является общей для угольных предприятий Арктического региона и предопределяет необходимость поиска и разработки специальных технологических решений. В статье представлены проведенные исследования особенностей бестранспортной технологии разработки многолетнемерзлых горных пород (на примере Кангаласского бурогоугольного месторождения) в суровых природно-климатических условиях Севера, которые направлены на решение задач по оптимизации и адаптации существующих, а также новых эффективных способов разработки угольных месторождений криолитозоны. Разработанные способы и технологические решения направлены на снижение нежелательных последствий повторного смерзания взорванных многолетнемерзлых горных пород, а также обеспечение эффективной работы выемочной техники в условиях месторождений в зоне вечной мерзлоты.

Ключевые слова: бестранспортная технология, драглайн, криолитозона, многолетнемерзлые горные породы, повторное смерзание

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2026-0052, регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР 126021217278-1).

© Максимов М.С., 2026

Для цитирования

Максимов М.С. Бестранспортная технология вскрышных работ для пластовых месторождений в зоне вечной мерзлоты // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 40-46. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-40-46>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

NON-TRANSPORT OVERBURDEN MINING TECHNOLOGY FOR STRATIFIED DEPOSITS IN THE PERMAFROST ZONE

Maksimov M.S.

N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Abstract. The article presents the results of research on adapting the non-transport overburden mining technology to the conditions of the cryolithozone, conducted at the Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (MIN SB RAS), Yakutsk. Considerable attention in scientific research is devoted to improving non-transport mining methods. As is well known, non-transport mining technology is the most cost-effective compared to other mining technologies. However, most studies are focused on deposits located in temperate latitudes rather than in permafrost regions. The negative temperature of rocks at such deposits gives them high strength, making drilling and blasting operations a mandatory technological process for rock preparation prior to excavation. However, after blasting, the fragmented rock mass tends to refreeze, which significantly complicates excavation and reduces the efficiency of non-transport mining technology. As a result, the development of such refrozen permafrost rocks by dragline considerably increases the operating cycle time and leads to a substantial decrease in the overall productivity of the excavator. This problem is common for coal enterprises in the Arctic region and determines the need for the search and development of special technological solutions. The article presents studies of the specific features of non-transport mining technology for permafrost rocks (using the Kangalassky brown coal deposit as an example) under the severe natural and climatic conditions of the North. These studies are aimed at solving problems related to the optimization and adaptation of existing as well as new efficient methods for mining coal deposits in the cryolithozone. The developed methods and technological solutions are intended to reduce the adverse effects of the refreezing of blasted permafrost rocks and to ensure the efficient operation of excavation equipment under permafrost conditions.

Keywords: non-transport technology, dragline, cryolithozone, permafrost rocks, refreezing

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FWRS-2026-0052, registration No. 126021217278-1).

For citation

Maksimov M.S. Non-Transport Overburden Mining Technology for Stratified Deposits in the Permafrost Zone. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 40-46. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-40-46>

Введение

Бестранспортная технология вскрышных работ как наиболее экономичная нашла широкое применение на многих месторождениях твердых полезных ископаемых в самых разных горно-геологических условиях. Суть бестранспортной технологии экскаваторной перевалки пород в отработанное пространство заключается в следующем: экскаваторы перемещают вскрышные породы, извлеченные из массива, на ближайшую свободную площадку по кратчайшему расстоянию. Эта площадка образуется после добычи полезного ископаемого.

Обычно выделяют два основных типа таких технологических схем перевалки вскрышных пород: простые и усложненные. Основным технологическим признаком бестранспортных схем горных работ является наличие вторичного отвала. По этому признаку схемы подразделяются на простые (без перевалки вскрышных пород) и усложненные (с одной или несколькими перевалками части или всего объема первичного отвала). При этом степень засыпки первич-

ным отвалом выработанного пространства является вторичным технологическим признаком, по которому выделяются семь вариантов простых и усложненных бестранспортных схем, согласно классификации М. П. Васильева [1].

Например, для простых бестранспортных схем это схема с оставлением площадки на почве пласта, схема без оставления площадки на почве пласта, схема с частичной подвалкой добычного уступа, схема с подвалкой всего добычного уступа, схема с частичной засыпкой транспортной площадки на кровле пласта, схема с засыпкой всей транспортной площадки на кровле пласта и схема с подвалкой вскрышного уступа.

Наиболее экономичным из существующих схем экскавации является схема с простой или кратной экскаваторной перевалкой вскрышных пород в отработанное пространство. Такие схемы эффективны при разработке месторождений с горизонтальным или пологим залеганием пласта, при этом мощность залежи не должна превышать 20-30 м, а мощность вскрышных пород – 40-45 м. С учетом ухудшения

горнотехнических условий отработки месторождений, ростом глубины карьеров, возрастания мощности вскрышных пород наибольшее развитие в настоящее время бестранспортная технология находит также в комбинированных системах разработки.

Основные направления исследований и усовершенствования бестранспортной технологии сосредоточено на следующих аспектах:

- расширение области применения: увеличение использования бестранспортной технологии вскрышных работ на месторождениях открытой разработки твердых полезных ископаемых [2];
- оптимизация перемещения породы: совершенствование технологических схем для минимизации объемов переэкскавации [3];
- изменение конструктивных параметров угла откоса: повышение угла откоса борта разреза в зоне бестранспортной технологии за счет увеличения высоты и углов откосов вскрышных уступов [4];
- улучшение применяемого оборудования: оптимизация параметров драглайна и производительности [5-8];
- повышение эффективности взрывных работ: использование более дешевых ВВ и совершенствование схем взрывания [9];
- модернизация драглайнов: обновление конструкции, механизмов и рабочего органа [10, 11];
- автоматизация: внедрение автоматизации технологического процесса драглайна, автоматического управления им и процессом транспортирования ковшом, а также разработка современных интеллектуальных алгоритмов для управления транспортными операциями [12, 13].

Основная часть

Республика Саха (Якутия) играет важнейшую роль в горнодобывающей промышленности Российской Федерации, где разработка месторождений полезных ископаемых ведется в экстремальных природно-климатических условиях вечной мерзлоты. На таких месторождениях мерзлые горные породы имеют отрицательную температуру, что придает им по-

вышенную прочность и требует обязательного предварительного буровзрывного рыхления. Однако даже после взрывания, особенно в весенне-летний период года, взорванная горная масса склонна к повторному смерзанию. Это явление значительно затрудняет процесс экскавации, резко снижает производительность выемочной техники, делая невозможным черпание горной породы, что приводит к простоям. Несмотря на обширные исследования по оптимизации бестранспортной разработки пластовых месторождений, большая часть этих работ ориентирована на месторождениях умеренных широт с мягким климатом. Таким образом, специфика повторного смерзания взорванных многолетнемерзлых горных пород в условиях месторождений криолитозоны остается недостаточно изученной.

В ИГДС СО РАН на протяжении многих лет ведутся исследования, направленные на адаптацию бестранспортной технологии разработки вскрышных пород к условиям криолитозоны. Для решения поставленной задачи были проанализированы закономерности формирования температурного режима горной породы в рабочем забое драглайна. Особое внимание уделялось условиям экскавации взорванных вскрышных пород, склонных к повторному смерзанию, в различные периоды года. В результате этих работ была установлена зависимость между производительностью драглайна и температурой породы в забое в течение календарного года (**рис. 1**).

Исследования выявили, что в весенне-летний период года температура верхнего слоя отбитой породы определяется двумя ключевыми факторами: объемом холода, аккумулированного за зиму, и интенсивностью солнечного излучения. В осенне-зимний период, напротив, температурный режим поверхностного слоя формируется под влиянием тепловой инерции массива, прогретого в летние месяцы, а также воздействия низких температур окружающей среды. Кроме того, было установлено, что продолжительность рабочего цикла драглайна в течение года варьируется в зависимости от температуры горных пород в забое (**рис. 2**).

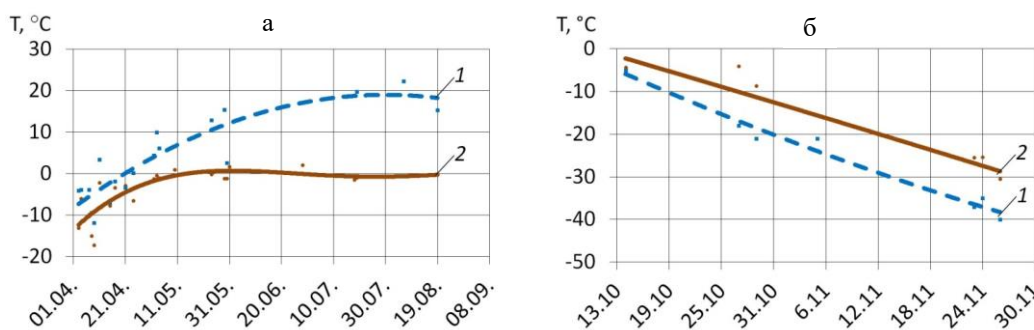


Рис. 1. Графики изменения температуры пород в забое в различные периоды года: а – весенне-летний; б – осенне-зимний; 1 – температура воздуха; 2 – температура пород в забое

Fig. 1. Graphs of rock temperature variation in the working face during different periods of the year: a is spring-summer period; б is autumn-winter period; 1 is air temperature; 2 is rock temperature in the working face

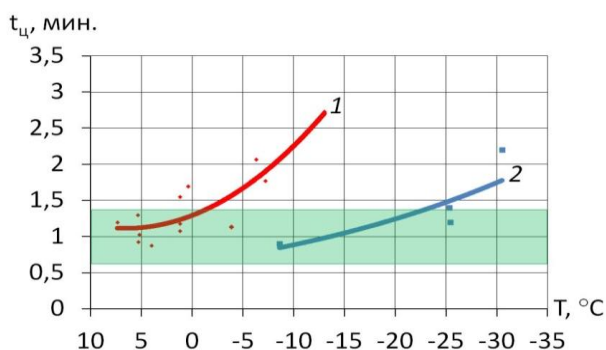


Рис. 2. Изменение продолжительности рабочего цикла драглайна от температуры горных пород в забое: 1 – весенне-летний период; 2 – осенне-зимний период

Fig. 2. Variation in dragline operating cycle duration depending on rock temperature in the working face: 1 is spring-summer period; 2 is autumn-winter period

Согласно данным, полученным в ходе натурных исследований, снижение производительности работ особенно происходит в летний период. Это явление обусловлено тем, что, несмотря на положительные значения температуры поверхностного слоя породы, внутри забоя экскаватора температура имеет отрицательные значения. Создаются тем самым благоприятные условия для повторного смерзания взорванной горной массы. В таких условиях экскаватор вынужден вести отработку забоя по всей ширине заходки, что влечет за собой вынужденные потери времени на «выкапывание» отдельных кусков и горной массы, а также частое холостое черпание для наполнения ковша и периодическое изменение угла работ.

Исходя из вышеизложенного, для определения времени рабочего цикла драглайна для этих периодов было предложено использовать отдельные эмпирические зависимости:

– весна-лето:

$$T_{ц} = e^{0,34-0,044T_{п}+9,58\cdot 10^{-4}T_{п}^2} \text{ мин};$$

– осень-зима:

$$T_{ц} = 0,63e^{-0,03T_{п}} \text{ мин},$$

где $T_{п}$ – температура горных пород в забое, °C.

При прочих равных условиях эффективность применения бестранспортной технологии в значительной степени определяется горно-геологическими и горнотехническими условиями разрабатываемого месторождения, конструктивными параметрами отвала, физико-механическими свойствами складываемых пород, технологическими схемами экскавации породной массы. Для условий разреза «Кангаласский» предложены технологические схемы ведения горных работ, включающие отработку внешней и внутренней вскрыши (междупластья) по бестранспортной технологии [14].

На основе анализа температурных полей и прочностных характеристик взорванного смерзающегося массива горных пород разработана новая схема отработки экскаваторного блока. Она предусматривает последовательное удаление оттаявшего слоя породы по всей длине блока (рис. 3). Для этого драглайн размещается либо на временном отвале, либо у границы выработанного пространства, что позволяет экскаватору перемещать породу на большее расстояние. При расположении на временном отвале драглайн сначала последовательно удаляет оттаявший слой, создавая себе горизонтальную площадку, а затем перегружает оставшуюся породу во внутренний отвал. По этой подготовленной площадке экскаватор перемещается, также удаляя оттаявший слой по всей длине блока, после чего возвращается на исходную позицию для снятия следующего слоя. Преимуществами такого метода являются снижение коэффициента переэкскавации, увеличение приемной способности отвалов и объема обрабатываемой вскрыши. Однако недостатком является увеличение продолжительности рабочего цикла драглайна из-за необходимости поворота на 180°.

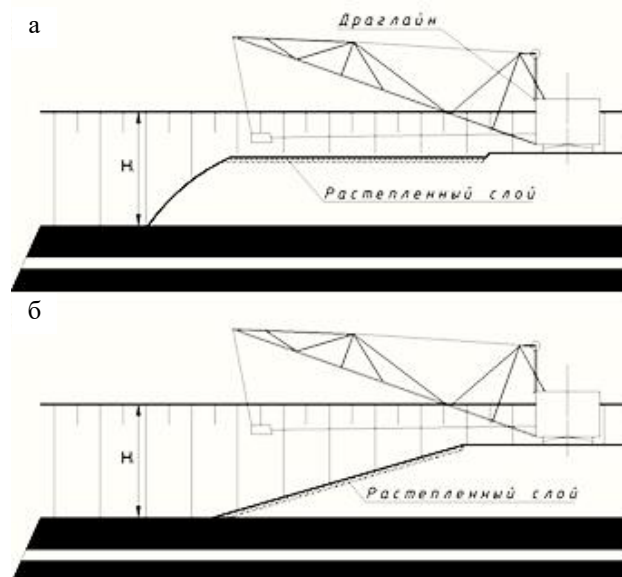


Рис. 3. Схемы с послойным снятием растепленного слоя породы по всей длине экскаваторного блока: а – на расстоянии максимального радиуса копания от верхней бровки откоса развала; б – на расстоянии у кровли откоса развала

Fig. 3. Schemes of layer-by-layer removal of the melted rock layer along the entire length of the excavator block: a is at the maximum digging radius from the upper edge of the spoil slope; b is near the crest of the spoil slope

Для повышения эффективности работы драглайна на развале, особенно в условиях мерзлых пород, предлагается следующая стратегия. Экскаватор может располагаться либо вблизи кровли откоса разва-

ла, либо на максимальном расстоянии копания от его верхней бровки. Это позволяет ему одновременно с разработкой поверхности развала снимать оттаявший слой породы с откоса. Драглайн последовательно перемещается вдоль взорванного блока, снимая оттаявший слой, затем возвращается на начальную позицию для снятия следующего. Отработанный участок блока оставляется для растепления и разупрочнения его поверхностного слоя. Этот процесс происходит под воздействием солнечной радиации в ходе дальнейшей разработки блока. Объем последующего растепленного слоя определяется характеристиками блока, температурой поверхности слоя породы и интенсивностью солнечного излучения. Такой подход минимизирует угол поворота при разгрузке, сокращает продолжительность рабочего цикла драглайна.

Таким образом, такая технология послойной отработки по всей длине блока обеспечивает максимальную производительность при работе в условиях взорванного смерзающегося массива горных пород в весенне-летний период. Она обеспечивает необходимое растепление и разупрочнение породы по всей рабочей площади забоя, что делает ее наиболее эффективной для драглайна. На данную технологию получен патент РФ [15].

Угольный пласт «Нижний» имеет среднюю мощность 5,36 м, увеличивается до 6 м при погружении на север под углом 1-2°. Его кровля и почва состоят преимущественно из глины с примесью песка. Выше на 1,5-3 м расположен пласт «Верхний», являющийся верхней частью угольной залежи. Оба пласта совместно погружаются на север, при этом мощность «Верхнего» возрастает с 8,9 до 13,3 м. Для разработки месторождения применяется комбинированная система: бестранспортная схема с экскаватором ЭШ-10/70 для вскрыши и транспортная схема с ЭКГ-5А. Бурение осуществляется станками СБШ-250МН, ЗСБШ-200-60, СБР-160-А-24 и СВБ-2М. Междупластье разрабатывается экскаваторами ЭКГ-5А с последующей транспортировкой автосамосвалами во внутренние отвалы.

В условиях криолитозоны, где требуется обязательная буровзрывная подготовка, породы повторно смерзаются после взрыва, невозможно верхнее черпание, а отвалы максимально приближены к рабочей зоне, отработка междупластья возможна только транспортным способом из-за отсутствия отвальных емкостей. Это приводит к высоким затратам и загрязнению воздуха. Для снижения себестоимости угля предлагается модернизировать вскрышные работы, максимально используя бестранспортную технологию для отработки междупластья, которая позволит значительно сократить расходы, исключив затраты на экскаваторы ЭКГ и автотранспорт. ИГДС СО РАН разработал новый метод разработки многолетнемерзлых вскрышных пород, который позволяет перевести объемы транспортной вскрыши (междупластья) на бестранспортную схему за счет создания специальных отвальных емкостей внутри контура внутреннего отвала. Предлагаемая технология приведена на **рис. 4**.

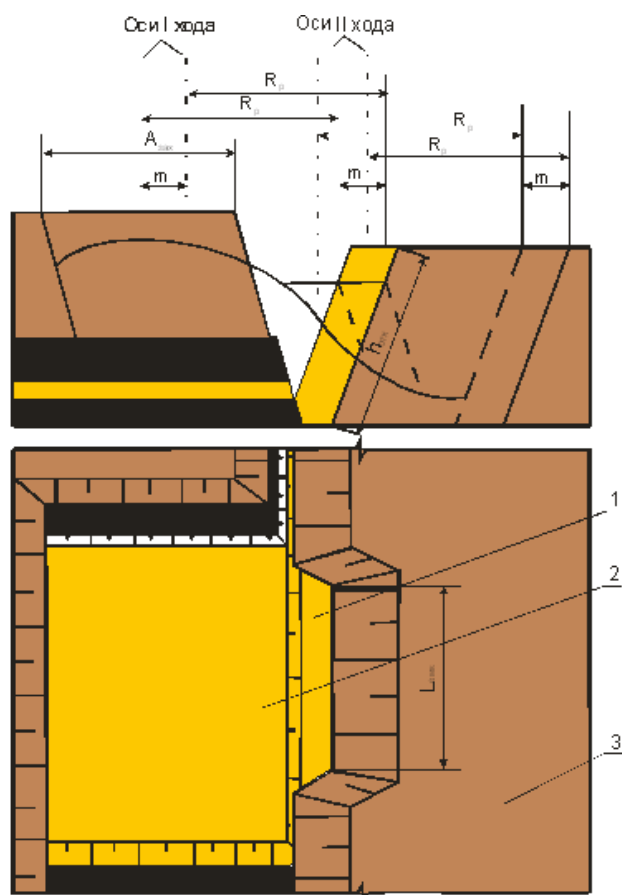


Рис. 4. Способ разработки многолетнемерзлых вскрышных пород: 1 – формируемая отвальная емкость; 2 – внутренняя вскрыша (междупластье); 3 – отвал внешней вскрыши
 Fig. 4. Method for mining permafrost overburden rocks: 1 is formed dump tank; 2 is internal overburden (interburden); 3 is external overburden dump

Процесс начинается с буровзрывных работ на уступе вскрыши. После проведения буровзрывных работ на уступе внешней вскрыши экскаватор осуществляет выемку разрыхленной породы, направляя ее в проектные контуры отвала. На участках, где предусмотрена бестранспортная технология отработки междупластья, драглайн выполняет перемещение породы в специально сформированные отвальные емкости. В тех случаях, когда создание таких емкостей технически невозможно, отсыпка отвала производится по традиционной схеме, без смещения оси экскаватора. Далее следует этап отработки верхнего пласта полезного ископаемого, за которым следует разработка междупластья. На участках, где были предварительно созданы отвальные емкости, драглайн осуществляет экскавацию междупластья непосредственно в конечный контур отвала. На остальных участках междупластье разрабатывается с использованием транспортной технологии. Завершающим этапом является отработка нижнего пласта полезного ископаемого. Данный метод разработки вскрышных

пород, разработанный в кооперации с персоналом разреза «Кангаласский», является запатентованным изобретением РФ [16].

Заключение

Таким образом, приведенные особенности ведения горных работ на разрезе «Кангаласский» в условиях криолитозоны наглядно демонстрируют, что ведение горных работ в условиях криолитозоны сопряжено с опасностью вторичного смерзания развала горных пород. Данная проблема является общей для угольных предприятий Арктического региона и предопределяет необходимость поиска и разработки специальных технологических решений.

Проведенные исследования особенностей бестранспортной технологии разработки многолетнемерзлых горных пород в суровых природно-климатических условиях Севера направлены на решение задач по оптимизации и адаптации существующих, а также новых эффективных способов разработки угольных месторождений криолитозоны.

Список источников

1. Васильев М. П. Бестранспортные системы разработки карьеров драглайнами. М.: Недра, 1971. 288 с.
2. Гвоздкова Т. Н. О повышении эффективности бестранспортной технологии на разрезах южного Кузбасса // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: материалы XIII международной научно-технической конференции. Междуреченск, 2024. С. 1.02-1-1.02-8.
3. Исследование структур схем экскавации при отсыпке внутренних многоярных бестранспортных отвалов / М.А. Тюленев, С.О. Марков, Н.С. Сурадеев [и др.] // Техника и технология горного дела. 2022. № 4(19). С. 4-34. DOI: 10.26730/2618-7434-2022-4-4-34. EDN XFQSQJ.
4. A Stability Classification System for the Dragline Dump Slope / A. K. Bharati, A. Ray, R. Rai, V. K. Shrivastva // Mining, Metallurgy & Exploration. 2021, vol. 38, pp. 1047–1060. DOI: 10.1007/s42461-021-00409-8.
5. Сташко К.В., Стариков К.А. Повышение производительности драглайнов за счет уменьшения времени цикла экскавации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. №5. С. 121-126.
6. Erdem B. Duzgun H. Dragline cycle time analysis // Journal of scientific and industrial research. 2005, vol. 64, pp. 19-29.
7. Coetzee C. J., Els D. N. J., Dymond G. F. Discrete element parameter calibration and the modeling of dragline bucket filling // Journal of Terramechanics. 2010, vol. 47, pp. 33-44.
8. Rai P. Performance assessment of draglines in opencast mines // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. 2004, vol.11, pp. 493-498.
9. Ческидов В.И., Цымбалюк Т.А., Резник А.В. Повышение эффективности бестранспортной технологии отработки массивов вскрышных пород с использованием взрывов на сброс // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 2. С. 96-102. DOI: 10.15372/FTPRPI20200211. EDN QLABMW.
10. Чернухин С.А. Повышение эффективности шагающих экскаваторов-драглайнов за счет совершенствования механизма шагания : специальность 05.05.06 «Горные машины»: дис. ... канд. техн. наук / Чернухин Станислав Алексеевич. 2022. 110 с. EDN VSCNET.
11. Влияние геометрических параметров механизма шагания на эффективность передвижения экскаватора-драглайна / Н.М. Суслов, С.А. Чернухин, О.А. Лукашук, М.Д. Лукашук // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 4. С. 580-589.
12. Певзнер Л.Д., Киселев Н.А. Система автоматического управления процессом черпания шагающего экскаватора-драглайна // Горные науки и технологии. 2022. № 7(1). С. 57-65. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-57-65>.
13. Хтэй В.Зо, Певзнер Л.Д., Темкин И.О. Алгоритмическое и аппаратное обеспечение бортовой информационной системы шагающего драглайна // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. №2. С. 190-196.
14. К вопросу прогноза производительности драглайна при экскавации смерзающейся взорванной горной массы в условиях месторождений криолитозоны / С.В. Панишев, М.В. Каймонов, М.С. Максимов, Е.Л. Алькова // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2022. Т. 9, № 3. С. 136-140. DOI: 10.15372/FPVGN2022090318. EDN SIEFXC.
15. Патент на изобретение № 2542007 Российская Федерация, МПК Е 21 С 41/26. Способ разработки смерзающихся вскрышных пород: № 2013159241/03 : заявл. 30.12.2013 : опубл. 20.02.2015 / Панишев С. В., Ермаков С. А., Каймонов М. В., Зарубин В. А., Зедгенидзе А. И., Максимов М. С., Козлов Д. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБУН «Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН» // Бюл. № 5.
16. Пат. 2299985 Российская Федерация МПК Е 21 С 41/26. Способ разработки вскрышных пород / Панишев С. В., Сердобинцев В. В., Аксёненко С. А., Стриганов В. В.; заявитель и патентообладатель Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН. № 2005117488/03; заявл. 07.06.2005; опубл. 27.05.2007, Бюл. № 15. 6 с.: ил.

References

1. Vasilev M.P. *Bestransportnye sistemy razrabotki karerov draglainami* [Transportless systems of open-pit mining by draglines]. Moscow: Nedra, 1971, 288 p. (In Russ.)
2. Gvozdikova T.N. On increasing the efficiency of transportless technology at the coal mines of Southern Kuzbass. *Sovremennyye tendentsii i innovatsii v nauke i proizvodstve: materialy XIII mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Modern trends and innovations in science and production. Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference]. Mezhdurechensk, 2024, pp. 1.02-1-1.02-8. (In Russ.)
3. Tyulenev M.A., Markov S.O., Suradeev N.S. et al. Study of excavation scheme structures during dumping of internal multitier transportless dumps. *Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela* [Mining Engineering and Technology].

- 2022;(4(19)):4-34. (In Russ.) DOI: 10.26730/2618-7434-2022-4-4-34.
4. Bharati A.K., Ray A., Rai R., Shrivastva B.K. A Stability Classification System for the Dragline Dump Slope. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2021;38:1047-1060. DOI:10.1007/s42461-021-00409-8.
 5. Stashko K.V., Starikov K.A. Increasing dragline productivity by reducing excavation cycle time. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2016;(5):121-126. (In Russ.)
 6. Erdem B., Duzgun H. Dragline cycle time analysis. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 2005;64:19-29.
 7. Coetzee C.J., Els D.N.J., Dymond G.F. Discrete element parameter calibration and the modeling of dragline bucket filling. *Journal of Terramechanics*. 2010;47:33-44.
 8. Rai P. Performance assessment of draglines in opencast mines. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*. 2004;11:493-498.
 9. Cheskidov V.I., Tsymbalyuk T.A., Reznik A.V. Improving the efficiency of transportless overburden mining technology using cast blasting. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Science]. 2020;(2):96-102. (In Russ.) DOI: 10.15372/FTPRPI20200211.
 10. Chernukhin S.A. *Povyshenie effektivnosti shagayushchikh ekskavatorov draglainov za schet sovershenstvovaniya mekhanizma shaganiya: diss. kand. tekhn. nauk* [Improving the efficiency of walking dragline excavators through совершенствование walking mechanism. Ph.D. dissertation]. 2022, 110 p. (In Russ.)
 11. Suslov N.M., Chernukhin S.A., Lukashuk O.A., Lukashuk M.D. Influence of geometric parameters of the walking mechanism on dragline excavator movement efficiency. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [News of the Tula State University. Earth Sciences]. 2023;(4):580-589. (In Russ.)
 12. Pevzner L.D., Kiselev N.A. Automatic control system of the digging process of a walking dragline excavator. *Gornye nauki i tekhnologii* [Mining Science and Technology]. 2022;7(1):57-65. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-57-65. (In Russ.)
 13. Khteil V.Zo., Pevzner L.D., Temkin I.O. Algorithmic and hardware support of the onboard information system of a walking dragline. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2019;(2):190-196. (In Russ.)
 14. Panishev S.V., Kaimonov M.V., Maksimov M.S., Alkova E.L. On forecasting dragline performance during excavation of frozen blasted rock mass in cryolithozone deposits. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk* [Fundamental and Applied Problems of Mining Sciences]. 2022;9(3):136-140. DOI:10.15372/FPVGN2022090318. (In Russ.)
 15. Panishev S.V., Ermakov S.A., Kaimonov M.V., Zarubin V.A., Zedgenidzev A.I., Maksimov M.S., Kozlov D.S. *Sposob razrabotki smerzayushchikhsya vskryshnykh porod* [Method for mining frozen overburden rocks]. Patent RU, no. 2542007, 2015.
 16. Panishev S.V., Serdobintsev V.V., Aksenenko S.A., Striganov V.V. *Sposob razrabotki vskryshnykh porod* [Method for mining overburden rocks]. Patent RU, no. 2299985, 2007.

Поступила 24.11.2025; принята к публикации 16.03.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 24/11/2025; revised 16/03/2026; published 30/06/2026

Максимов Михаил Саввич – кандидат технических наук, научный сотрудник,
Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, Россия.
Email: mexes_07@mail.ru. ORCID 0000-0002-0452-9791

Mikhail S. Maksimov – PhD (Eng.), Researcher,
N.V. Chersky Institute of Mining of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russia.
E-mail: mexes_07@mail.ru ORCID 0000-0002-0452-9791



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 553.04
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-47-55

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ДОБЫЧИ И ГЛУБИНЫ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫХ РЕСУРСОВ В СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА (2026-2036)

Пугачев И.Н., Архипова Ю.А.

Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия

Аннотация. Технологическая трансформация на базе конкурентоспособной добычи и глубины переработки минерально-сырьевых ресурсов предполагает внедрение инноваций в добычу и переработку полезных ископаемых, а также стимулирование технологической трансформации со стороны государственной политики и международного сотрудничества. Перспективы дальнейшего развития и внедрения этих технологий позволят отрасли оставаться конкурентоспособной и соответствовать современным вызовам. В статье, в преддверии разработки и принятия Стратегии социально-экономического развития Дальневосточного федерального округа до 2030 года с прогнозом до 2036 года, авторами рассматривается сложная задача: между вызовами, угрозами и открывающимися возможностями обосновать Стратегию развития Дальнего Востока на следующие десять лет, предусмотрев социальное развитие региона, инфраструктуру, транспорт, добычу сырья и новые технологии. Исследуется минерально-сырьевая база Дальневосточного федерального округа, позволяющая создавать здесь фундаментальные объекты металлургической отрасли и тем самым сделать территорию самодостаточным регионом. Раскрываются инфраструктурные ограничения: отсутствие дорог, энергомоствов к перспективным районам, а также недостаточность геологоразведочных работ, при том что многие месторождения остаются неразведанными или малоизученными. Обосновывается конъюнктура рынка нашей страны и стран АТР относительно приоритетов научно-технологического развития.

Ключевые слова: добыча, минерально-сырьевая база, инфраструктура, стратегия развития, высокотехнологичная продукция, Дальний Восток

Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Центр исследования минерального сырья» ХФИЦ ДВО РАН, финансируемого Российской Федерацией в лице Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2025-621.

© Пугачев И.Н., Архипова Ю.А., 2026

Для цитирования

Пугачев И.Н., Архипова Ю.А. Технологическая трансформация добычи и глубины переработки минерально-сырьевых ресурсов в стратегии развития Дальнего Востока (2026-2036) // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 47-55. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-47-55>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

TECHNOLOGICAL TRANSFORMATION OF MINERAL RAW MATERIAL EXTRACTION AND ITS PROCESSING DEPTH IN THE DEVELOPMENT STRATEGY OF THE RUSSIAN FAR EAST (2026-2036)

Pugachev I.N., Arkhipova Yu.A.

Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia

Abstract. Technological transformation based on competitive mining and deep processing of mineral resources involves the introduction of innovations in mineral extraction and processing, as well as the promotion of technological transformation through government policy and international cooperation. The prospects for further development and implementation of these technologies will enable the industry to remain competitive and meet contemporary challenges. In anticipation of the development and adoption of the Strategy for the socio-economic development of the Far Eastern Federal District until 2030, with a forecast up to 2036, the authors address the complex task of substantiating the development strategy of the Russian Far East for the next decade amid emerging challenges, threats, and opportunities. The strategy is expected to encompass social development, infrastructure, transportation, mineral resource extraction, and advanced technologies. The mineral resource base of the Far Eastern Federal District is examined, demonstrating its potential for establishing major metallurgical facilities and thereby transforming the territory into a self-sufficient region. The study also reveals existing infrastructure constraints, including the lack of transportation routes and power transmission networks to prospective areas, as well as insufficient geological exploration activities, despite the fact that many deposits remain underexplored or poorly studied. The market environment of Russia and the Asia-Pacific countries is analyzed with regard to the priorities of scientific and technological development.

Keywords: mining, mineral resource base, infrastructure, development strategy, high-tech products, Far East.

The research was carried out using the facilities of the Shared Research Center "Mineral Resources Research Center" of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. The study was funded by the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Agreement No. 075-15-2025-621.

For citation

Pugachev I.N., Arkhipova Yu.A. Technological Transformation of Mineral Raw Material Extraction and its Processing Depth in the Development Strategy of the Russian Far East (2026-2036). *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 47-55. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-47-55>

Введение

Задачу разработать новую стратегию развития Дальнего Востока до 2036 года поставил перед Правительством Президент России Владимир Путин на X Восточном экономическом форуме во Владивостоке. Председатель Правительства Михаил Мишустин по итогам профильной стратегической сессии дал поручение подготовить проект новой Стратегии социально-экономического развития Дальневосточного федерального округа (ДФО) до 2030 года с прогнозом до 2036 года, к 15 июля 2026 года. Разработкой документа занимается Минвостокразвития совместно с другими федеральными органами власти и главами регионов, входящих в ДФО.

Перед разработчиками стоит достаточно сложная задача: между вызовами, угрозами и открывающимися возможностями обосновать Стратегию развития Дальнего Востока на следующие десять лет, предусмотрев социальное развитие региона, инфраструктуру, транспорт, добычу сырья и новые технологии.

Материалы и методы исследования

Исследование базируется на системном, сравнительном и комплексном анализе нормативно-правовых актов, стратегических документов федерального и регионального уровня, определяющих приоритеты развития минерально-сырьевого комплекса Дальнего Востока.

В качестве основных источников использованы: Стратегия социально-экономического развития Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2035 года; Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Дальневосточного федерального округа»; Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года; отраслевые программы и концепции развития добычи и переработки твердых полезных ископаемых в ДФО; научные публикации, посвященные технологической трансформации горнодобывающей отрасли, проблемам глубокой переработки сырья и развитию ресурсных регионов; дан-

ные Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), выполнившего в сотрудничестве с ведущими отраслевыми институтами и организациями инвентаризацию месторождений, информация сайтов администраций и органов управления недропользованием субъектов региона, данные Федеральной службы государственной статистики.

Полученные результаты и их обсуждение

Среди главных угроз развития стоит недостаточно развитая инфраструктура: перегрузка БАМа и Транссиба при ключевой «ставке» на уголь, слабая связанность регионов, критическое состояние авиации в удаленных районах, энергодефицит (более 3,3 ГВт) и высокий износ мощностей электроэнергетики (более 65%). В экономике: технологическое отставание, высокая сырьевая зависимость, уязвимость к конъюнктуре сырьевых рынков [1, 2].

В отраслевой структуре валовой добавленной стоимости (ВДС) 30% и более приходится на добычу полезных ископаемых (ДПИ), а на обрабатывающую промышленность всего 4,2-4,9 % (рис. 1). При этом



Рис. 1. Отраслевая структура ВДС, % (по данным Росстат)

Fig. 1. Sectoral structure of gross added value, % (according to the Federal State Statistics Service (Rosstat) data)

доля добывающего сектора в структуре ВРП Дальневосточного макрорегиона в 2,1–2,6 раза превышает соответствующий показатель для ВВП РФ, а доля обрабатывающего сектора в ВРП ДФО, соответственно, ниже такого показателя для экономики РФ в целом в 3,3– 3,9 раза. Такие соотношения иллюстрируют не только преимущественно ресурсную специализацию Дальневосточного макрорегиона, но и не столь значимую роль обрабатывающего сектора промышленности в формировании конечных результатов его экономики [3].

Степень износа основных фондов по ДПИ превышает 50%-й порог (рис. 2). Удельный вес убыточных предприятий по ДПИ выше 40% (рис. 3), это свидетельствует о том, что значительная часть предприятий неэффективна (возможно сработали с отрицательным эффектом) либо требует модернизации. Объем отгруженных товаров собственного производства по ДПИ выше, чем по обрабатывающим производствам (рис. 4), то есть экономика ориентирована на добычу и экспорт сырья, а не на производство готовой продукции с высокой добавленной стоимостью внутри самого региона.

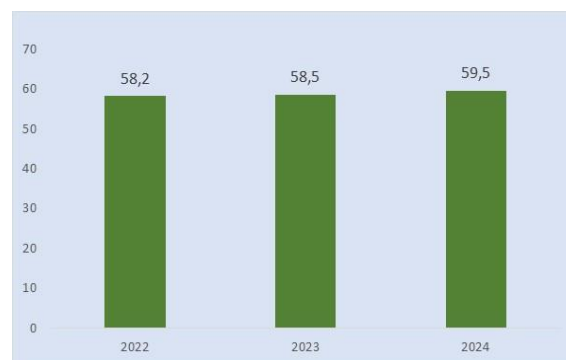


Рис. 2. Степень износа основных фондов по ДПИ, % (по данным Росстат)

Fig. 2. Degree of depreciation of fixed assets in the mining industry, % (according to the Federal State Statistics Service (Rosstat) data)

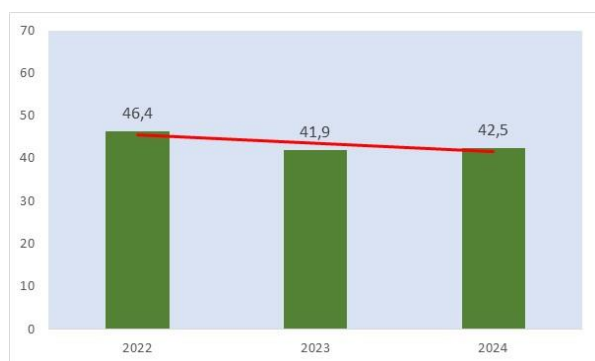


Рис. 3. Удельный вес убыточных предприятий по ДПИ, % (по данным Росстат)

Fig. 3. Share of unprofitable mining enterprises, % (according to the Federal State Statistics Service (Rosstat) data)



Рис. 4. Объем отгруженных товаров собственного производства по ДПИ, % (по данным Росстат)

Fig. 4. Volume of shipped goods of own production in the mining industry, % (according to the Federal State Statistics Service (Rosstat) data)

Значительная часть добытого (руды, концентраты) вывозится за пределы крупного макрорегиона и страны для переработки. Создание глубоких переделов (металлургия, высокотехнологичные производства) развито слабо, что снижает добавленную стоимость. Доминирует модель «добыча-экспорт сырья», а не «добыча – глубокая переработка – получение готовых изделий». Инфраструктурные ограничения: отсутствие дорог, энергомоств к перспективным районам, недостаточность геологоразведочных работ, при том, что многие месторождения остаются недоразведанными или малоизученными [4].

К основным возможностям следует прежде всего отнести создавшееся в последние годы геостратегическое положение Дальнего Востока, выступающего в роли моста России с Азиатско-Тихоокеанским регионом (АТР) и доступ к рынкам с 2 млрд потребителей (АТР – 60% роста мирового спроса на газ, более 50% мирового рынка нефти и нефтепродуктов, а также основная часть импорта продовольствия и высокотехнологичной продукции). На Дальнем Востоке сосредоточены основные ресурсы: крупнейшие в РФ запасы драгоценных металлов, алмазов; крупные – углеводородов, цветных и редких металлов, востребованных в «зеленой» экономике; значительный запас «зеленой» энергии (ГЭС, ВИЭ); значительные рекреационные ресурсы. Главным достоинством ДФО следует считать сложившийся транзит: Севморпуть, БАМ, Транссиб и коридоры «Приморье-1/2» делают ДФО ключевым транспортным узлом.

Имеющаяся минерально-сырьевая база ДФО позволяет создавать здесь фундаментальные объекты металлургической отрасли [5] и тем самым сделать территорию самодостаточным регионом (табл. 1). Основными аргументами являются:

- достаточность запасов и ресурсов для создания собственного медеплавильного производства и конечных продуктов, тем более ведутся подготовительные работы к запуску Малмыжского ГОКа, который будет специализироваться на производстве медного концентрата;

- практически все запасы олова в России сосредоточены в ДФО, а переработку концентратов внутри страны осуществляет предприятие, расположенное вне сырьевой базы (Новосибирский оловянный комбинат). Необходимо создание производственного комплекса по переработке оловянных концентратов с получением марочного (металлического) олова в Хабаровском крае;

- значительна степень освоенности вольфрама, а значит, перспективным (при условии развития сырьевой базы, интенсификации геологоразведочных работ) представляется строительство металлургического предприятия;

- необходимо поддержание существующего в регионе свинцового производства в Приморском и Забайкальском краях; производство цинка целесообразно в связи с возможностью создания черной металлургии в ДФО и использованием его для цинкования проката;

Таблица 1. Запасы, добыча и доля основных видов полезных ископаемых ДФО в общероссийском балансе на 01.01.2024 г. [8]

Table 1. Reserves, production, and share of the main mineral resources of the Far Eastern Federal District in the national balance as of January 1, 2024 [8]

Полезные ископаемые	Запасы по ДФО*	Процент к запасам по РФ	Добыча по ДФО	Процент к добыче по РФ
Горючие полезные ископаемые				
Нефть, млн т	323,744	1,7	20,223	4,2
Свободный газ, без шельфа, млрд м ³	2342,608	5,4	24,23	4,1
Конденсат, без шельфа, млн т	54,933	2,6	0,502	1,4
Твердые горючие полезные ископаемые				
Уголь, млн т	25000,345	12,8	97,852	25
Драгоценные камни				
Алмазы, тыс. карат	612451,5	77,3	29774,1	77,3
Благородные металлы				
Золото, т	4594,78	46,2	256,74	54
Серебро, т	34442,3	60	1849,5	72
Черные металлы				
Железные руды, млн т	5385,14	9,5	22,2	7,1
Цветные металлы				
Свинец, тыс. т	5640,2	59,5	120,4	36,2
Вольфрам, т	624118	66	2834	100
Цинк, тыс. т	23236,5	59,5	291,1	44,4
Олово, т	1536006	97,8	7895	100
Медь, тыс. т	31072,5	40,5	158,3	14,2
Молибден, т	994128	66,6	12	0,6
Радиоактивные элементы				
Уран, т	233879	73,5	2350	79,8
Неметаллические полезные ископаемые				
Плавленый шпат, тыс. т	21626	89,8	56	100

* Запасы категорий А+В+С₁, для УВС – А+В₁+С₁.

– также в перспективе организации черной металлургии и производства труб, магистральных трубопроводов, бурового хозяйства и других высокотехнологических отраслей востребованным становится производство молибдена [6, 7].

В связи с этим главной стратегической целью России становится преобразование Дальнего Востока в конкурентоспособный и комфортный для жизни макрорегион, сочетающий высокотехнологичную диверсифицированную экономику, с устойчивым ростом населения и современной инфраструктурой, играющую ключевую роль в кооперации России со странами АТР.

В экономике – это технологическая трансформация на базе конкурентоспособной добычи и глубокой переработки, ускоренный рост несырьевого сектора и интеграция в рынки АТР. Запуск единого преференциального режима (новая система поддержки бизнеса) и международных ТОРов. В инфраструктуре – это модернизация БАМа и Транссиба, расширение портов и аэропортов, ликвидация энергодефицита и развитие возобновляемой энергетики, цифровая связность, адаптация к изменениям климата.

Потребуется технологическая модернизация и устойчивый рост традиционных секторов, прежде всего в добыче и переработке нефти и газа. Поставлена цель переходить от продажи сырья к глубокой переработке, запланирован рост добычи газа от сегодняшних 42 до 122 млрд м³, дальнейшее развитие газохимии (Амурский ГПЗ, ГХК, СовГаваньский НГХК), модернизация НПЗ (глубина переработки от 75 до 92%, экспорт СПГ 10+ млн т/год, газификация ДФО с 27 до более 50%. На это потребуются инвестиции около 11 трлн руб. [9]

В горнорудном комплексе ДФО необходимо наладить рост добычи и глубину переработки, освоения редкоземов [10] и лития (медь (Удокан, Баймыский, Малмыжский), золото (Ключус, Наталка, Павлик), металлургия (Кимкано-Сутарский ГОК, Приморский МЗ)). Это также потребует порядка 4,5 трлн руб. инвестиций [11]. Возникают большие перспективы в добыче полиметаллических руд, запасов и ресурсов, которых достаточно.

На Дальнем Востоке сосредоточено 35,8% запасов редкоземельных элементов (РЗЭ) России, по масштабам и степени изученности на первом месте Забайкальский край и Республика Саха (Якутия). В Республике Саха (Якутия) известны уникальные по запасам месторождения – Томторское (Nb, TR, Sc, Y) и Селигдарское (P, TR). Забайкальский край выделяется разнообразием генетических типов месторождений редких металлов и РЗЭ, их количеством и инфраструктурной доступностью. В Забайкалье разведаны крупные по запасам месторождения: Завитинское (Li, Sn, Ta, Nb), Катугинское (Ta, Nb, TR), Орловское (Ta, Li), Этыкинское (Ta, Nb, Sn). Практически на все перечисленные месторождения выданы лицензии, подготовлены технико-экономические обоснования освоения.

Имеются два относительно небольших по запасам объекта в Приморье – Абрамовское и Бойковское, характеризующиеся наличием ураганных содержаний дефицитных и дорогих «тяжелых» РЗЭ [12].

На сегодняшний день особенно актуален вопрос освоения литиевых месторождений при достижении технологического суверенитета для российской промышленности [13-15]. И ситуация такова, что Россия, обладая значительными запасами лития, промышленную добычу пока не ведет, и страна зависит от импорта. При этом ДФО и соседние регионы Восточной Сибири являются одними из главных кладовых лития. К числу перспективных объектов в качестве вовлечения в оборот для будущей добычи можно отнести редкометалльные месторождения, показанные в **табл. 2**.

Решение проблемы импортозамещения лития требует комплексного подхода, который уже реализуется на нескольких уровнях:

- создание собственной сырьевой базы: от геологоразведки к добыче. Самый важный шаг – это запуск промышленной добычи на собственных месторождениях;

- развитие перерабатывающих мощностей: от сырья к готовой продукции;

- инструменты государственной поддержки и стимулирования спроса. Без активной роли государства импортозамещение в такой капиталоемкой отрасли невозможно (правительство РФ планирует направить 3,85 млрд руб. из федерального бюджета на развитие отрасли редких и редкоземельных металлов в 2026-2028 годах).

Вопрос об освоении месторождений лития в РФ остается открытым до тех пор, пока не изменятся рыночные условия или не появится стратегический инвестор, готовый к долгосрочным и капиталоемким вложениям ради обеспечения технологического суверенитета страны.

Инвестиции в транспортно-логистический комплекс (ТЛК), мультимодальный каркас интеграции России в АТР и связанность ДФО суммарно составят около 4 трлн руб. (БАМ и Транссиб (270 млн т), новые линии (Якутск–Магадан, Джалинда–Сковородино), порты (719 млн т), сухие порты, СМП (110–150 млн т/год)).

Также около 4 трлн руб. потребуется на развитие электроэнергетики. Промышленный рост требует ликвидации дефицита мощностей, а именно ввод до 10 ГВт (АЭС, ГЭС, ТЭС, ВИЭ), модернизации ТЭЦ и ГРЭС, локальные энергосистемы для Арктики, экспорт энергии 5–6 млрд кВт·ч/год. Дополнительно на возобновляемую энергетику (солнечную, водородную, ветровую, геотермальную) потребуется еще 1,2–1,5 трлн руб. инвестиций, она должна стать основой для развития конкурентоспособных национальных технологий ВИЭ: водородный кластер Сахалина, солнечная и ветроэнергетика в Якутии, геотермальная энергетика на Камчатке и пр.

Таблица 2. Перспективные для разработки месторождения лития в ДФО
 Table 2. Promising lithium deposits in the Far Eastern Federal District suitable for development

Полезное ископаемое	Завитинское, Забайкальский край	Этикинское, Забайкальский край	Орловское, Забайкальский край	Урикское, Республика Бурятия
Оксид лития (Li₂O), тыс. т, всего:	38000	99153	-	40002
категория С ₁	22100	-	-	14690
категория С ₂	6968	99153	-	20212
Забалансовые	8989	-	64004	5100
Среднее содержание, %	0,69	0,11	0,2	н/д
Запасы компонента, т:	258000	112767	128133	391500
категория С ₁	153005	-	-	160100
категория С ₂	54136	112767	-	207700
Забалансовые	50903	-	-	23700
Пентоксид тантала (Ta₂O₅), тыс. т, всего:	39212	99153	25326	40002
категория С ₁	348	-	-	-
категория С ₂	38864	16804	5289	34902
категория А+ В+С ₁	-	-	20037	-
категория В+С ₁	-	82349	-	-
Забалансовые	-	116093	38678	5100
Среднее содержание, %	0,0158	0,013	0,014	0,0057
Запасы компонента, т:	2094	12746	3648	2313
категория С ₁	55	-	-	-
категория С ₂	2039	2024	838	1994
категория А+ В+С ₁	-	-	2810	-
категория В+С ₁	-	10722	-	-
Забалансовые	-	-	4393	319
Пентоксид ниобия (Nb₂O₅), тыс. т, всего:	39212	84153	25326	40002
категория С ₁	348	-	-	-
категория С ₂	38864	16804	5289	34902
категория В ₁ +С ₁	-	82349	-	-
категория А+ В+С ₁	-	-	20037	-
Забалансовые	-	116093	38678	5100
Среднее содержание, %	0,0129	0,0191	0,0031	0,0102
Запасы компонента, т:	3679	19536	766	4022
категория С ₁	45	-	-	-
категория С ₂	3634	3774	138	3544
категория А+ В+С ₁	-	-	628	-
категория В ₁ +С ₁	-	15762	-	-
Забалансовые	-	22640	1452	478
Олово (Sn), тыс. т, всего:	39212	99151	-	-
категория С ₂	38864	99151	-	-
Среднее содержание, %	н/д	0,02	-	-
Запасы компонента, т:	3357	20927	-	-
категория С ₂	3258	20927	-	-
Оксид рубидия (Rb₂O), тыс. т, всего:	-	-	64004	-
Забалансовые	-	-	64004	-
Среднее содержание, %	-	-	0,16	-
Запасы компонента, т:	-	-	102034	-
Оксид цезия (Cs₂O), тыс. т, всего:	-	-	64004	-
Забалансовые	-	-	64004	-
Среднее содержание, %	-	-	0,0068	-
Запасы компонента, т:	-	-	4380	-

Еще одна важная цель разрабатываемой Стратегии – обеспечить пространственную связанность Дальнего Востока, создать условия для опережающего роста экономики и повышения качества жизни. Современные транспортные, энергетические и цифровые системы должны связать регионы ДФО между

собой и с центром страны, а также интегрировать их в рынки АТР, формируя единое пространство высокой мобильности, надежного энергоснабжения и цифровой доступности [16].

Особое внимание сегодня обращено к Восточному полигону. Комплексная модернизация БАМа и

Транссиба: устранение «узких мест», рост пропускной способности минимум на 50% к 2035 году до 270 млн т, синхронизация с портовой и промышленной инфраструктурой. Необходим рост уровня контейнеризации грузов с 25 до 70% к 2035 году, что обеспечит кратное повышение эффективности перевозок.

Намечена реконструкция и расширение ключевых портовых комплексов на +136 млн т к 2032 году (распоряжение ПРФ от 29 августа 2025 г. № 2365-р. Восточный, Находка, Ванино, Советская Гавань, Магадан, Петропавловск-Камчатский), строительство глубоководных причалов и контейнерных терминалов.

Отдельное внимание необходимо уделять развитию экспортной инфраструктуры, то есть комплексному развитию пунктов пропуска (автомобильные пункты пропуска Кани-Курган, Большой Уссурийский, Забайкальск, Краскино, Нижнеленинское и пр.), снятию «узких мест», росту пропускной способности и сокращению времени пересечения границы.

Важна хорошо налаженная логистика: модернизация припортовой инфраструктуры, строительство логистических хабов, внедрение цифровых систем управления грузопотоками.

В регионах ДФО основную круглогодичную транспортную связанность играет возможность авиамобильности населения. Так, пассажиропоток ДФО в 2024 году составил более 11,1 млн жителей, из них 2,6 млн пассажиров летают внутри ДФО, 3,8 млн (каждый третий) – по льготным билетам (ФБ и плоские тарифы Аэрофлота). Поставлена цель достичь более 4 млн пассажиров внутри ДФО к 2030 году. Для этого потребуются обновление взлетно-посадочных полос и терминалов в опорных населенных пунктах; до 2030 года планируется реконструкция 26-ти объектов аэродромной инфраструктуры (взлетно-посадочные полосы и вспомогательные объекты), на это предусмотрено 100 млрд руб. из федерального бюджета.

Необходима поставка воздушной техники для нужд ДФО – не менее 37 воздушных судов (8 самолетов SSJ-NEW, 10 самолетов ЛМС-901 «Байкал» или аналог, 19 вертолетов Ми-171).

Растут перевозки по Северному морскому пути: в 2024 году перевезено 37,9 млн т, план перевозок к 2035 году – 150 млн т. Развитие транспортных хабов на Северном морском пути предусматривает 155 мероприятий на сумму 1,8 трлн руб.

В энергетике ДФО необходим рост установленной мощности к 2036 году на 11,4 ГВт, электропотребления до 110 млрд кВт·ч/год (+44%). Ввод – 8,0 ГВт до 2030 года, в том числе – 5,7 ГВт – решения есть, 2,3 ГВт – решений пока нет. Вывод до 2030 года – 1,1 ГВт. Ввод – 4,5 ГВт с 2030 по 2036 годы (дефицит мощности в ДФО к 2030 году более 3,3 ГВт). Инвестиции в энергетiku составят более 4 трлн руб. Предусмотрено строительство новых ТЭС, ГЭС, солнечных станций, АЭС, а также стационарных и

транспортируемых атомных станций малой мощности на Севере.

Запланирован рост экспорта электроэнергии в Китай и Монголию до 5–6 млрд кВт·ч.

Одной из важных задач следует рассмотреть превращение Дальнего Востока в специализированный центр научно-технологического развития России, развивая научно-технологический кластер мирового уровня с подготовкой и закреплением в регионе не менее 40 тыс. исследователей и инженеров.

Заключение

Учитывая конъюнктуру рынка нашей страны и стран АТР, к приоритетам научно-технологического развития, прежде всего, следует отнести:

- переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике (включая обустройство месторождений);
- развитие искусственного интеллекта и цифровых технологий;
- создание специализированных функциональных материалов;
- развитие морского транспорта и логистики для повышения связанности территории;
- внедрение передовых технологий проектирования и создания высокотехнологичной продукции;
- реализацию потенциала в области арктических исследований, биофармацевтики, минерально-сырьевой базы и аэрокосмоса;
- глубокую переработку сырья, разработку и внедрение технологий извлечения всех ценных компонентов из руды.

Концентрацию усилий следует сосредоточить на пяти-семи направлениях: редкоземельные материалы, робототехника и ИИ, морское машиностроение и глубоководная добыча, биотехнологии и аквакультура, водородная энергетика.

Необходима четкая стратегия импортозамещения литиевой продукции в России и ее реализация. Она должна включать в себя запуск собственной добычи на крупнейших месторождениях, создание перерабатывающих мощностей и защиту внутреннего рынка с помощью протекционистских мер.

Требуется донастройка госзаданий научных организаций под задачи разработки критических и сквозных технологий и выпуск высокотехнологичной продукции.

Список источников

1. Пугачев И.Н. Инфраструктурное сопровождение стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 28. С. 72-76. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-28-72-76. EDN DBVLUY.
2. Крюков В.Г., Пугачев И.Н. Роль формирования транспортно-энергетического каркаса в освоении минерально-сырьевой базы Дальнего Востока России // Транс-

- портное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2025. № 30. С. 85-92. DOI: 10.26160/2658-3305-2025-30-85-92. EDN YBFHFN.
3. Ломакина Н.В. Особенности промышленной структуры в ресурсном регионе: Дальний Восток России // *Пространственная экономика*. 2025. Т. 21. № 3. С. 142-164. <https://dx.doi.org/10.14530/se.2025.3.142-164>.
 4. Крюков В.Г. Перспективы развития горного комплекса Дальнего Востока // *Маркшейдерия и недропользование*. 2014. № 2 (70). С. 19–30.
 5. Архипова Ю.А. Формирование вертикально-интегрированного производства в горно-металлургической промышленности (на примере Дальневосточного региона РФ): дис...канд. экон. наук. Хабаровск, 2006. 156 с.
 6. Архипов Г.И. Стратегические направления комплексного освоения георесурсов Дальнего Востока и Забайкалья // *Горный журнал*. 2024. № 6. С. 12-21. DOI:10.17580/gzh2024.06.02.
 7. Membrane-based technologies for lithium recovery from water lithium resources: A review / Xianhui L., Yinghui M., Weihua Q., Senlin Sh., Chuyang Y.T., Jianxin L. // *Journal of Membrane Science*. 2019, vol. 591. URL: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117317> (дата обращения: 10.02.2026).
 8. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Дальневосточного федерального округа на 01.01.2025 г. / ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского». М., 2025.
 9. Крюков В.Г. Кластеризация горного комплекса Дальневосточного федерального округа как основа его устойчивого развития // *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр*: сб. науч. ст. М.: Изд-во Ин-та проблем комплексного освоения недр РАН, 2016. С. 351–358.
 10. Боярко Г.Ю. Основные и попутные полезные компоненты комплексного минерального сырья: технологические и экономические проблемы их добычи и реализации // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2024. № 5 (190). С. 74-80.
 11. Горная промышленность Дальнего Востока России: обеспечение баланса интересов государства и недропользования / Рассказов И.Ю., Архипова Ю.А., Крюков В.Г., Волков А.Ф. // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023. № 3. С. 149-158. DOI: 10.15372/FTPPI20230315, EDN: WMWRZC
 12. Бакланов П.Я., Романов М.Т., Ткаченко Г.Г. Природно-ресурсное районирование Дальневосточного макрорегиона России // *География и природные ресурсы*. 2020. № 2 (161). С. 24-31.
 13. Саркаров Р.А., Белан С.И., Гусейнов Н.М. Оценка современного состояния и перспективы добычи лития и его соединений в России // *Индустриальная экономика*. 2022. Т.1. №2. С. 57-68. DOI: 10.47576/2712-7559_2022_2_1_57.
 14. Литиевые гидротермалиты: перспективы и проблемы промышленного освоения / Мелентьев Г.Б., Овчарова Е.С., Шевчук Р.М., Короткий В.М., Поликашина Н.С. // *Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экономические науки»*. 2025. № 5 (81). С. 65–73.
 15. Гончарова Л. И., Новосельцева В.Д. Современное состояние, основные тенденции, конъюнктура и перспективы развития рынка лития // *Север и рынок. Формирование экономического порядка*. 2019. № 6 (62). С. 114–124.
 16. Рассказов И.Ю., Пугачев И.Н. Транспортные проблемы освоения минерально-сырьевой базы Арктической зоны России // *Горная промышленность*. 2025. № S1. С. 5-13. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1S-05-13. EDN KSYQWH.

References

1. Pugachev I.N. Infrastructure support for the strategy for the development of the mineral resource base of the Russian Federation until 2035. *Transportnoye, gornoye i stroitelnoye mashinostroyeniye: nauka i proizvodstvo* [Transport, mining and construction engineering: science and production]. 2024;(28):72-76. (In Russ.) DOI 10.26160/2658-3305-2024-28-72-76.
2. Kryukov V.G., Pugachev I.N. The role of the formation of a transport and energy framework in the development of the mineral resource base of the Russian Far East. *Transportnoye, gornoye i stroitelnoye mashinostroyeniye: nauka i proizvodstvo* [Transport, mining and construction engineering: science and production]. 2025;(30):85-92. (In Russ.) DOI: 10.26160/2658-3305-2025-30-85-92.
3. Lomakina N.V. Features of the industrial structure in the resource region: Russian Far East. *Prostranstvennaya ekonomika* [Spatial Economy]. 2025;21(3): 142-164. (In Russ.) <https://dx.doi.org/10.14530/se.2025.3.142-164>.
4. Kryukov V.G. Prospects for the development of the mining complex of the Far East. *Marksheyderiya i nedropolzovaniye* [Mine Surveying and Subsoil Use]. 2014;(2(70)):19-30. (In Russ.)
5. Arkhipova Yu.A. *Formirovaniye vertikalno-integrirovannogo proizvodstva v gorno-metallurgicheskoy promyshlennosti (na primere Dalnevostochnogo regiona RF): dis. ... kand. ekon. nauk* [Formation of vertically integrated production in the mining and metallurgical industry (using the Far Eastern Region of the Russian Federation as an example). Ph.D. dissertation]. Khabarovsk, 2006, 156 p.
6. Arkhipov G.I. Strategic directions for the integrated development of georesources of the Far East and Transbaikalia. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal]. 2024;(6):12-21. (In Russ.) DOI:10.17580/gzh2024.06.02.
7. Xianhui L., Yinghui M., Weihua Q., Senlin Sh., Chuyang Y.T., Jianxin L. Membrane-based technologies for lithium recovery from water lithium resources: A review. *Journal of Membrane Science*. 2019;591. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117317> (Accessed on February 10, 2026).
8. *Spravka o sostoyanii i perspektivakh ispolzovaniya mineralno-syryevoy bazy Dalnevostochnogo federalnogo okruga na 01.01.2025 g.* [Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of the Far Eastern Federal District as of 01.01.2025]. Federal State Budgetary Institution "All-Russian Geological Research Institute named after A.P. Karpinsky". Moscow, 2025.
9. Kryukov V.G. Clustering of the mining complex of the Far Eastern Federal District as the basis for its sustainable development. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoy-*

- eniya i sokhraneniya zemnykh nedr: sb. nauch. st.* [Problems and prospects of integrated development and conservation of the earth's interior: collection of articles]. Moscow: Publishing house of the Institute of Integrated Development of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 351-358. (In Russ.)
10. Boyarko G.Yu. Main and associated useful components of complex mineral raw materials: technological and economic problems of their extraction and sale. *Mineralnyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management]. 2024;(5):74-80. (In Russ.)
 11. Rasskazov I.Yu., Arkhipova Yu.A., Kryukov V.G., Volkov A.F. Mining industry of the Russian Far East: balancing the interests of the state and subsoil use. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and technical problems of mineral resource development]. 2023;(3):149-158. (In Russ.) DOI: 10.15372/FTPRPI20230315.
 12. Baklanov P.Ya., Romanov M.T., Tkachenko G.G. Natural resource zoning of the Far Eastern macroregion of Russia. *Geografiya i prirodnyye resursy* [Geography and natural resources]. 2020;(2(161)):24-31. (In Russ.).
 13. Sarkarov R.A., Belan S.I., Guseinov N.M. Assessment of the current state and prospects for the extraction of lithium and its compounds in Russia. *Industrialnaya ekonomika* [Industrial Economy]. 2022;1(2):57-68. (In Russ.) DOI: 10.47576/2712-7559_2022_2_1_57.
 14. Melentyev G.B., Ovcharova YE.S., Shevchuk R.M., Korotkiy V.M., Polikashina N.S. Lithium hydrothermalites: prospects and problems of industrial development. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra Uralskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya «Ekonomicheskiye nauki»* [Bulletin of the Komi scientific center of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Economic Sciences"]. 2025;(5(81)):65-73. (In Russ.)
 15. Goncharova L.I., Novoseltseva V.D. Current state, main trends, market conditions and development prospects of the lithium market. *Sever i rynek. Formirovaniye ekonomicheskogo poryadka* [North and market. Formation of economic order]. 2019;(6(62)):114-124. (In Russ.)
 16. Rasskazov I.Yu., Pugachev I.N. Transport problems of developing the mineral resource base of the Arctic zone of Russia. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry]. 2025;(S1):5-13. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1S-05-13.

Поступила 25.02.2026; принята к публикации 22.04.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 25/02/2026; revised 22/04/2026; published 30/06/2026

Пугачев Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, главный научный сотрудник лаборатории рационального освоения недр ИГД, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия.
Email: ipugachev64@mail.ru. ORCID 0000-0003-0345-4350

Архипова Юлия Александровна – кандидат экономических наук, руководитель лаборатории рационального освоения недр ИГД, Хабаровский Федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия.
Email: yuliya_arhipovas@mail.ru. ORCID 0000-0002-9297-6056

Igor N. Pugachev – DrSc (Eng.), Professor, Deputy Director for Research, Chief Researcher of the Laboratory of Rational Development of Mineral Resources of the Institute of Mining, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia.
Email: ipugachev64@mail.ru. ORCID 0000-0003-0345-4350

Yuliya A. Arkhipova – PhD (Eng.), Head of the Laboratory of Rational Development of Mineral Resources of the Institute of Mining, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia.
Email: yuliya_arhipovas@mail.ru. ORCID 0000-0002-9297-6056

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 549:54.055

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-56-66



ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ МЕДНЫХ ШЛАКОВ ПОЛЕВСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА

Ерохин Ю.В.¹, Макаров А.Б.², Захаров А.В.¹, Хиллер В.В.¹, Леонова Л.В.¹¹Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Уральский регион около 300 лет является металлургическим центром России и за столь продолжительный период здесь накопилось большое количество шлаков, в том числе и медных. Изучение их вещественного состава является актуальной задачей, так как прежде чем их утилизировать, надо оценить их минеральный состав. Многие шлаки представляют собой потенциальную руду, которую можно дополнительно переработать. Полевской металлургический завод (1724-1930) был крупным производителем черновой меди. От него сохранился небольшой медный шлакоотвал, возникший в последние годы работы предприятия, вещественный состав которого практически не изучен. На данный момент шлакоотвал активно загрязняет окружающую среду и его необходимо утилизировать. **Цель работы.** Изучение вещественного (минерального) состава медных шлаков Полевского металлургического завода. **Используемые методы.** Геохимический состав шлаков установлен на масс-спектрометре Agilent 7700X (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН), а химический состав минералов определен на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA LMS, S6123 с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (ИГГ УрО РАН). На последнем приборе сделаны и фотографии минералов. **Новизна.** Рассмотрение вещественного (минерального) состава шлаков проводилось с применением современной номенклатуры Комиссии по новым минералам Международной минералогической ассоциации и использованием методов классической минералогии. **Результат.** Изучена минералогия медных шлаков Полевского металлургического завода, которые складированы в небольшом отвале у западного подножия горы Думной. Установлено, что шлаки представлены двумя типами, отличающимися друг от друга минералого-геохимическими характеристиками. Первый тип сложен фаялит-пижонитовым агрегатом с присутствием магнетита, стекла, форстерита, халькозина, купростибита, домейкита и меди. Второй тип представлен фаялит-авгитовым агрегатом с присутствием магнетита, брейтгаупгита и сульфидов (идаита, кубанита, борнита, халькопирита, галенита). Первый тип шлака характеризуется «гипербазитовым» геохимическим трендом, а второй – «базитовым». Сделан вывод, что шлаки первого типа получились в результате переплавки «цементной меди», а шлаки второго типа образовались при переработке медноколчеданных руд Зюзельского месторождения. **Практическая значимость.** Изученные медные шлаки можно переработать, они друг от друга отличаются магнитными свойствами (второй тип шлака сильномагнитный и его можно легко отделить). Из первого типа шлака можно выделить медь (с попутным золотом), а также магнетитовый концентрат, содержащий титан, ванадий и хром. Из второго типа шлака с помощью флотации можно выделить сульфидный концентрат, содержащий не только медь, железо, цинк, но и свинец с никелем. Магнитной сепарацией можно выделить магнетитовый концентрат, который к тому же дополнительно содержит примеси титана и 5% ZnO.

Ключевые слова: фаялит, пижонит, магнетит, сульфиды, минералогия, шлаки, Полевской металлургический завод

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Свердловской области, № 24-27-20061, <https://rscf.ru/project/24-27-20061/>.

© Ерохин Ю.В., Макаров А.Б., Захаров А.В., Хиллер В.В., Леонова Л.В., 2026

Для цитирования

Вещественный состав медных шлаков Полевского металлургического завода / Ерохин Ю.В., Макаров А.Б., Захаров А.В., Хиллер В.В., Леонова Л.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 56-66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-56-66>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MATERIAL COMPOSITION OF COPPER SLAGS FROM THE POLEVSKOY METALLURGICAL PLANT

Erokhin Yu.V.¹, Makarov A.B.², Zakharov A.V.¹, Khiller V.V.¹, Leonova L.V.¹

¹Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia

²Urals State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The Ural region has been the metallurgical center of Russia for approximately 300 years, and over this long period, a large amount of slag, including copper, has accumulated there. Studying their material composition is a relevant issue, as their mineral composition must be assessed before disposal. Many slags are potential ore that can be further processed. The Polevskoy Metallurgical Plant (1724-1930) was a major producer of blister copper. A small copper slag dump remains, created in the final years of the plant's operation, and its material composition remains barely studied. Currently, the slag dump pollutes the environment and, therefore, there is a need for its disposal. **Objectives.** The research is aimed at studying the material (mineral) composition of copper slags of the Polevskoy Metallurgical Plant. **Methods Applied.** The geochemical composition of the slags has been determined using an Agilent 7700X mass spectrometer (South Ural Federal Scientific Center of Mining and Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences), and the chemical composition of the minerals has been determined using a TESCAN MIRA LMS, S6123 scanning electron microscope with an INCA Energy 450 X-Max 80 energy-dispersive unit from Oxford Instruments (Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences). The latter device has also been used to take photographs of the minerals. **Originality.** The study of the material (mineral) composition of slags has been carried out using the modern nomenclature of the Commission on New Minerals of the International Mineralogical Association and using the methods of classical mineralogy. **Result.** The mineralogy of copper slags from the Polevskoy Metallurgical Plant, which are stored in a small dump at the western foot of Dumnaya mountain, has been studied. It has been found that they are represented by two types of slags that are different according to their mineralogical and geochemical characteristics. The first type is composed of a fayalite and pigeonite aggregate with the presence of magnetite, glass, forsterite, chalcocite, cuprostibite, domeykite and copper. The second type is represented by a fayalite and augite aggregate with the presence of magnetite, breithauptite and sulfides (idaite, cubanite, bornite, chalcopyrite, galena). The first type of slag is characterized by an "ultrabasic" geochemical trend, and the second by a "basite" trend. It has been concluded that the first type of slag has been obtained as a result of the remelting of "cement copper", and the second type has been obtained as a result of the processing of copper-sulphide ores of the Zuzelski deposit. **Practical Relevance.** The studied copper slags can be put into additional processing. They differ from each other according to their magnetic properties (the second type of slag is highly magnetic and can be easily separated). From the first type of slag, copper (with associated gold) can be separated, as well as magnetite concentrate containing titanium, vanadium and chromium. From the second type of slag, it is possible to separate sulfide concentrate containing not only copper, iron, zinc, but also lead and nickel using flotation. Magnetic separation can be used to separate magnetite concentrate, which also additionally contains titanium impurities and 5% ZnO.

Keywords: fayalite, pigeonite, magnetite, sulfides, mineralogy, slags, Polevskoy Metallurgical Plant.

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation and the Government of the Sverdlovsk Region, No. 24-27-20061, <https://rscf.ru/project/24-27-20061/>.

For citation

Erokhin Yu.V., Makarov A.B., Zakharov A.V., Khiller V.V., Leonova L.V. Material Composition of Copper Slags from the Polevskoy Metallurgical Plant. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 56-66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-56-66>

Введение

Исследование медных шлаков является актуальной задачей как с точки зрения экологии, так и для возможного промышленного использования (многие из них представляют собой потенциальную руду). Переплавка медно-сульфидных руд для получения черновой меди всегда дает большой объем металлургического шлака. На современных медеплавильных предприятиях мира выход шлака в зависимости от

технологий составляет от 2 до 5 т на одну тонну получаемой черновой меди [1]. На сегодняшний день по всему миру накопились огромные объемы медных шлаков, в том числе и в Уральском регионе, который несколько столетий являлся одним из главных металлургических центров России. Изучением минералогии или вещественного состава медных шлаков занимаются многие ученые и в первую очередь ими исследуются отходы современных действующих меде-

плавильных предприятий, так как они являются центром экологических проблем и на них накоплены гигантские объемы шлака. При этом эти отходы, кроме меди, содержат и другие металлы, в том числе и благородные [1-3]. Получаемые в результате этих исследований данные позволяют заниматься вторичной переработкой шлаков и тем самым снижать экологическую нагрузку на окружающую среду.

Полевской медеплавильный завод находился в южной части одноименного города, расположенного на юге Свердловской области. Он был построен казной в 1724 году рядом с богатейшим Гумешевским медным рудником и одновременно являлся чугуноплавильным и железоделательным предприятием. В 1757 году Полевской завод вместе с Сысертским и Северским заводами был продан соликамскому купцу А.Ф. Турчанинову, который значительно увеличил производственные мощности всех предприятий. В 1787 году Полевской завод после смерти А.Ф. Турчанинова перешел в собственность его наследникам – многочисленным родственникам, которые создали семейно-паевое товарищество. С 1822 года завод перестал плавить чугун. В 1832 году в число пайщиков вошел П.Д. Соломирский, который стал активно скупать пай у своих родственников и в 1869 году он стал владельцем завода. При этом с 1861 по 1864 годы предприятие за долги отбиралось в казну. В 1870 году владельцем завода стал Д.П. Соломирский, сын прежнего хозяина. С 1871 года на предприятии стало преобладать железоделательное производство, а медь уже плавил по остаточному принципу, так как Гумешевский рудник закрылся. В 1891 году упразднили последнюю медную печь. В 1907 году на заводе прекратили делать железо, но возобновили выплавку меди из так называемой «цементной меди», которую получали при переработке старых отвалов Гумешевского рудника. В 1912 году Д.П. Соломирский, не имевший наследников, продал все свои предприятия, в том числе и Полевской завод, иностранным предпринимателям, которые основали акционерное общество «Сысертский горный округ». В 1917 году завод был национализирован и остановлен на период Гражданской войны. В 1920-1921 годах он поработал, а в 1922-1924 годах простоял на консервации. С 1925 года Полевской завод был передан в концессию акционерному обществу «Лена Голдфилдс» и стал активно работать, проплавляя медноколчеданные руды Зюзельского рудника и опять же «цементную медь». В 1928 году Зюзельский рудник закрылся и в 1930 году Полевской металлургический завод прекратил своё существование [4].

В настоящее время на бывшем месте металлургического предприятия функционирует Полевской машиностроительный завод. В качестве воспоминания о Полевском заводе остался только небольшой отвал медных шлаков у подножия Думной горы. Его изучением никто не занимался, и только недавно сотрудниками УГТУ (г. Екатеринбург) были получены

предварительные минералого-геохимические особенности этих шлаков [5]. Пару лет спустя сотрудниками ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург) была сделана попытка оценить эколого-геохимическое состояние заросшего шлакоотвала [6]. Приведенные данные оказались интересными, но без реальной оценки вещественного состава шлаков и понимания, какие минералы подвергались окислению и разрушению, они как бы «повисли в воздухе». Настоящая работа направлена на детальное изучение и определение минерального состава медных шлаков из отвала Полевского металлургического завода.

Отбор образцов шлака и методы исследования

Медные шлаки были отобраны нами в 2022 году в отвале, который расположен на правом берегу реки Полевой у западного и северо-западного подножия Думной горы. Отбор шлаков проводился по различным морфологическим признакам. Шлакоотвал местами задернован и переходит в склон горы, поэтому оценить его объем достаточно сложно. Шлаки имеют черный цвет, часто с красноватой патиной, их размер обычно не превышает 15-20 см. В некоторых образцах встречается обильная вкрапленность меди. На поверхности многих шлаков видны следы течения, а также пленки вторичной минерализации «медной зелени». Пористость шлаков средняя, в верхней части образцов количество пор увеличивается и достигает 10-15 об.%. Всего нами отобрано около 30 образцов, их внешний вид достаточно однородный. Из них для более детального минералогического анализа было отобрано шесть наиболее типовых образцов.

Микроэлементный (геохимический) состав шлаков был определен методом ICP-MS на масс-спектрометре Agilent 7700X (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс, аналитик К.А. Филипова). Химический состав минералов и их фотографии сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA LMS, S6123 с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург, аналитик Л.В. Леонова). Кристаллохимический пересчет минералов производился катионным методом (на количество катионов в минерале).

Полученные результаты

В результате проведенных исследований оказалось, что отобранные нами медные шлаки представлены двумя типами. Первый тип, который можно назвать медным, сложен оливин-пижонитовым агрегатом с присутствием магнетита и арсениднотибиодно-сульфидной минерализации, а также стекла и меди. Второй тип, медно-цинковый, представлен фаялит-авгитовым агрегатом со значительным присутствием магнетита и стибнидно-сульфидной минерализации. Микроэлементный (геохимический) состав шлаков подтверждает их минералогические раз-

личия (табл. 1). Первый тип характеризуется «гипербазитовым» геохимическим трендом – более высокими концентрациями хрома, никеля и низкими содержаниями РЗЭ. Второй тип отличается «базитовым» трендом – повышенными количествами титана, ванадия и РЗЭ. Для этого же типа характерны аномально высокие содержания цинка и свинца.

Первый тип медных шлаков представлен следующими минералами.

Фаялит ($\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$) является главным минералом в шлаке первого типа (около 50-55 об.%) и образует скелетные длиннопризматические кристаллы размером до 0,5 мм в длину (рис. 1). Индивиды оливина часто образуют специфическую структуру спинифекс, характерную для шлаков и вулканитов. По данным химического состава минерал относится к фаялиту и имеет четкую зональность: в центре он более магнезиальный, а по краям – железистый (табл. 2, анализы 1-2). По данным кристаллохимического пересчета оливин отвечает феррогортонолиту, только центральные зоны содержат 25% минала форстерита, а краевые – не более 13%. Фаялит характеризуется следующими примесями: MnO (до 0,8 мас.%), NiO (до 0,7 мас.%) и CaO (до 0,5 мас.%). В окружающем стекле встречаются мелкие иглы фаялита размером до 100 мкм в длину, которые по составу полностью соответствуют краевым зонам больших кристаллов фаялита.

Форстерит ($\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$) встречается в шлаке редко в виде оплавленных слабо удлинённых обломков, размером до 300 мкм по удлинению. По периферии эти обломки обрастают крустификационным агрегатом фаялита. По химическому составу минерал относится к форстериту и тоже имеет зональность: в цен-

тре крайне магнезиальный, а по краям и трещинам – более железистый (см. табл. 2, анализ 3). По данным кристаллохимического пересчета в центральной части обломков оливин является классическим форстеритом с низкой железистостью (минал фаялита не более 8,5%). В краевых зонах оливин уже относится к гиалосидериту с более высоким содержанием минала фаялита (34,5%). В центральной части отмечаются примеси NiO (до 0,4 мас.%), а в краевой – MnO (до 0,6 мас.%) и CaO (до 0,2 мас.%). По всей видимости, эти обломки являются реликтами гипербазитового вещества, которое попало в расплав вместе с рудой. В целом низкая железистость в форстерите характерна для многих гипербазитов из офиолитовых комплексов [7]. Краевая, более железистая зона является продуктом реакции форстерита с расплавом.

Пижонит ($(\text{Mg,Fe,Ca})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$) является второстепенным минералом в шлаке (около 20 об.%) и встречается в интерстициях между призматическими индивидами фаялита (рис. 1, 2). Пироксен образует мелкие скелетные призматические индивиды размером не более 30 мкм, которые находятся в матрице стекла. Местами пироксена так много, что формируется его агрегат. По химическому составу пироксен уверенно определяется как железистый пижонит с содержанием CaO (в пределах 6,2-7,5 мас.%). В нем установлены примеси Al_2O_3 (до 9,7 мас.%), MgO (до 3,7 мас.%), MnO (до 1,2 мас.%) и TiO_2 (до 0,4 мас.%). В природе пижонит – типичный минерал вулканитов основного и ультраосновного состава, а также метеоритов. В шлаках этот пироксен встречается редко, нами он описывался в отходах медного производства Нейво-Рудянского завода [8].

Таблица 1. Геохимический состав шлаков Полевского завода, г/т

Table 1. Geochemical composition of slags of Polevskoy plant, ppm

Типы	1	2	Типы	1	2	Типы	1	2
Li	12,3	16,1	Zr	26,2	37,8	Eu	0,96	1,65
Be	0,80	1,19	Nb	0,80	1,13	Gd	2,99	5,85
B	8,71	8,39	Ag	<0,10	0,69	Tb	0,47	0,96
Sc	18,0	18,8	Mo	4,08	6,42	Dy	3,32	6,43
Ti	1363,0	1734,0	Cd	<0,22	<0,22	Ho	0,78	1,56
V	158,0	165,0	In	0,31	0,90	Er	2,42	4,65
Cr	117,0	58,6	Sn	2,87	4,85	Tm	0,35	0,70
Co	42,9	44,5	Sb	7,91	24,3	Yb	2,50	4,36
Ni	19,8	7,88	Te	<0,30	<0,30	Lu	0,39	0,72
Zn	587,0	2301,0	Cs	0,38	0,34	Hf	0,79	1,16
Ga	6,59	9,11	Ba	278,0	199,0	Ta	0,25	0,38
As	439,0	455,0	La	14,7	20,1	W	8,30	9,77
Se	<2,35	<2,35	Ce	21,5	23,8	Pb	39,8	181,0
Rb	6,75	8,35	Pr	2,34	3,94	Bi	<0,10	0,35
Sr	60,9	54,2	Nd	11,2	20,2	Th	1,02	1,45
Y	28,4	63,7	Sm	2,43	4,15	U	1,85	2,49

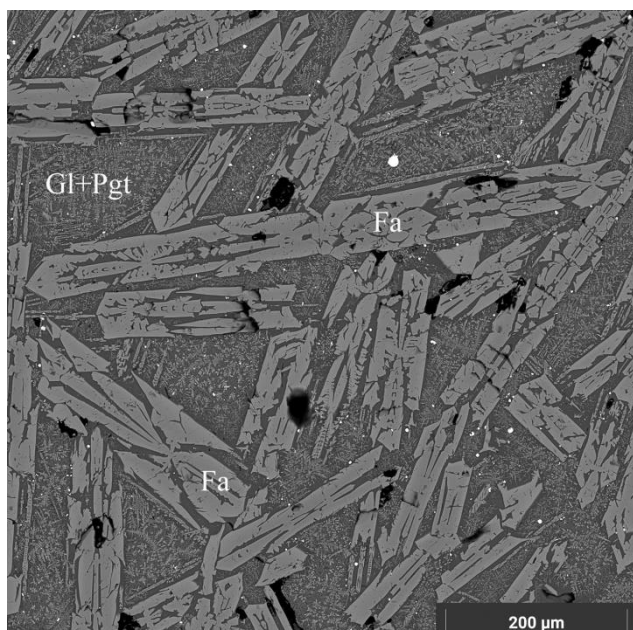


Рис. 1. Внешний вид медного шлака первого типа:
Fa – фаялит, пижонит Gl+Pgt – в стекле.
Фото в BSE-режиме, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 1. Appearance of copper slag of the first type:
Fa is fayalite, Gl+Pgt is pigeonite in glass. Photos
in BSE mode, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

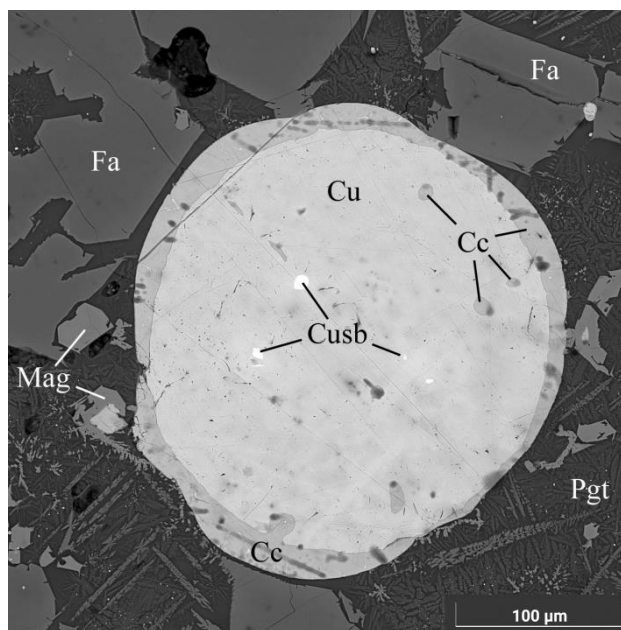


Рис. 2. Сферула меди в сульфидной оторочке
и включениями купростибита: Cu – медь,
Fa – фаялит, Pgt – пижонит, Mag – магнетит,
Cc – халькозин, Cusb – купростибит.
Фото в BSE-режиме, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 2. Copper spherule in a sulphide rim and cuprostibite
inclusions: Cu is copper, Fa is fayalite,
Pgt is pigeonite, Mag is magnetite,
Cc is chalcocite, Cusb is cuprostibite. Photos
in BSE mode, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

Таблица 2. Химический состав оливина и пижонита, мас. %
Table 2. Chemical composition of olivine and pigeonite, wt. %

Номер анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	NiO	MnO	MgO	CaO	Сумма
Фаялит									
1ц	31,80	-	-	55,70	0,61	0,78	10,70	0,41	100
1кр	30,79	-	-	61,23	-	0,79	6,65	0,54	100
2ц	32,18	-	-	55,87	-	0,66	10,87	0,42	100
2кр	30,78	-	-	61,77	0,68	0,83	5,45	0,49	100
Форстерит									
3ц	40,75	-	-	8,45	0,38	-	50,42	-	100
3кр	36,96	-	-	30,28	-	0,63	31,95	0,18	100
Пижонит									
4	41,94	0,44	8,91	37,60	-	1,21	3,71	6,19	100
5	41,96	0,43	9,67	36,24	-	0,90	3,27	7,53	100
Кристаллохимические формулы									
1ц	$(\text{Fe}_{1,45}\text{Mg}_{0,50}\text{Mn}_{0,02}\text{Ni}_{0,02}\text{Ca}_{0,01})_{2,00}[\text{Si}_{1,00}\text{O}_4]$								
1кр	$(\text{Fe}_{1,64}\text{Mg}_{0,32}\text{Mn}_{0,02}\text{Ca}_{0,02})_{2,00}[\text{Si}_{1,00}\text{O}_4]$								
2ц	$(\text{Fe}_{1,46}\text{Mg}_{0,51}\text{Mn}_{0,02}\text{Ca}_{0,01})_{2,00}[\text{Si}_{1,00}\text{O}_4]$								
2кр	$(\text{Fe}_{1,68}\text{Mg}_{0,26}\text{Mn}_{0,02}\text{Ca}_{0,02}\text{Ni}_{0,02})_{2,00}[\text{Si}_{1,00}\text{O}_4]$								
3ц	$(\text{Mg}_{1,83}\text{Fe}_{0,17}\text{Ni}_{0,01})_{2,01}[\text{Si}_{0,99}\text{O}_4]$								
3кр	$(\text{Mg}_{1,29}\text{Fe}_{0,69}\text{Mn}_{0,01}\text{Ca}_{0,01})_{2,00}[\text{Si}_{1,00}\text{O}_4]$								
4	$(\text{Fe}_{1,29}\text{Ca}_{0,27}\text{Mg}_{0,23}\text{Al}_{0,15}\text{Mn}_{0,04}\text{Ti}_{0,01})_{2,00}[(\text{Si}_{1,72}\text{Al}_{0,28})_{2,00}\text{O}_6]$								
5	$(\text{Fe}_{1,24}\text{Ca}_{0,33}\text{Mg}_{0,20}\text{Al}_{0,19}\text{Mn}_{0,03}\text{Ti}_{0,01})_{2,00}[(\text{Si}_{1,72}\text{Al}_{0,28})_{2,00}\text{O}_6]$								

Примечание: ц – центр зерна, кр – край зерна.

Стекло в шлаке отмечается часто, его количество достигает 15 об.%. Оно выполняет интерстиции между индивидами фаялита и содержит многочисленные включения силикатов и рудных минералов. Чистые участки стекла встречаются вблизи крупных кристаллов фаялита, их размер редко превышает 20-30 мкм. Представительный состав этого стекла следующий (в мас.%): SiO₂ – 51,26; TiO₂ – 0,47; Al₂O₃ – 15,80; FeO – 20,04; MnO – 0,57; MgO – 0,75; CaO – 10,01; Na₂O – 0,38; K₂O – 0,72. На диаграмме TAS данное стекло попадает в поле основных пикробазальтов, то есть относится к нормальным основным вулканитам.

Магнетит (Fe²⁺Fe³⁺₂O₄) в шлаке встречается редко (не более 5 об.%) и образует изометричные округлые или скелетные зерна (см. **рис. 2**) размером до 100 мкм, которые тяготеют к медно-сульфидным сферам. Кроме того, встречается среди пижонитового агрегата, где образует «салютобразные» дендриты. По составу минерал относится к магнетиту и характеризуется повышенным содержанием глинозема (Al₂O₃ до 5,5 мас.%), что отвечает 12% минала герцинита. Из других примесей отмечаются хром (Cr₂O₃ до 2,9 мас.%), титан (TiO₂ до 1,4 мас.%), магний (MgO до 0,8 мас.%) и ванадий (V₂O₃ до 0,5 мас.%). Кристаллохимическая формула:



Халькозин (Cu₂S) является главным минералом серы в шлаке первого типа. Он встречается исключительно в парагенезисе с медью, слагая оторочки вокруг металла, мощностью до 50 мкм. Кроме того, образует округлые или неправильные включения меди и в зернах магнетита. Химический состав сульфида (в мас.%, среднее из 27-ми анализов): Cu – 78,51; S – 19,81; Fe – 1,68, хорошо пересчитывается на кристаллохимическую формулу халькозина – (Cu_{0,97}Fe_{0,04})_{2,01}S_{0,99}.

Купростибит (Cu₂Sb) встречается в шлаке крайне редко и исключительно в виде изометричных включений, размером до 10 мкм, в матрице меди (см. **рис. 2**). Включения обычно приурочены к центральной части крупных сферул металла. Минерал имеет следующий химический состав (в мас.%, среднее из 5 анализов): Cu – 47,58; Ni – 3,78; Sb – 44,86; As – 2,24; Bi – 1,54, который пересчитывается на кристаллохимическую формулу купростибита – (Cu_{1,84}Ni_{0,16})_{2,00}(Sb_{0,91}As_{0,07}Bi_{0,02})_{1,00}. Нами он описывался в шлаках Среднеуральского медеплавильного завода [9].

Домейкит (Cu₃As) встречается в шлаке крайне редко и приурочен к мелким сферам меди. Установлен в виде небольших зон, мощностью до 15 мкм, на краю сферул. Минерал имеет следующий химический состав (в мас.%, среднее из 3-х анализов): Cu – 61,38; Fe – 3,78; As – 18,90; Sb – 14,99, который удовлетворительно пересчитывается на кристаллохимическую формулу домейкита – (Cu_{2,71}Fe_{0,24})_{2,95}(As_{0,71}Sb_{0,34})_{1,05}. Природный домейкит обычно встречается в низкотем-

пературных гидротермальных жилах при температурах ниже 225°C, но он был найден и синтезирован и при более высоких температурах [10]. Этот минерал описывался в древних медных шлаках Ирана и был сделан вывод, что в ассоциации с медью он образовался при температуре 610°C [11].

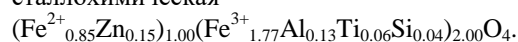
Медь (Cu) образует сферулы размером до 1 см по всей матрице шлака. Металл обычно окаймлен оторочками халькозина и изредка содержит включения того же халькозина, купростибита и домейкита. По составу медь обычно содержит примесь Fe (в пределах 1,9-4,2 мас.%) и изредка As (до 4,6 мас.%). Интересно, что изредка в шлаке первого типа встречаются шарики меди, обогащенные золотом (до 15% Au).

Второй тип медных шлаков представлен следующими минералами.

Фаялит (Fe₂[SiO₄]) является главным минералом и в шлаке второго типа (около 40-45 об.%). Он образует скелетные длиннопризматические кристаллы размером до 1 мм в длину (**рис. 3**). Визуально индивиды оливина более расщепленные, чем фаялит из шлака первого типа. По составу минерал относится к фаялиту (**табл. 3**, анализы 1-2) и содержит примеси ZnO (до 8,1 мас.%), MgO (до 2,7 мас.%) и CaO (до 1,0 мас.%), то есть рассчитываются миналы виллемита (до 10%), форстерита (до 6,5%) и кальциооливина (до 2%). По данным кристаллохимического пересчета оливин отвечает феррогортонолиту. Цинксодержащий фаялит является типоморфным минералом медных шлаков Среднеуральского завода [9].

Авгит ((Ca,Mg,Fe)₂[Si₂O₆]) тоже является главным минералом в шлаке второго типа (около 30-35 об.%) и встречается в пространстве между индивидами фаялита (**рис. 3, 4**). Пироксен образует короткопризматические индивиды размером не более 200 мкм по удлинению. Агрегат пироксена сплошной и не содержит стекла (возможно, пироксен образовался за счет раскристаллизации стекла). Полученные анализы пироксена попадают в поле авгита, недалеко от области развития пижонита. Август содержит примеси ZnO (до 5,4 мас.%), Al₂O₃ (до 5,3 мас.%), BaO (до 1,2 мас.%), K₂O (до 1,1 мас.%) и MgO (до 0,6 мас.%).

Магнетит (Fe²⁺Fe³⁺₂O₄) в шлаке второго типа вполне распространен (до 15-20 об.%) и слагает изометричные и слабовытянутые, хорошо образованные кристаллы (см. **рис. 3, 4**) размером до 300 мкм. Основная масса шпинелида приурочена к индивидам фаялита. По химическому составу шпинелид относится к магнетиту и характеризуется повышенным содержанием цинка (ZnO до 5,2 мас.%), что отвечает 15% минала франклинита. Из других примесей отмечаются алюминий (Al₂O₃ до 3,0 мас.%), титан (TiO₂ до 2,0 мас.%) и кремний (SiO₂ до 0,9 мас.%). Кристаллохимическая формула:



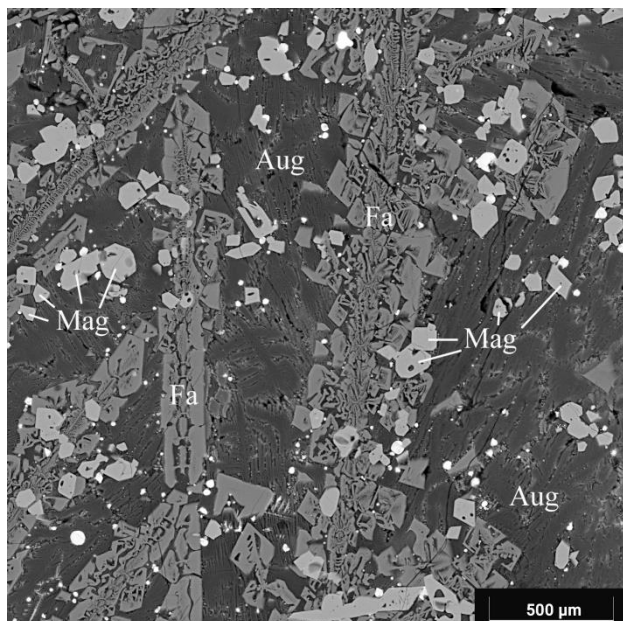


Рис. 3. Внешний вид медного шлака второго типа: Fa – фаялит, Mag – магнетит, Aug – авгит. Фото в BSE-режиме, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 3. Appearance of copper slag of the second type: Fa is fayalite, Mag is magnetite, Aug is augite. Photos in BSE mode, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

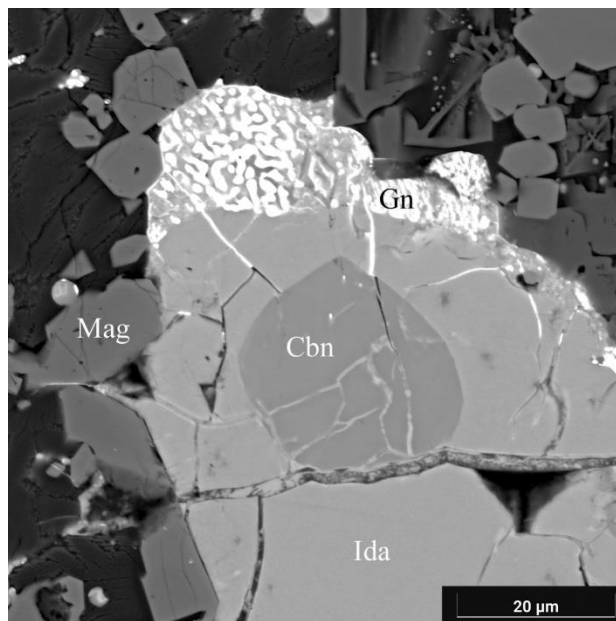


Рис. 4. Структура сульфидной сферулы: Cbn – кубанит, Ida – идаит, Gn – галенит, Mag – магнетит. Фото в BSE-режиме, СЭМ TESCAN MIRA LMS, S6123

Fig. 4. Structure of sulfide spherule: Cbn is cubanite, Ida is idaite, Gn is galena, Mag is magnetite. Photos in BSE mode, SEM TESCAN MIRA LMS, S6123

Таблица 3. Химический состав фаялита и авгита, мас. %

Table 3. Chemical composition of fayalite and augite, wt. %

Номер анализа	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	ZnO	MgO	BaO	CaO	K ₂ O	Сумма
Фаялит									
1ц	29,96	-	59,49	7,14	2,69	-	0,72	-	100
1кр	29,98	-	58,59	8,10	2,37	-	0,96	-	100
2ц	29,97	-	59,53	7,46	2,17	-	0,87	-	100
2кр	28,87	-	60,05	8,11	2,09	-	0,88	-	100
Авгит									
3	45,26	4,85	28,74	4,17	0,50	0,98	14,76	0,74	100
4	45,00	5,16	27,73	4,81	0,34	1,15	14,98	0,82	100
5	46,95	4,78	26,62	5,41	0,38	1,02	13,78	1,06	100
6	47,12	5,28	25,73	4,92	0,56	1,07	14,36	0,96	100
Кристаллохимические формулы									
1ц	(Fe _{1,66} Zn _{0,18} Mg _{0,13} Ca _{0,03}) _{2,00} [Si _{1,00} O ₄]								
1кр	(Fe _{1,64} Zn _{0,20} Mg _{0,12} Ca _{0,04}) _{2,00} [Si _{1,00} O ₄]								
2ц	(Fe _{1,67} Zn _{0,19} Mg _{0,11} Ca _{0,03}) _{2,00} [Si _{1,00} O ₄]								
2кр	(Fe _{1,66} Zn _{0,20} Mg _{0,11} Ca _{0,03}) _{2,00} [Si _{1,00} O ₄]								
3	(Ca _{0,66} Fe _{0,28} K _{0,04} Ba _{0,02}) _{1,00} (Fe _{0,71} Zn _{0,13} Al _{0,13} Mg _{0,03}) _{2,00} [(Si _{1,89} Al _{0,11}) _{2,00} O ₆]								
4	(Ca _{0,67} Fe _{0,27} K _{0,04} Ba _{0,02}) _{1,00} (Fe _{0,70} Zn _{0,15} Al _{0,13} Mg _{0,02}) _{2,00} [(Si _{1,88} Al _{0,12}) _{2,00} O ₆]								
5	(Ca _{0,62} Fe _{0,30} K _{0,06} Ba _{0,02}) _{1,00} (Fe _{0,63} Al _{0,18} Zn _{0,17} Mg _{0,02}) _{2,00} [(Si _{1,95} Al _{0,05}) _{2,00} O ₆]								
6	(Ca _{0,64} Fe _{0,29} K _{0,05} Ba _{0,02}) _{1,00} (Fe _{0,60} Al _{0,22} Zn _{0,15} Mg _{0,03}) _{2,00} [(Si _{1,96} Al _{0,04}) _{2,00} O ₆]								

Сульфиды Cu-Fe являются главными минералами серы в шлаке второго типа и встречаются по всей матрице породы, в основном тяготея к индивидам фаялита. Сульфиды Cu-Fe образуют полифазные сферулы (шарики) размером до 100 мкм в диаметре (см.

рис. 4). Они часто содержат включения галенита и сфалерита. Среди сульфидов Cu-Fe преобладает следующая фаза (в мас.%): S – 30-31; Fe – 18-19; Cu – 50-51, близкая по составу к идаиту – Cu₃FeS₄ (S – 34,2; Fe – 14,9; Cu – 50,9). В идаите часто отмечаются

округлые включения размером до 40 мкм, с другим химическим составом (в мас.%): S – 34-35; Fe – 40-41; Cu – 23-24, который хорошо коррелирует с *кубанитом* $CuFe_2S_3$ (S – 35,4; Fe – 41,2; Cu – 23,4). Кроме того, в идаите наблюдаются редкие структуры распада (пластинки до 5-10 мкм, более светлые в BSE-режиме) с более медистым составом (в мас.%; среднее из 5-ти анализов): S – 26,9; Fe – 11,2; Cu – 61,8, который вполне соответствует *борниту* Cu_3FeS_4 (S – 25,6; Fe – 11,1; Cu – 63,3). Интересно, что местами в матрице шлака встречаются сульфидные шарики размером до 50 мкм с совсем другим составом (S – 34,2; Fe – 30,3; Cu – 34,3; Zn – 1,2), близким по составу к *халькопириту* – $CuFeS_2$ (S – 34,9; Fe – 30,4; Cu – 34,6).

Сфалерит (ZnS) образует ксеноморфные выделения на контакте с сульфидами Cu-Fe размером до 40-50 мкм. По химическому составу сульфид цинка медистый и железистый (в мас.%; среднее из 22-х анализов): S – 33,31; Fe – 9,31; Zn – 56,36; Cu – 1,02, что в пересчете дает следующую кристаллохимическую формулу: $(Zn_{0,82}Fe_{0,16}Cu_{0,02})_{1,00}S_{1,00}$.

Галенит (PbS) образует каймы вокруг сульфидных шариков, иногда в виде каплевидной ориентированной (эвтектической) вкрапленности в матрице идаита (см. рис. 4). Размер зерен сульфида не более 10 мкм. По составу галенит достаточно чистый, из примесей в сульфиде отмечаются только железо (до 2,9 мас.%) и медь (до 1,5 мас.%). Температура плавления/кристаллизации сульфида свинца оценивается в пределах 1096 °C [12], что можно принять как температуру образования данных медных шлаков.

Брейтгаунтит (NiSb) встречается исключительно среди каплевидных скоплений галенита, образуя неправильной формы вытянутые зерна размером до 10 мкм. По химическому составу ((в мас.%; среднее по 6-ти анализам): Sb – 60,49; As – 5,47; Fe – 4,76; Co – 1,08; Ni – 26,49; Cu – 1,71) минерал хорошо пересчитывается на формулу стибнида никеля: $(Ni_{0,78}Fe_{0,15}Cu_{0,05}Co_{0,03})_{1,01}(Sb_{0,86}As_{0,13})_{0,99}$. Нами он описывался в шлаках Среднеуральского [9] и Благодатного [13] медеплавильных заводов.

Полученные результаты и их обсуждение

В результате проведенного исследования в шлакоотвале Полевского металлургического завода отчетливо выделяются два типа медных шлаков.

Первый тип сложен фаялит-пижонитовым агрегатом с присутствием магнетита, стекла, форстерита, халькозина, купростибита, домейкита и меди. Как уже выше отмечалось, данный тип шлака характеризуется «гипербазитовым» геохимическим трендом. Это подтверждается и его минералогическими особенностями. В частности, находками в шлаке обломков форстерита и наличием повышенных примесей никеля с магнием в породообразующем фаялите. Об этом же говорят и примеси магния, хрома и ванадия в аксессуарном магнетите. К тому же пижонит является

типоморфным минералом вулканитов базитового и гипербазитового состава.

Второй тип представлен фаялит-авгитовым агрегатом с присутствием магнетита, брейтгаунтита и сульфидов (идаита, кубанита, борнита, халькопирита, галенита). Геохимия данного типа шлака имеет «базитовый» тренд и характеризуется более высокими содержаниями халькофильных элементов (даже аномальных по цинку и свинцу). Минералогия подтверждает микроэлементный состав шлака. Так, во всех породообразующих минералах, то есть в фаялите и авгите, а также в магнетите, отмечается повышенная примесь цинка. Кроме того, в породе присутствуют собственные минералы цинка и свинца – сфалерит и галенит соответственно.

Находка двух разных типов шлака хорошо увязывается с тем, что в последние годы своего существования Полевской завод получал руду из двух мест: перерабатывал «цементную медь» с Гумешевского рудника и медноколчеданные руды с Зюзельского месторождения [4, 5].

Гумешевский рудник прекратил свою работу в 1872 году и до начала XX века шла переработка его отвалов. В начале прошлого века на месте рудника стал функционировать Гумешевский медеизвлекательный завод, то есть гидрометаллургическое предприятие по извлечению меди из окисленных руд (сернокислотное выщелачивание металла из отвалов в виде цементации). Он действовал с 1908 года, и в 1919 году сгорел. В советские годы на Гумешевском руднике выщелачивание меди проводили только при концессионных работах 20-х годов, а позднее только планировали добывать [14]. Извлечение меди из зоны окисления Гумешек началось в современный период в 2005 году [15]. Учитывая исторические данные и время закрытия Полевского завода, можно уверенно говорить, что шлаки первого типа получились в результате переплавки «цементной меди».

Зюзельское колчеданное месторождение было открыто в 1902-1903 годах и в верхней части объекта вскрылась пиритовая залежь [16], которую решили использовать для производства серной кислоты. В 1907 году заработал Полевской сернокислотный завод, который и позволил запустить то самое выщелачивание на отвалах Гумешевского рудника. В 1910-х годах в восточной части Зюзельского рудника были обнаружены колчеданные залежи с высоким содержанием меди, цинка, золота и серебра, поэтому эти руды стали плавить на Полевском металлургическом заводе. На время Гражданской войны разработки были остановлены, а после 1925 года Зюзельский рудник был передан в концессию акционерному обществу «Лена Голдфилдс», которая переплавляла руды на Полевском заводе (до самого закрытия завода в 1930 году). Учитывая все эти данные, очевидно, что шлаки второго типа получились в результате пере-

плавки медноколчеданных руд Зюезельского месторождения.

При этом отсутствие старых (XVIII-XIX века) медеплавильных шлаков вокруг Полевского завода не должно удивлять, так как предприятие параллельно занималось чугуноплавильным производством, а при выплавке чугуна в то время добавляли немного медного шлака (для легирования металла и улучшения литейных свойств). Вполне возможно, что после 1822 года, когда на Полевском заводе прекратили выплавлять чугун, медные шлаки для этих же целей вывозили на близлежащий Северский металлургический завод (предприятиями владела одна семья), который продолжал делать чугун.

Визуально изученные шлаки практически не отличаются, но у них различаются физические свойства. Первый тип шлака немагнитен, а второй тип, наоборот, сильномагнитный (благодаря высокому содержанию магнетита), что позволяет достаточно легко разделить шлаки друг от друга в случае потенциальной переработки шлакоотвала.

В целом медные шлаки Полевского завода могут быть переработаны. Из первого типа шлака можно выделить медь (с попутным золотом), а также магнетитовый концентрат, содержащий титан, ванадий и хром. Оставшаяся силикатная масса с высоким содержанием FeO является потенциальной железной рудой, которую можно временно складировать до получения рентабельной технологии добычи железа из силикатов. Из второго типа шлака с помощью флотации можно выделить сульфидный концентрат, содержащий не только медь, железо, цинк, но и свинец с никелем. Магнитной сепарацией можно выделить концентрат магнетита, который к тому же дополнительно содержит примеси титана и 5% ZnO. Оставшаяся силикатная масса с фаялитом и авгитом содержит не только железо, но и цинк, что возможно уже сделает рентабельным добычу этих металлов из силикатов.

Изученный нами шлакоотвал желателно переработать не только из-за содержащихся в нем ценных металлов, но и из-за существующих экологических проблем. Как уже говорилось, была сделана попытка оценить эколого-геохимическое состояние шлакоотвала [6]. По данным этих авторов, в почвенном слое, формирующемся над шлакоотвалом, фиксируются ураганные содержания цинка, свинца, меди, мышьяка и других элементов, которые смываются поверхностными водами в рядом расположенную реку Полевую. Судя по приведенному геохимическому спектру, в данном шлакоотвале идет активное разложение шлаков второго типа, которые как раз и содержат медноцинковые сульфиды. При этом, чтобы снизить экологические проблемы, достаточно из шлакоотвала убрать/вывезти шлаки второго типа, которые можно легко отделить и складировать их на другую площадку, в стороне от водосбора и т.д.

Заключение

Таким образом, нами детально рассмотрена минералогия медных шлаков Полевского металлургического завода. Установлено, что они представлены двумя типами, отличающимися друг от друга минералого-геохимическими характеристиками. Первый тип сложен фаялит-пижонитовым агрегатом с присутствием магнетита, стекла, форстерита, халькозина, купростибита, домейкита и меди. Второй тип представлен фаялит-авгитовым агрегатом с присутствием магнетита, брейтгауптита и сульфидов (идаита, кубанита, борнита, халькопирита, галенита). Первый тип шлака характеризуется «гипербазитовым» геохимическим трендом, а второй – «базитовым». Сделан вывод, что шлаки первого типа получились в результате переплавки «цементной меди», а второго типа – медноколчеданных руд Зюезельского месторождения. Шлаки Полевского завода можно переработать с выделением сульфидного и магнетитового концентратов. Шлаки второго типа активно разлагаются и заражают окружающую среду выносом халькофильных элементов, а также свинца, мышьяка и других элементов.

Список источников

1. Mineralogical properties of the copper slags from the Sar Cheshmeh smelter plant, Iran / Nasab M.S., Bafti S.B., Yarahmadi M.R., Maymand M.M., Khorasani K.J. // Minerals. 2022, vol. 12, article 1153. DOI: 10.3390/min12091153
2. Вещественный состав медных шлаков Алмалыкского медеплавильного завода (Узбекистан) / Сайитов С.С., Цой В.Д., Расулов Ш.М., Печерский Р.Д., Расулова А.В., Абдувайтов А.К., Асроров А.А. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2024. Т. 335. № 4. С. 148–158. DOI:10.18799/24131830/2024/4/4292
3. Determination of quantitative ratios (mechanical and dissolved) of copper, gold and silver losses in Vanyukov furnace slags under the conditions of the Balkhash Copper Smelter in Kazakhstan / Dosmukhamedov N., Shambulaev V., Dityatovskiy L., Zholdasbay Y., Argyn A. // Recycling. 2025, vol. 10, article 181. DOI: 10.3390/recycling10050181
4. Металлургические заводы Урала XVII–XX вв. Энциклопедия / под ред. В.В. Алексеева. Екатеринбург: Изд-во Академкнига, 2001. 536 с.
5. Макаров А.Б., Хасанова Г.Г., Койнов С.А. Минералого-геохимические особенности староледяных шлаков Полевского медеплавильного завода (Средний Урал, Свердловская область) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. 2018. № 21. С. 430–435.
6. Золотова Е.С., Рябинин В.Ф. Экологическая геохимия старого отвала медеплавильного шлака на Среднем Урале // Известия УГТУ. 2020. Вып. 2(58). С. 103–109.
7. Petrogenesis of Jian forsterite jade solely composed of end-member forsterite (Fo 99.8): Constrained by trace element and oxygen isotope / Peng B., He M., Yang M., Liu X., Sui X., Sun K., Wu Sh. // Ore Geology Re-

- views. 2022, vol. 150, article 105167. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.105167
8. Ерохин Ю.В., Тупиков И.Н., Ширяев П.Б. Медные шлаки Нейво-Рудянского завода (вещественный состав и геоэкология) // Отходы и ресурсы. 2025. Т. 12. № 3. Статья 09NZOR325. DOI:10.15862/09NZOR325
 9. Вещественный состав шлаков Среднеуральского медеплавильного завода / Ерохин Ю.В., Козлов П.С., Захаров А.В., Ширяев П.Б., Леонова Л.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. № 2. С. 78–87. DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-78-87
 10. Михеев В.И. Об альфа-, бета- и гамма-домейките // Записки ВМО. 1949. Ч. 78. № 1. С. 3–7.
 11. Emami M. «Toroud», The late motion for As-Sb bearing Cu production from 2nd millennium BC in Iran: An archaeometallurgical approach // Mediterranean Archaeology and Archaeometry. 2014, vol. 14(2), pp. 185–204.
 12. Самсонов Г.В., Дроздова С.В. Сульфиды. М.: Металлургия, 1972. 304 с.
 13. Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Леонова Л.В. Шлаки Благодатного медеплавильного завода (состав и геоэкология) // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 5. С. 75–86. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-5-75-86
 14. Юдыцкий А.П. Опыт подземного выщелачивания медных руд. М.: Экономиздат, 1962. 48 с.
 15. Инновационные технологии в реанимации ранее отработанных рудников на примере Гумешевского месторождения медистых глин / Алтушкин И.А., Левин В.В., Король Ю.А., Ситникова Т.И. // Цветные металлы. 2012. № 11. С. 37–41.
 16. Столяров Ю.М. Зюзельское колчеданное месторождение, Урал (новый взгляд на строение и генезис) // Уральский геологический журнал. 2003. № 3. С. 85–96.
 5. Makarov A.B., Khasanova G.G., Koynov S.A. Mineralogical and geochemical features of old slags of the Polevskoy copper smelter (Middle Urals, Sverdlovsk region). Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnyye chteniya pamyati P.N. Chirvinskogo [Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P.N. Chirvinsky]. Perm: Publishing House of Perm State University, 2018, vol. 21, pp. 430–435. (In Russ.)
 6. Zolotova E.S., Ryabinin V.F. Ecological geochemistry of an old copper smelting slag dump in the Middle Urals. Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta [Bulletin of Urals State Mining University]. 2020;(58):103-109. (In Russ.)
 7. Peng B., He M., Yang M., Liu X., Sui X., Sun K., Wu Sh. Petrogenesis of Jian forsterite jade solely composed of end-member forsterite (Fo 99.8): Constrained by trace element and oxygen isotope. Ore Geology Reviews. 2022;150:105167. doi:10.1016/j.oregeorev.2022.105167
 8. Erokhin Yu.V., Tupikov I.N., Shiryayev P.B. Copper slags of the Neivo-Rudyansky plant (material composition and geoecology). Otkhody i resursy [Waste and resources], 2025;12(3):09NZOR325. DOI: 10.15862/09NZOR325. (In Russ.)
 9. Erokhin Yu.V., Kozlov P.S., Zakharov A.V., Shiryayev P.B., Leonova L.V. Material composition of slags of the Sredneuralsk copper smelter. Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025;23(2):78-87. DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-78-87. (In Russ.)
 10. Mikheev V.I. On alpha-, beta- and gamma-domeykite. Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the All-Union Mineralogical Society]. 1949;78(1):3-7. (In Russ.)
 11. Emami M. «Toroud», The late motion for As-Sb bearing Cu production from 2nd millennium BC in Iran: An archaeometallurgical approach. Mediter. Archaeol. Archaeom. 2014;14(2):185-204.
 12. Samsonov G.V., Drozdova S.V. Sulfidy [Sulfides]. Moscow: Metallurgy, 1972, 304 p. (In Russ.)
 13. Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Leonova L.V. Slags of the Blagovatnoye copper smelter (composition and geoecology). Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2021;(5):75-86. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-5-75-86. (In Russ.)
 14. Yudytsky A.P. Opyt podzemnogo vyshchelachivaniya mednykh rud [Experience of underground leaching of copper ores]. Moscow: Ekonomizdat, 1962, 48 p. (In Russ.)
 15. Altushkin I.A., Levin V.V., Korol Yu.A., Sitnikova T.I. Innovative technologies in the resuscitation of previously developed mines on the example of the Gumeshevsky copper clay deposit. Tsvetnyye metally [Non-ferrous metals]. 2012;(11):37-41. (In Russ.)
 16. Stolyarov Yu.M. Zyuzelskoye pyrite deposit, Urals (new look at structure and genesis). Uralskiy geologicheskii zhurnal [Ural Geological Journal]. 2003;(3):85-96. (In Russ.)

References

Поступила 17.07.2025; принята к публикации 03.02.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 17/07/2025; revised 03/02/2026; published 30/06/2026

Ерохин Юрий Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: erokhin-yu@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-0577-5898

Макаров Анатолий Борисович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: makarova211253@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-4843-3422

Захаров Анатолий Владимирович – научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: zakharov-zav@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-8790-7892

Хиллер Вера Витальевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: hilvervit@mail.ru. ORCID: 000-0001-8491-4958

Леонова Любовь Владимировна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: lvleonova@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-7713-8994

Yury V. Erokhin – PhD (Eng.), Leading Researcher,
The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.
Email: erokhin-yu@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-0577-5898

Anatoly B. Makarov – DrSc (Eng.), Professor,
Urals State Mining University, Yekaterinburg, Russia.
Email: makarova211253@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-4843-3422

Anatoly V. Zakharov – Researcher,
The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.
Email: zakharov-zav@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-8790-7892

Vera V. Khiller – PhD (Eng.), Senior Researcher,
The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.
Email: hilvervit@mail.ru. ORCID: 000-0001-8491-4958

Lyubov V. Leonova – PhD (Eng.), Senior Researcher,
The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural Branch, Yekaterinburg, Russia.
Email: lvleonova@yandex.ru. ORCID: 0000-0002-7713-8994

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.77

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-67-74



ВЛИЯНИЕ МАРШРУТА ВОЛОЧЕНИЯ НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ СТАЛЕМЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ

Терентьев Д.В., Харитонов В.А., Шеметова Е.С., Усанов М.Ю., Платов С.И.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Процесс изготовления биметаллической проволоки включает два этапа: получение заготовки (катанки) и готовой продукции (проволоки). На основе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводившихся в Магнитогорском горно-металлургическом институте им. Г.И. Носова, учеными была разработана технология производства сталемедной катанки методом твердофазного соединения металлов и внедрена на одном из предприятий г. Магнитогорска. Данная технология позволила значительно повысить сцепление оболочки с сердечником и устойчивость процесса волочения катанки в проволоку. Однако при этом вопрос снижения затрат на производство биметаллической проволоки остался нерешенным. Поэтому важным является расчет эффективного маршрута волочения, который должен обеспечить получение качественной проволоки с минимальными затратами на ее изготовление. Для анализа выбран существующий маршрут изготовления проволоки диаметром 1,15 мм, включающий три передела и 20 протяжек на одном из предприятий г. Магнитогорска, а также предлагаемый маршрут волочения, где использовали методику, разработанную в нашем университете, которая основывается на оценке напряженно-деформированного состояния проволоки в очаге деформации. Результаты расчетов обеспечивают возможность получения проволоки заданного уровня качества при минимальных энерго- и материалозатратах. Анализ действующего и предлагаемого маршрутов волочения показал, что последний обеспечивает устойчивость процесса (значения коэффициентов запаса ниже предельных), требуемое качество проволоки за счет обеспечения равномерной деформации по сечению проволоки и высокую производительность за счет повышения стойкости волок и уменьшения суммарной длины проволоки, проходящей через волоки. При этом количество протяжек сократилось на 7 или 35%, экономия электроэнергии составила 23%. Это обеспечивает снижение затрат на покупку оборудования и амортизационные отчисления также на 35%.

Ключевые слова: сталемедная проволока, волочение, маршрут, кратность, конкурентоспособность

© Терентьев Д.В., Харитонов В.А., Шеметова Е.С., Усанов М.Ю., Платов С.И., 2026

Для цитирования

Влияние маршрута волочения на конкурентоспособность сталемедной проволоки / Терентьев Д.В., Харитонов В.А., Шеметова Е.С., Усанов М.Ю., Платов С.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 67-74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-67-74>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFLUENCE OF THE DRAWING ROUTE ON THE COMPETITIVENESS OF STEEL-COPPER WIRE

Terentyev D.V., Kharitonov V.A., Shemetova E.S., Usanov M.Yu., Platov S.I.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The bimetallic wire manufacturing process involves two stages: the production of the blank (rod) and the finished product (wire). Based on the research and development conducted at the Nosov Magnitogorsk Mining and Metallurgical Institute, scientists have developed a technology for producing steel-copper rod using solid-phase metal bonding and implemented it at one of the enterprises in Magnitogorsk. This technology has significantly improved the adhesion of the sheath to the core and the stability of the wire rod drawing process. However, the issue of reducing the cost of bimetallic wire production remains unresolved. Therefore, the calculation of an efficient drawing route is of great importance, as it should ensure the production of high-quality wire with minimal manufacturing costs. For the analysis, an existing route for producing wire with a diameter of 1.15 mm has been selected, which includes three processing stages and 20 drawing passes at one of the enterprises in Magnitogorsk. In addition, a proposed drawing route has been considered, developed using a methodology created at our university, based on the evaluation of the stress-strain state of the wire in the deformation zone. The calculation results make it possible to obtain wire of the required quality level with minimal energy and material consumption. An analysis of the existing and proposed drawing routes has showed that the latter ensures process stability (safety factor values remain below the limiting values), the required wire quality due to uniform deformation across the wire cross-section, and high productivity by increasing die life and reducing the total length of wire passing through the dies. At the same time, the number of drawing passes has been reduced by 7 (or 35%), and electricity consumption has decreased by 23%. This also leads to a 35% reduction in equipment purchase costs and depreciation expenses.

Key words: steel-copper wire, drawing, route, pass multiplicity, competitiveness

For citation

Terentyev D.V., Kharitonov V.A., Shemetova E.S., Usanov M.Yu., Platov S.I. Influence of the Drawing Route on the Competitiveness of Steel-Copper Wire. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 67-74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-67-74>

Введение

Современный этап функционирования и развития многих отраслей промышленности требует производства слоистых композиционных металлов, сочетающих в себе высокие электропроводные и прочностные свойства. Наибольшее и всевозрастающее применение находит сталемедная проволока, которая используется в качестве проводниковых и силовых элементов подвески контактной сети электрифицированных железных дорог, телефонных проводов, специальных микрокабелей, авиа- и сейсмографических кабелей, выводов радиокабелей и компонентов электронной техники [1]. Также происходит разработка и внедрение новых видов биметаллической проволоки, таких как платиниты, стальная легированная, из редкоземельных металлов, специального назначения [2].

Одним из важных показателей, определяющих уровень и объем потребления биметаллической проволоки, является ее конкурентоспособность, оцениваемая свойствами проволоки и затратами на ее производство и обеспечиваемая уровнем технического процесса ее изготовления.

Процесс изготовления биметаллической проволоки включает два этапа: получение заготовки (катанки) и готовой продукции (проволоки). Основной объем промышленного производства сталемедной проволоки в Российской Федерации (ранее в СССР) и

ведущих странах мира долгое время производился на основе металлургического способа. Технология производства включает в себя операции травления стального сердечника, получения биметаллического слитка путем заливки стального сердечника жидкой медью, прокатку слитка в катанку на сортовом стане и волочение на готовый размер на станах сухого и мокрого волочения, при необходимости с промежуточными отжигами [3]. Технология, несмотря на высокую стоимость и затраты, не обеспечивала требуемого сцепления оболочки со стержнем, что при дальнейшем волочении приводило к потере устойчивости процесса путем обрыва оболочки и ее стержня [4]. Для устранения этого при волочении использовали сравнительно небольшие единичные обжатия (вытяжки), что требовало многократных маршрутов волочения, увеличение сложности волочильного оборудования и другой инфраструктуры, а также приводило к дополнительным затратам.

На основе научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, проводившихся совместно с Магнитогорским калибровочным заводом и Магнитогорским горно-металлургическим институтом им. Г.И. Носова, была разработана технология производства сталемедной катанки методом твердофазного соединения металлов и внедрена на предприятии ООО «ЗМИ-Профит», г. Магнитогorsk [3-5].

Технологический процесс включает: одновременную подачу стальной проволоки и медной ленты; очистку поверхности стального сердечника электролитоплазменной обработкой и с очисткой поверхности медной ленты стальными щетками; сваривание продольного шва медной оболочки; однокомпонентную деформацию медной оболочки сталемедной заготовки на 20–25%; высокоскоростной поточный нагрев с промежуточными выдержками в течение 1–2 с в пароводяной среде; двухстадийную совместную деформацию слоистой заготовки, проволоки [3]. Это позволило значительно повысить сцепление оболочки с сердечником и устойчивость процесса волочения катанки в проволоку. Однако при этом вопрос снижения затрат на производство биметаллической проволоки остался нерешенным. Во-первых, новый способ получения катанки нельзя считать дешевым, во-вторых, отечественные производители практически не изменили подход к выбору среднего единичного обжатия, оставив его малым. Кроме того, при этом не были учтены особенности волочения биметаллической проволоки, которые использовали зарубежные производители подобной продукции [6, 7].

В связи с чем целью данной работы является оценка влияния кратности маршрута волочения на показатели качества проволоки и затраты на ее производство.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на одном из предприятий г. Магнитогорска. На этом предприятии изготавливают биметаллическую катанку диаметром 7,10 мм методом твердофазного соединения, а также осуществляют волочение готовой биметаллической проволоки диаметрами от 1,15 до 4,0 мм. Материал катанки: сердечник – сталь 10; оболочка – медь М1.

Волочение осуществляется в монолитных волоках с применением волочильных машин 6-кратных (Рубин 16/6) и 7-кратных (Рубин 8/7). Для анализа нами выбран маршрут изготовления проволоки минимального диаметра 1,15 мм, включающий три передела и 20 протяжек по следующей схеме:

1-й передел (машина 6-кратная):
7,10 $\frac{16\%}{}$ 6,50 $\frac{18\%}{}$ 5,90 $\frac{19\%}{}$ 5,30 $\frac{19\%}{}$, 4,77 $\frac{18\%}{}$ 4,30 $\frac{15\%}{}$ 3,96;

2-й передел (машина 7-кратная):
3,96 $\frac{17\%}{}$ 3,60 $\frac{16\%}{}$ 3,30 $\frac{15\%}{}$ 3,05 $\frac{14\%}{}$ 2,82 $\frac{16\%}{}$ 2,58 $\frac{17\%}{}$
2,35 $\frac{16\%}{}$ 2,15;

3-й передел (машина 7-кратная):
2,15 $\frac{18\%}{}$ 1,95 $\frac{18\%}{}$ 1,77 $\frac{17\%}{}$ 1,61 $\frac{16\%}{}$ 1,47 $\frac{16\%}{}$ 1,35 $\frac{15\%}{}$
1,24 $\frac{14\%}{}$ 1,15.

При анализе и расчете маршрутов волочения использовали методику, разработанную в нашем университете [9, 10, 12], которая основывается на оценке напряженно-деформированного состояния проволоки в очаге деформации. Данная методика обеспечивает возможность получения проволоки заданного уровня

качества при минимальных энерго- и материалозатратах. Особенности волочения биметаллической проволоки были учтены введением в методику расчета рекомендаций, изложенных в источниках [4, 8]. По этой же методике был рассчитан новый малооборотный маршрут волочения:

7,10 $\frac{28\%}{}$ 6,02 $\frac{27\%}{}$ 5,13 $\frac{27\%}{}$ 4,38 $\frac{26\%}{}$ 3,76 $\frac{26\%}{}$ 3,24 $\frac{25\%}{}$
2,81 $\frac{25\%}{}$ 2,44 $\frac{25\%}{}$ 2,13 $\frac{24\%}{}$ 1,87 $\frac{23\%}{}$ 1,64 $\frac{23\%}{}$ 1,45 $\frac{22\%}{}$
1,29 $\frac{21\%}{}$ 1,15.

В качестве основных критериев оценки волочения были взяты устойчивость процесса волочения (коэффициент запаса прочности), так как метод твердофазного соединения гарантирует требуемое сцепление медной оболочки со стальным сердечником [3]; качество проволоки (дельта-фактор – равномерность деформации – Δ); производительность процесса (стойкость волок).

Устойчивый процесс волочения возможен при соблюдении неравенства $\sigma_{\text{вол}} < \sigma_{\text{T}}$, иначе пластическая деформация будет продолжаться и после выхода протягиваемого металла из волочильного инструмента. В результате происходят затяжки (утонения) проволоки и частые обрывы. Для ведения устойчивого (безобрывного) процесса волочения должно строго соблюдаться в течение всего процесса волочения следующее соотношение [11]:

$$\gamma_3 = \frac{\sigma_{\text{T}}}{\sigma_{\text{вол}}}, \quad (1)$$

где σ_{T} , $\sigma_{\text{вол}}$ – соответственно предел текучести и напряжение волочения на выходе проволоки из зоны деформации; γ_3 – коэффициент запаса прочности при волочении (1,4–2,0). Значение 1,4 считается минимальным, при котором еще можно гарантировать отсутствие обрывов, а 2,0 – это уже запас, который позволяет избежать проблем при возможных отклонениях в материале или условиях процесса.

Для оценки вероятности разрушения заготовки используются значения гидростатического напряжения, а для оценки влияния геометрии рабочего канала волоки – дельта-фактор (неравномерность Δ). Дельта-фактор зависит от геометрии рабочего канала волоки и степени деформации. Принимаемое им значение характеризует глубину проникновения сжимающих напряжений, так называемых «конусов скольжения» в очаге деформации при волочении [10]. Если дельта-фактор находится в пределах 1,0 до 2,0, то в очаге деформации действуют сжимающие напряжения на оси проволоки и обеспечивается высокая равномерность деформации.

Дельта-фактор определяли по следующей формуле [11]:

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} (1 + \sqrt{1-r})^2, \quad (2)$$

где r – обжатие за проход; α – полуугол рабочего конуса волоки, рад.

Стойкость волок определяет как производительность процесса волочения, путем воздействия на коэффициент использования оборудования, так и издержки производства. Высокий износ волок снижает коэффициент использования оборудования из-за внеплановой остановки оборудования для замены волок и требует дополнительной перестановки волок, что приводит к росту затрат.

Стойкость волок во многом определяется силой трения, действующей на контакте металл-волока, которое определяется зависимостью [13]

$$F = fN, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения; N – сила нормального давления, Па.

В качестве оценки критерия стойкости волок принимаем нормальное напряжение, действующее в очаге деформации. В основу расчета было взято упрощенное условие пластичности при волочении проволоки в монолитных волоках [13]:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_T, \quad (4)$$

где σ_1 – напряжение волочения, кг/мм²; σ_2 – нормальное напряжение, кг/мм²; σ_T – предел текучести, кг/мм².

В проводимых сравнительных оценочных расчетах за показатель сопротивления деформации приняты значение предела прочности.

Стойкость волок определяется не только трением, но и длиной проволоки, проходящей через них.

Суммарная длина проволоки, прошедшей через все волоки [13], определяется как

$$L_{др.деф} = \mu_{\Sigma} \frac{\delta_{\Sigma}}{\delta_{ед}}, \quad (5)$$

где $\delta_{ед}$ – среднее значение обжатий,

Таблица 1. Существующий маршрут волочения сталемедной проволоки диаметром 1,15 мм, 1-й передел
Table 1. Existing route for drawing steel-copper wire with a diameter of 1.15 mm, 1st stage

Номер перехода	0 (заг.)	1	2	3	4	5	6
Диаметр проволоки, мм	7,10	6,50	5,90	5,30	4,77	4,30	3,96
Обжатие единичное, %		16,19	17,61	19,30	19,00	18,74	15,19
Обжатие суммарное, %		16,19	30,95	44,28	54,86	63,32	68,89
Вытяжка единичная		1,19	1,21	1,24	1,23	1,23	1,18
Суммарная вытяжка		1,19	1,45	1,79	2,22	2,73	3,21
Полуугол волоки, град		6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Коэффициент трения		0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Степень неравномерности Δ		2,37	2,16	1,95	1,99	2,02	2,54
Площадь проволоки F , мм ²	39,59	33,18	27,34	22,06	17,87	14,52	12,32
Усилие волочения, кН		4,94	4,58	4,21	3,55	3,00	2,23
Усилие волочения суммарное, кН		4,94	9,52	13,73	17,28	20,28	22,51
Напряжение волочения, кг/мм ²		14,89	16,74	19,08	19,85	20,66	18,14
Предел прочности проволоки, кг/мм ²	41,00	42,85	44,98	47,46	50,03	52,69	54,91
Коэффициент запаса прочности		2,81	2,62	2,42	2,46	2,49	2,97
Нормальное напряжение, кг/мм ²		27,03	27,17	27,14	28,90	30,70	35,66

$$\delta_{ед} = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{n};$$

n – число переходов.

Чем больше дробность деформации и, соответственно, больше число переходов при одинаковой величине суммарной деформации, тем больше общая длина проволоки, прошедшей через все переходы, и тем выше затраты на волочение единицы массы готовой продукции.

Полученные результаты и их обсуждение

С использованием новой методики [9, 10, 12] был проведен расчет существующего маршрута волочения (табл. 1–3), а также предлагаемого маршрута волочения (табл. 4).

На основе результатов полученных расчетов провели сравнительный анализ существующего и предлагаемого маршрутов волочения на устойчивость процесса волочения (коэффициент запаса прочности), качество проволоки (дельта-фактор – равномерность деформации Δ), производительность процесса (стойкость волок) для сталемедной проволоки (табл. 5), а также построили графики (рис. 1-3, где 1, 2, 3 – номер передела на существующем маршруте волочения).

В табл. 5 проведен сравнительный анализ существующего и предлагаемого маршрутов волочения для проволоки диаметром 1,15 мм. Видно, что у предлагаемого маршрута волочения количество протяжек (количество барабанов, двигателей, смазочного материала) сократилось на 35%, суммарное усилие волочения снизилось на 23%. Стойкость волок определяется не только трением, но и длиной проволоки, проходящей через них. Известно, что при одинаковой величине суммарной деформации общая длина проволоки, прошедшей через все волоки маршрута, растет с увеличением кратности волочения. Это повышает трудоемкость процесса и затраты энергии. Так, суммарная длина проволоки на действующем маршруте волочения на 29 % больше, чем проволоки, полученной по предлагаемому маршруту [13].

Таблица 2. Существующий маршрут волочения сталемедной проволоки диаметром 1,15 мм, 2-й пердел
Table 2. Existing route for drawing steel-copper wire with a diameter of 1.15 mm, 2nd stage

Номер перехода		1	2	3	4	5	6	7
Диаметр проволоки, мм	3,96	3,60	3,30	3,05	2,82	2,58	2,35	2,15
Обжатие единичное, %		17,36	15,97	14,58	14,51	16,30	17,03	16,3
Обжатие суммарное, %		74,29	78,40	81,55	84,22	86,80	89,04	90,83
Вытяжка единичная		1,21	1,19	1,17	1,17	1,19	1,21	1,19
Суммарная вытяжка		3,89	4,63	5,42	6,34	7,57	9,13	10,91
Полуугол волоки, град		6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Коэффициент трения		0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Степень неравномерности		2,20	2,41	2,66	2,67	2,36	2,24	2,36
Площадь проволоки F , мм ²		10,18	8,55	7,31	6,25	5,23	4,34	3,63
Усилие волочения, кН		2,16	1,77	1,46	1,30	1,24	1,12	0,95
Усилие волочения суммарное, кН		24,67	26,44	27,9	29,20	30,44	31,56	32,50
Напряжение волочения, кг/мм ²		21,18	20,68	20,02	20,75	23,77	25,82	26,04
Предел прочности, кг/мм ²		57,59	60,15	62,57	65,07	68,03	71,28	74,52
Коэффициент запаса прочности		2,66	2,85	3,06	3,08	2,80	2,70	2,80
Нормальное напряжение, кг/мм ²		36,61	39,47	42,37	44,32	44,26	45,46	48,48

Таблица 3. Существующий маршрут волочения сталемедной проволоки диаметром 1,15 мм, 3-й пердел
Table 3. Existing route for drawing steel-copper wire with a diameter of 1.15 mm, 3rd stage

Номер перехода		1	2	3	4	5	6	7
Диаметр проволоки, мм	2,15	1,95	1,77	1,61	1,47	1,35	1,24	1,15
Обжатие единичное, %		17,74	17,61	17,26	16,64	15,66	15,63	13,99
Обжатие суммарное, %		17,74	32,22	43,92	53,25	60,57	66,74	97,01
Вытяжка единичная		1,22	1,21	1,21	1,2	1,19	1,19	1,16
Суммарная вытяжка		1,22	1,48	1,78	2,14	2,54	3,01	3,5
Полуугол волоки, град		6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Коэффициент трения		0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Степень неравномерности		2,15	2,16	2,21	2,3	2,46	2,47	2,78
Площадь проволоки F , мм ²		2,99	2,46	2,04	1,7	1,43	1,21	1,04
Усилие волочения, кН		0,88	0,75	0,64	0,54	0,46	0,4	0,33
Усилие волочения суммарное, кН		0,88	1,63	2,27	2,81	3,27	3,67	4,00
Напряжение волочения, кг/мм ²		29,31	30,57	31,53	32,02	31,83	33,17	31,59
Предел прочности, кг/мм ²		78,25	82,13	86,11	90,12	94,04	98,12	101,89
Коэффициент запаса прочности		2,61	2,62	2,67	2,75	2,89	2,90	3,17
Нормальное напряжение, кг/мм ²		48,94	51,56	54,58	58,10	62,21	64,95	70,30

Таблица 4. Предлагаемый маршрут волочения сталемедной проволоки диаметром 1,15 мм
Table 4. Proposed route for drawing steel-copper wire with a diameter of 1.15 mm

Номер перехода	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Диаметр проволоки, мм	7,10	6,02	5,13	4,38	3,76	3,24	2,81	2,44	2,13	1,87	1,64	1,45	1,29	1,15
Обжатие единичное, %		28,11	27,38	27,10	26,31	25,75	24,78	24,60	23,80	22,92	23,09	21,83	20,85	20,53
Обжатие суммарное, %		28,11	47,79	61,94	71,95	79,18	84,34	88,19	91,00	93,06	94,66	95,83	96,70	97,38
Вытяжка		1,39	1,38	1,37	1,36	1,35	1,33	1,33	1,31	1,30	1,30	1,28	1,26	1,26
Суммарная вытяжка		1,39	1,92	2,63	3,57	4,80	6,38	8,47	11,11	14,42	18,74	23,98	30,29	38,12
Полуугол, град.		6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6
Коэффициент трения		0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Степень неравномерности		1,27	1,31	1,33	1,37	1,41	1,47	1,49	1,54	1,61	1,60	1,70	1,79	1,83
Площадь проволоки F , мм ²	39,59	28,46	20,67	15,07	11,10	8,24	6,20	4,68	3,56	2,75	2,11	1,65	1,31	0,55
Усилие волочения, кН		7,16	5,50	4,29	3,32	2,60	2,03	1,63	1,29	1,03	0,85	0,67	0,54	0,55
Усилие волочения суммарное, кН		7,16	12,66	16,95	20,28	22,88	24,91	26,54	27,83	28,85	29,70	30,37	30,91	0,52
Напряжение волочения, кг/мм ²		25,17	26,59	28,50	29,90	31,57	32,71	34,87	36,20	37,35	40,14	40,60	41,35	1,1
Предел прочности, кг/мм ²	41,00	44,53	48,24	52,21	56,35	60,70	65,18	69,95	74,87	79,91	85,33	90,75	96,21	1,04
Коэффициент запаса прочности		1,70	1,74	1,76	1,82	1,85	1,92	1,94	2,00	2,07	2,06	2,17	2,26	99,06
Нормальное напряжение, кг/мм ²		18,83	21,65	23,71	26,45	29,13	32,47	34,88	38,67	42,56	44,19	50,13	54,86	0,45

Таблица 5. Сравнительный анализ показателей существующего и предлагаемого маршрутов волочения
 Table 5. Comparative analysis of the indicators of the existing and proposed drawing routes

Показатели	Существующий маршрут волочения	Предлагаемый маршрут волочения	Эффективность предлагаемого маршрута волочения, %
Количество протяжек (количество барабанов, двигателей, мыльниц)	20	13	35,0
Усилие волочения суммарное, кН	40	31	23,0
Количество волок	20	13	35,0
Суммарная длина проволоки на маршруте волочения, м	5,71	4,04	29,0

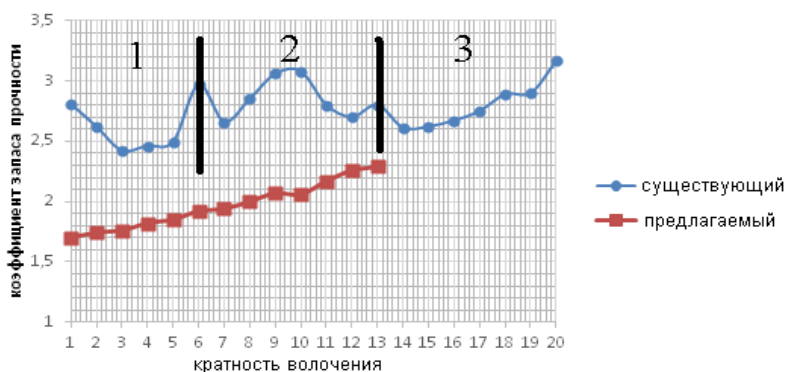


Рис. 1. Изменение коэффициента запаса прочности от кратности маршрутов волочения
 Fig. 1. Change in the safety factor depending on the number of drawing routes

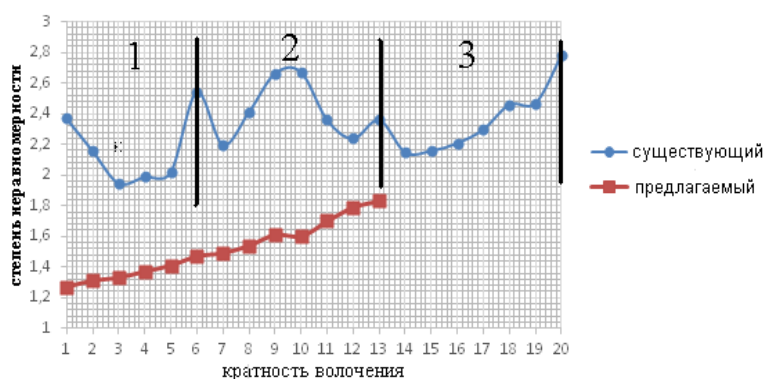


Рис. 2. Изменение степени неравномерности (Δ) в очаге деформации (значения дельта-фактора) от кратности маршрутов волочения
 Fig. 2. Change in the degree of unevenness (Δ) in the deformation zone (delta factor values) depending on the number of drawing routes

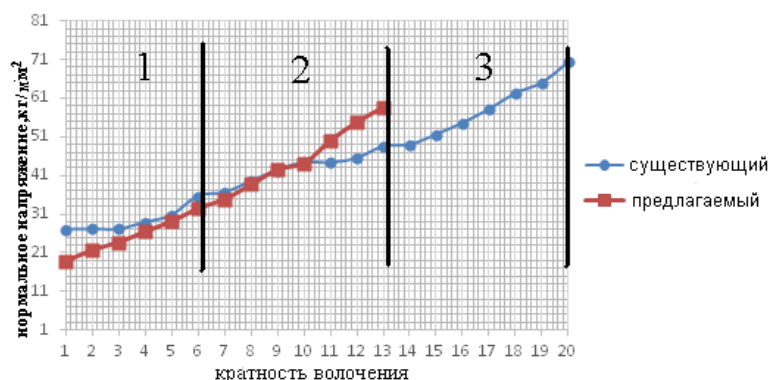


Рис. 3. Изменение нормального напряжения от кратности маршрутов волочения
 Fig. 3. Change in normal stress depending on the number of drawing routes

На графике на **рис. 1** показано изменение коэффициента запаса прочности от кратности маршрутов волочения. Из графика видно, что предлагаемый маршрут волочения обеспечивает высокую устойчивость процесса (значения коэффициентов запаса ниже предельных).

Изменение степени неравномерности в очаге деформации (значения дельта-фактора) от кратности маршрутов волочения представлен на графике на **рис. 2**. Из графика видно, что дельта-фактор на существующем маршруте значительно превышает значение 2,0, то есть здесь преобладают напряжения растяжения на оси проволоки, что может привести к ее разрушению. Существующий маршрут волочения неравномерный, присутствуют выраженные скачки. Предлагаемый маршрут волочения – равномерный.

График на **рис. 3** показывает, что, несмотря на значительное сокращение количества волок, меньшее количество волок работает в условиях трения лучше, чем волокна в действующем маршруте. Это позволяет сделать вывод о возможности снижения прямых затрат на волокна и повышения производительности процесса.

Заключение

Сравнительный технико-экономический анализ действующего и предлагаемого маршрутов волочения показал, что последний обеспечивает высокую устойчивость процесса (значения коэффициентов запаса ниже предельных), требуемое качество проволоки за счет обеспечения равномерной деформации по сечению проволоки и высокую производительность за счет повышения стойкости волок и уменьшения суммарной длины проволоки, проходящей через волокна. При этом количество протяжек сократилось на 7 или 35%. Это обеспечивает снижение затрат на покупку оборудования и амортизационные отчисления также на 35%. В условиях предприятия из процесса получения проволоки диаметром 1,15 мм может быть выведена семикратная волочильная машина, а при модернизации процесса вместо двух машин целесообразно установить одну тринадцатикратную машину, что значительно сократит затраты.

Список источников

1. Повышение качества сталемедной продукции и совершенствование технологии твердофазного соединения компонентов биметалла / Рашников С.Ф., Щербо Ю.А., Ситников И.В., Сычев А.Ю., Чукин М.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. №4 (16). С. 52-54.
2. Андреев А.В. Способ изготовления биметаллической проволоки из разнородных металлов холодным волочением: патент на изобретение RU 2628232 С2, 15.08.2017. Заявка № 2016103755 от 04.02.2016.
3. Стабильность процессов производства сталемедной катанки методом твердофазного соединения: монография / Чукин М.В., Ситников И.В., Щербо Ю.А., Копцева Н.В. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. 234 с.
4. Стальная проволока: монография / Х.Н. Белалов, А.А. Клековкин, Н.А. Клековкина, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 689 с.

5. Огарков Н.Н., Шеметова Е.С. Условие контакта между сердечником и оболочкой, исключющее их расслаивание во внеконтактной зоне при волочении // Сталь. 2010. №12. С. 48-50.
6. Investigation wavy interface forming and stretching in severe plastic deformed copper/steel bimetallic rod. Rashidi A.M., Elemadi M. Mech. Adv. Mater. And Struct. 2021. 28, no. 24, pp. 2595-2604.
7. Investigation of the Bimetal Clad Drawing by Uper Bound Method Malaki Massoud, Maleki Hamid, Malaki Mohsen, Roohani Hamid Reza. J. Mater. Eng. And Perform. 2013. 22, no. 4, pp. 943-951.
8. Битков В.В. Анализ неоднородности деформации при волочении композиционных прутков и проволоки // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 8. С. 21-27.
9. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Совершенствование деформационных режимов волочения проволоки из углеродистых марок стали в монолитных и роликовых волоках: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им.Г.И. Носова, 2020. 133 с.
10. Усанов М.Ю. Совершенствование технологии изготовления углеродистой проволоки на основе повышения эффективности деформационных режимов волочения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2018. 16 с.
11. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Производство пружинной проволоки: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 151 с.
12. Оценка напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки при волочении в монолитной волоке на основе моделирования / Терентьев Д.В., Усанов М.Ю., Шеметова Е.С., Платов С.И., Харитонов В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т.22. №3. С. 170-177.
13. Никифоров Б.А., Харитонов В.А., Копьев А.В. Технология волочения проволоки и плоченой ленты: учеб. пособие. Магнитогорск: МГТУ, 1999. 354 с.

References

1. Rashnikov S.F., Shcherbo Yu.A., Sitnikov I.V., Sychev A.Yu., Chukin M.V. Improvement of the quality of steel-copper products and development of solid-phase bonding technology for bimetal components. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2006;(4(16)):52-54. (In Russ.)
2. Andreev A.V. *Sposob izgotovleniya bimetallicheskoj provoloki iz raznorodnykh metallov kholodnym volocheniem* [Method for manufacturing bimetallic wire from dissimilar metals by cold drawing]. Patent RU, no. 2628232 C2, 2017.
3. Chukin M.V., Sitnikov I.V., Shcherbo Yu.A., Koptseva N.V. *Stabilnost protsessov proizvodstva stalemednoy kataniki metodom tverdogfaznogo soedineniya: monografiya* [Stability of production processes of steel-copper wire rod by solid-phase bonding method: monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2006, 234 p. (In Russ.)
4. Belalov Kh.N., Klekovkin A.A., Klekovkina N.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. *Stalnaya provoloka*

- ka: monografiya* [Steel wire: monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 689 p. (In Russ.)
5. Ogarkov N.N., Shemetova E.S. Contact condition between the core and the sheath preventing delamination in the non-contact zone during drawing. *Stal* [Steel]. 2010;(12):48-50. (In Russ.)
 6. Rashidi A.M., Elemadi M. Investigation of wavy interface forming and stretching in severe plastic deformed copper/steel bimetallic rod. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2021;28(24):2595-2604.
 7. Malaki M., Maleki H., Malaki M., Roohani H.R. Investigation of the bimetal clad drawing by upper bound method. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013;22(4):943-951.
 8. Bitkov V.V. Analysis of deformation heterogeneity during drawing of composite rods and wire. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blanking Productions in Mechanical Engineering]. 2010;(8):21-27. (In Russ.)
 9. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. *Sovershenstvovanie deformatsionnykh rezhimov volocheniya provoloki iz uglerodistykh marok stali v monolitnykh i rolkovykh volokakh: monografiya* [Improvement of deformation modes for drawing carbon steel wire in monolithic and roller dies: monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2020, 133 p. (In Russ.)
 10. Usanov M.Yu. *Sovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniya uglerodistoy provoloki na osnove povysheniya effektivnosti deformatsionnykh rezhimov volocheniya: avto-ref. dis. kand. tekhn. nauk* [Improvement of carbon steel wire production technology based on increasing the efficiency of drawing deformation regimes. Abstract of Ph.D. dissertation]. Magnitogorsk, 2018, 16 p.
 11. Kharitonov V.A., Gallyamov D.E. *Proizvodstvo pruzhinnoy provoloki: ucheb. posobie* [Production of spring wire: study guide]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, 151 p. (In Russ.)
 12. Terentyev D.V., Usanov M.Yu., Shemetova E.S., Platov S.I., Kharitonov V.A. Evaluation of the stress-strain state of steel-copper wire during drawing in a monolithic die based on modeling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;22(3):170-177. (In Russ.)
 13. Nikiforov B.A., Kharitonov V.A., Kopev A.V. *Tekhnologiya volocheniya provoloki i plyushchenoy lenty: ucheb. posobie* [Wire drawing and flat strip technology: study guide]. Magnitogorsk: Publishing House of NMSTU, 1999, 354 p. (In Russ.)

Поступила 18.09.2025; принята к публикации 11.11.2025; опубликована 30.06.2026
Submitted 18/09/2025; revised 11/11/2025; published 30/06/2026

Терентьев Дмитрий Вячеславович – доктор технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: dtterentyev@mail.ru. ORCID 0000-0001-7960-180X

Харитонов Вениамин Александрович – кандидат технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: hva-46@yandex.ru ORCID 0000-0003-3487-7110

Шеметова Елена Сергеевна – старший преподаватель,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: hellensh88@list.ru. ORCID 0000-0002-3412-0401

Усанов Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: barracuda_m@mail.ru. ORCID0000-0002-5920-3449

Платов Сергей Иосифович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: psipsi@mail.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Dmitry V. Terentyev – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: dtterentyev@mail.ru. ORCID 0000-0001-7960-180X

Veniamin A. Kharitonov – PhD (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email:hva-46@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3487-7110

Elena S. Shemetova – Senior Lecturer,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: hellensh88@list.ru. ORCID 0000-0002-3412-0401

Mikhail Yu. Usanov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email:barracuda_m@mail.ru. ORCID0000-0002-5920-3449

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email:psipsi@mail.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.771.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-75-81

ВЫБОР КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ НЕПРЕРЫВНОГО СОРТОВОГО СТАНА ДЛЯ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ ШХ15

Моллер А.Б., Тулупов О.Н., Левандовский С.А., Михалев С.В., Михалев А.В., Савва А.Д.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Повышение требований к качеству катанки из подшипниковых сталей, предназначенной для последующего волочения и изготовления тел качения подшипников малотоннажных партий, обуславливает необходимость разработки технологических решений для компактных литейно-прокатных производств. При работе с квадратной заготовкой малого сечения (до 42×42 мм) возрастает влияние геометрических отклонений (вариативность размера по стороне и ромбовидность), температурных градиентов и нестабильности режимов нагрева и охлаждения на устойчивость процесса прокатки и качество продукции (геометрия, дефекты поверхности, формирование микроструктуры стали ШХ15). Цель работы – обоснование технологии прокатки катанки диаметром 5,0–18 мм преимущественно из стали ШХ15 и определение требований к составу оборудования непрерывного сортового стана с учетом ограничений производственных площадей и объема производства. Методы исследования включали анализ деформационных и скоростных условий прокатки, оценку технологических рисков, а также численное моделирование формоизменения и энергосиловых параметров в первых проходах при подборе размеров и формы заготовки. Получены зависимости заполнения первого калибра и энергосиловых показателей от размеров и температуры заготовки; уточнены предельные значения ромбовидности, при которых сохраняется устойчивость захвата и минимизируется риск дефектообразования. Обоснованы требования к индукционному нагреву, включая необходимость синхронизации темпа нагрева с минимальной скоростью начала прокатки, и к режимам двухстадийного охлаждения катанки (линия типа Стелмор) для обеспечения требуемого структурного состояния. Практическая значимость результатов заключается в возможности использования предложенных решений при проектировании и настройке оборудования линии «нагрев – прокатка – охлаждение – смотка» для высококачественной катанки из стали ШХ15.

Ключевые слова: катанка, сталь ШХ15, непрерывный сортовой стан, ромбовидность заготовки, индукционный нагрев, калибровка валков, линия Стелмор, энергосиловые параметры

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда, проект №26-19-20025 <https://rscf.ru/project/26-19-20025/>

© Моллер А.Б., Тулупов О.Н., Левандовский С.А., Михалев С.В., Михалев А.В., Савва А.Д., 2026

Для цитирования

Выбор компоновочных решений непрерывного сортового стана для подшипниковой стали ШХ15 / Моллер А.Б., Тулупов О.Н., Левандовский С.А., Михалев С.В., Михалев А.В., Савва А.Д. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 75-81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-75-81>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SELECTION OF LAYOUT SOLUTIONS FOR A CONTINUOUS BAR MILL FOR SHKH15 BEARING STEEL

Moller A.B., Tulupov O.N., Levandovsky S.A., Mikhalev S.V., Mikhalev A.V., Savva A.D.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The increasing quality requirements for bearing steel wire rod intended for subsequent drawing and production of rolling elements for small-batch bearing manufacturing necessitate the development of technological solutions for compact casting and rolling facilities. When processing small-section square billets (up to 42×42 mm), the influence of geometric deviations (side dimension variation and rhomboidity), temperature gradients, and instability of heating and cooling conditions on rolling process stability and product quality (geometry, surface defects, and microstructure formation in ShKh15 steel) becomes increasingly significant. **Objectives.** The aim of this study is to substantiate the technology for rolling wire rod with diameters of 5.0-18 mm, primarily from ShKh15 bearing steel, and to determine the equipment requirements for a continuous bar mill considering the limitations of production area and output capacity. **Methods Applied.** The research methods included the analysis of deformation and speed conditions during rolling, assessment of technological risks, and numerical simulation of form change and power parameters in the initial passes when selecting billet dimensions and shape. **Result.** Dependencies between the filling of the first groove and the power parameters on the billet dimensions and temperature were established. The limiting values of billet rhomboidity, at which stable biting conditions are maintained and the risk of defect formation is minimized, were determined. Requirements for induction heating were substantiated, including the need to synchronize the heating rate with the minimum rolling start speed, as well as requirements for two-stage wire rod cooling (Stelmor-type line) to ensure the required microstructure state. **Practical Relevance.** The practical relevance of the results lies in the possibility of applying the proposed solutions in the design and adjustment of equipment for the integrated “heating-rolling-cooling-coiling” line intended for the production of high-quality wire rod from ShKh15 steel.

Keywords: wire rod, ShKh15 steel, continuous bar mill, billet rhomboidity, induction heating, roll pass design, Stelmor line, power parameters.

The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant No26-19-20025 (Available at: <https://rscf.ru/project/26-19-20025/>)

For citation

Moller A.B., Tulupov O.N., Levandovsky S.A., Mikhalev S.V., Mikhalev A.V., Savva A.D. Selection of Layout Solutions for a Continuous Bar Mill for ShKh15 Bearing Steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 75-81. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-75-81>

Введение

Одним из ключевых направлений развития современной металлургии является создание технологических цепочек, обеспечивающих выпуск высококачественной металлопродукции при снижении удельных затрат энергии и металлоемкости оборудования. Для подшипниковых сталей, в том числе ШХ15, требования к качеству особенно жесткие: контролируются неметаллические включения, глубина обезуглероженного слоя, карбидная неоднородность, структура после горячей прокатки и после последующих операций сфероидизирующего отжига и волочения [1].

Наличие дефектов поверхности, закатов, вкатанной окалины, а также микроструктурных неоднородностей приводит к надрывам и обрывам при волочении, увеличивает брак и снижает ресурс изделий. В условиях рассматриваемой технологии исходная заготовка должна быть получена методом непрерывного литья и деформации и иметь сечение не более 42×42 мм при длине порядка 19 м. Такая заготовка позволяет реализовать компактную линию, однако малое сечение повышает требования к точности гео-

метрии и к обеспечению достаточной вытяжки для получения проката диаметром 14–18 мм. Одновременно ограничения по площадям цеха вынуждают применять компоновочные решения с изменением направления потока, что дополнительно усложняет требования к синхронизации скоростей, надежности транспортировки и системам безопасности.

Цель работы и постановка задачи

Цель работы – обоснование технологии прокатки катанки и пруткового проката на непрерывном сорто-вом стане с ориентиром на выпуск катанки диаметром 5,0–18 мм в мотках преимущественно из стали ШХ15, предназначенной для последующего волочения, и определение состава основного оборудования линии. Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Проанализировать исходные данные и ограничения к заготовке, сортаменту, производительности и компоновке.
2. Выделить технические, технологические и организационные риски реализации производственной линии.

3. Исследовать влияние вариативности геометрических параметров заготовки и ромбовидности на заполнение первого калибра и энергосиловые параметры.

4. Оценить риски обеспечения требуемых режимов индукционного нагрева при последовательной задаче заготовок и синхронизации с минимальной скоростью начала прокатки.

5. Обосновать требования к охлаждению катанки на линии типа Стелмор для получения требуемой микроструктуры и технологичности при метизном переделе.

6. Сформировать требования к составу оборудования, включая черновые и чистовые группы клетей, ножницы, системы термоупрочнения (опционально), холодильники и бунтовую линию.

Исходные данные и ограничения

В качестве исходных данных приняты следующие положения и ограничения проектируемой линии.

Заготовка: квадрат не более 42×42 мм, длиной порядка 19 м, с радиусами скругления углов 4 мм; заготовка должна быть изготовлена методом непрерывного литья и деформации с минимизацией усадочных дефектов и пор, характерных для НЛЗ. Марочный сортамент включает углеродистые, низколегированные и легированные стали; приоритет – сталь ШХ15.

Продукция: горячекатаный круг диаметром 5,0–18 мм в мотках массой не менее 160 кг для ШХ15 и не менее 250 кг для других марок, а также арматурный профиль в прутках длиной 11,7 м (опция). Производительность: проектный выпуск порядка 30 тыс. т/год при одноручевой поштучной прокатке. Скорость начала прокатки в первой черновой клетке должна составлять 0,15–0,2 м/с (предпочтительно не ниже 0,2 м/с), что критично для предотвращения остывания и формирования температурного градиента и быстрого образования сетки разгара [2, 3].

Нагрев: горячий и холодный посад с подогревом заготовок в проходном индукционном нагревателе. Температура начала прокатки принята 1020°C (допуск уточняется при наладке). Компоновка: ограничения по длине и ширине цеха требуют отказа от классической прямолинейной компоновки и использования решений с поворотом потока металла на участках черновой/чистовой прокатки, транспортер витков или холодильника.

Ключевые технологические риски и подходы к их анализу

Для рассматриваемой линии выделены риски, оказывающие наибольшее влияние на качество катанки и устойчивость процесса.

Риск недостаточной деформационной проработки металла при малом сечении заготовки. Для обеспечения качественных показателей в верхнем диапазоне сортамента (диаметр 14–18 мм) требуется достаточная вытяжка. При сечении 42×42 мм площадь заготовки составляет 1764 мм². Для круга диаметром 14 мм

площадь 153 мм², что соответствует коэффициенту вытяжки около 11,5; для диаметра 16 мм – около 8,8 мм², что ниже требуемого уровня и не обеспечивает необходимой величины окува.

Риск дефектов поверхности при разделении литого полупродукта и наличии облоя/заусенцев. Такие дефекты могут закатываться в калибрах и делать катанку непригодной к волочению [4, 5].

Риск неустойчивости процесса из-за вариативности размеров и ромбовидности. Отклонения геометрии изменяют условия захвата, заполнения калибров, натяжения в непрерывной группе и износ инструмента.

Риск несоответствия режимов нагрева и прокатки. Скорость нагрева в индукторе и минимально допустимая скорость начала прокатки должны быть согласованы; при понижении скорости прокатки возрастает остывание и неравномерность температурного поля по длине.

Риск недостижения требуемой микроструктуры ШХ15 после прокатки и охлаждения. Для последующего метизного передела критично получение структурного состояния, обеспечивающего технологичность сфероидизирующего отжига и волочения. Ошибки режима охлаждения приводят к повышенной твердости и неоднородности структуры [6, 7].

Влияние вариативности размеров заготовки на заполнение первого калибра и энергосиловые параметры

Первый проход черновой группы является наиболее чувствительным к отклонениям размеров заготовки, поскольку именно здесь формируется первичная геометрия раската, задаются условия устойчивого захвата и определяется риск переполнения калибра. Рассмотрена прокатка квадрата «на сторону» в первом овальном калибре 36×48 мм при варьировании размеров квадрата 41×41, 42×42 и 43×43 мм. Численное моделирование показало, что при увеличении стороны квадрата возрастает степень заполнения калибра и растут энергосиловые показатели. При стороне 43 мм появляется риск переполнения и формирования заката в последующих проходах (табл. 1). При уменьшении стороны до 41 мм снижается заполнение и изменяются условия вытяжки и уширения, что негативно влияет на воспроизводимость размеров.

Таблица 1. Энергосиловые параметры прокатки в первом проходе при изменении размеров заготовки

Table 1. Power and energy parameters of rolling in the first pass at different billet dimensions

Размер квадратной заготовки, мм	Сила, кН	Момент, кН·м	Мощность, кВт
41×41	171	3,98	4,87
42×42	199	4,86	5,96
43×43	225	5,70	6,99

Как видно из данных **табл. 1**, увеличение стороны квадрата на 1 мм приводит к росту усилия и мощности, а также к ухудшению условий заполнения. Для обеспечения устойчивости процесса и снижения дефектообразования требуется строгая стабилизация размеров исходной заготовки и контроль износа бойков/валков, влияющих на действительные проходные размеры калибров.

Предварительный анализ влияния ромбовидности заготовки

Ромбовидность (разность диагоналей) квадратной заготовки является одним из наиболее опасных факторов для сортовой прокатки, поскольку она изменяет геометрию контакта в калибре, смещает нейтральную линию и может приводить к асимметрии деформации, скручиванию раската и локальному износу инструмента. Для практики сортовой прокатки характерны ограничения ромбовидности порядка нескольких процентов от стороны квадрата [8, 9]. Рассмотрены два граничных случая подачи ромбовидной заготовки в один и тот же первый ромбический калибр: первый – совпадение диагоналей заготовки и калибра (**рис. 1**); второй – несовпадение диагоналей (**рис. 2**). В обоих случаях выполняется условие, что входящее сечение раската выше и уже самого калибра.

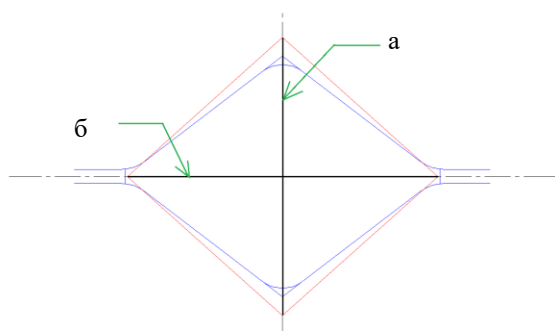


Рис. 1. Совпадение малой (а) и большой (б) диагоналей заготовки и калибра
Fig. 1. Alignment of the minor (a) and major (б) diagonals of the billet and the roll pass

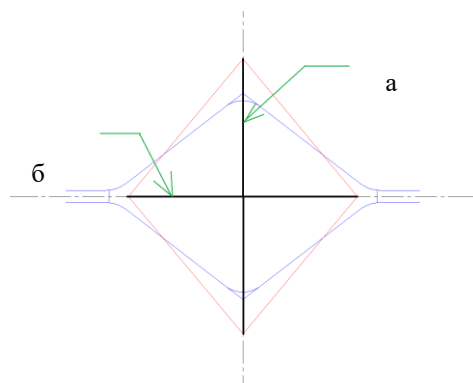


Рис. 2. Несовпадение малой (б) и большой (а) диагоналей заготовки и калибра
Fig. 2. Misalignment of the minor (б) and major (а) diagonals of the billet and the roll pass

При первом способе с ростом ромбовидности калибр и заготовка стремятся к самоподобию, увеличивается площадь контакта и улучшаются условия захвата, однако возрастает чувствительность к переполнению. При втором способе уменьшается площадь контакта и усиливается неравномерность деформации, что может приводить к интенсивной локальной выработке калибра и повышению вероятности дефектов.

На основании расчетных оценок и результатов моделирования принято, что ромбовидность порядка 6% от стороны является предельно допустимой с позиций энергосиловых параметров и устойчивости процесса. При этом для обеспечения стабильности необходимо применение удерживающих и направляющих устройств, а также готовность к компенсации возможного скручивания профиля.

Влияние температуры заготовки на энергосиловые показатели и требования к индукционному нагреву

Температурный фактор является ключевым для устойчивости прокатки в непрерывной группе, особенно при малых скоростях начала процесса. При снижении температуры заготовки возрастает сопротивление деформации и, как следствие, увеличиваются усилие, момент и требуемая мощность приводов. Моделирование проводилось с применением программного комплекса DEFORM 3D (лицензия №TES-135/2009-AS) и показало, что снижение температуры от 1150 до 1000°C приводит к росту энергосиловых показателей приблизительно на 50%, а при снижении до 900°C – до 100% (**табл. 2**). Это соответствует общим положениям ОМД и обосновывает требования к проходному индукционному нагревателю: необходимы индукторы адаптированной формы для квадратного сечения (снижение перегрева ребер), пирометрический контроль температуры между секциями, автоматизированное управление мощностью и синхронизация темпа выдачи заготовок с минимальной скоростью начала прокатки [3, 10, 11].

Таблица 2. Энергосиловые параметры первого прохода при изменении температуры нагрева заготовки 42×42 мм
Table 2. Power and energy parameters of the first pass at different heating temperatures of the 42×42 mm billet

Температура нагрева T, °C	Уширение, мм	Сила, кН	Момент, кН·м	Мощность, кВт
900	23,80	317	7,75	9,50
950	23,87	273	6,65	8,15
1000	23,93	228	5,53	6,77
1050	23,91	199	4,86	5,96
1100	23,92	166	4,03	4,93
1150	23,90	146	3,52	4,32

Данные **табл. 2** демонстрируют необходимость минимизации потери тепла перед задачей в первую

клеть. С учетом последовательной подачи заготовок важны технологические теплосберегающие «демпферы» и организационные решения, исключающие длительное ожидание соседних заготовок до нагрева.

Риск недостижения требуемой микроструктуры катанки из стали ШХ15 и требования к охлаждению

Для стали ШХ15 решающим является обеспечение структурного состояния, пригодного для дальнейшего сфероидизирующего отжига и волочения. Неприемлемыми являются выраженная пластинчатая перлитная структура, карбидная сетка и высокая карбидная неоднородность, поскольку они вызывают неравномерный износ и снижение ресурса изготовленных впоследствии подшипников. В технологической схеме производства катанки важна двухстадийность охлаждения: первичное ускоренное охлаждение (как правило, водяное) до заданного уровня температуры в зоне виткообразователя и последующее регулируемое охлаждение в витках на транспортере с принудительной вентиляцией (линия Стелмор). Далее целесообразна выдержка под термоизолирующими крышками для выравнивания температурного поля и стабилизации превращений. Особое значение имеет временной интервал между окончанием деформации и началом интенсивного охлаждения: в этот период протекают процессы рекристаллизации и роста зерна. Следовательно, выбор расположения секций водяного охлаждения и настройка режима вентиляции должны учитывать не только диаграммы аустенитного превращения, но и кинетику разупрочнения после деформации, зависящую от формулы легирования стали [12].

Разработка технологической схемы прокатки и требования к оборудованию

Исходя из первоначальной технологической информации, целесообразна компоновка непрерывного прокатного стана 180 с черновой группой клетей 300–350, промежуточной группой 250 и чистовой 180. Прокатка осуществляется поштучно в одну нитку. После черновой группы предусматривается разделение потоков на направление «катанка» и (опционально) «арматура».

Подготовка и подача заготовки. Заготовка 42×42 мм длиной 6–20 м подается поштучно через стол инспекции. Поверхность должна быть без трещин, раковин и заусенцев. Химический состав ШХ15 – по ГОСТ на подшипниковую сталь. Для повышения устойчивости захвата и снижения влияния ромбовидности рекомендуется организовать направляющие проводки, обеспечивающие целенаправленную ориентацию заготовки при задаче. Нагрев заготовок осуществляется проходным индукционным нагревателем квадратной формы. Температура на выходе должна составлять 1020±(уточняемый допуск) °С.

Для расчета времени нагрева необходима формулировка технического задания, обеспечивающая скорость, скоординированную с прокаткой в первой клетке.

Черновая прокатка. Черновая группа реализует схему «овал – круг» с чередованием горизонтальных и вертикальных клетей или кантованием раската. На выходе предусмотрены ножницы для удаления переднего и заднего концов (150–200 мм), а также аварийная резка при бурении. Рекомендуется унификация калибровки так, чтобы после черновой группы формировался универсальный размер раската (например, круг диаметром 22 мм) для дальнейшей прокатки всего сортамента.

Промежуточная и чистовая прокатка катанки. Предчистовые клетки обеспечивают подготовку раската и стабилизацию натяжений; чистовые клетки формируют конечный диаметр. Система АСУ ТП обеспечивает регулировку частоты приводов клетей, создавая регламентированные минимальные натяжения и регулируя накопление петель между клетями. На выходе предусматриваются водяное охлаждение и линия воздушного охлаждения типа Стелмор, виткообразователь и бунтоукладчик.

Опция «арматура». Для направления «арматура» после чистового калибра предусматривается установка термомеханического упрочнения проходного типа с возможностью быстрой переналадки на диаметр 12–18 мм и позицию «без обработки». Далее – трайб-аппарат, делительные ножницы и холодильник прутков.

Заключение

На основе анализа исходных данных и исследований ключевых технологических рисков сформированы обоснованные требования к технологии прокатки катанки из стали ШХ15 и составу оборудования непрерывного сортового стана. Установлено, что стабильность геометрии исходной заготовки, полученной слиттинг-процессом [13], в том числе ограничение вариативности подачи заготовок с учетом ромбовидности, является критическим условием предотвращения переполнения первого калибра и дефектообразования.

Показано существенное влияние температуры нагрева на энергосиловые параметры прокатки, что требует точного контроля индукционного нагрева и синхронизации темпа нагрева с минимальной скоростью начала прокатки. Предусмотрена необходимость двухстадийного охлаждения катанки на линии типа Стелмор для формирования микроструктуры, обеспечивающей технологичность при последующем метизном переделе.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, модернизации и настройке литейно-прокатных агрегатов и непрерывных сортовых станов для производства высококачественной катанки.

Список источников

1. Оценка напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки при волочении в монолитной волоке на основе моделирования / Д. В. Терентьев, М. Ю. Усанов, Е. С. Шеметова [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22, № 3. С. 170-177.
2. Сидельников С.Б., Константинов И.Л., Ворошилов Д.С. Технология прокатки. 3-е изд., доп. и перераб. М.: ИНФРА-М, 2020. 180 с.
3. Технология термической обработки арматурного и фасонного проката: Теория и металлургическая практика / А.Б. Сычков, Э.В. Парусов, А.Б. Моллер [и др.]. Beau Bassin : Palmarium Academic Publishing, 2017. 264 с.
4. Кинзин Д.И., Моллер А.Б., Рычков С.С. Выбор методики расчета уширения при моделировании прокатки сортовых профилей простой формы // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2012. № 10. С. 32-35.
5. Метод автоматизированного проектирования калибровок валков для прокатки круглых профилей по системе калибров овал-круг / С.А. Снитко, Н.П. Денищенко, А.В. Яковченко [и др.] // Физика и техника высоких давлений. 2021. Т. 31, № 2. С. 101-113.
6. Термическое упрочнение фасонного проката в потоке сортового стана / О.Н. Тулупов, А.В. Наливайко, А.Б. Сычков [и др.] // Сталь. 2019. № 4. С. 64-70.
7. Совершенствование технологии сфероидизирующего отжига бунтового проката из подшипниковой стали / С.А. Савченко, И.А. Ковалева, И.В. Астапенко, А.Б. Сычков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23, № 1. С. 62-72.
8. Захаров Е. А., Моллер А. Б., Тулупов О. Н. Определение диапазона допустимой ромбовидности литой заготовки с целью снижения дефектообразования при прокатке в калибрах // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2006. № 1. С. 125-129.
9. Развитие векторной модели формоизменения металла при сортовой прокатке / А.Н. Луценко, В.А. Монид, О.Н. Тулупов, А.И. Трайно // Труды пятого конгресса прокатчиков, Череповец, 21–24 октября 2003 года. Москва: [Черметинформация], 2004. С. 278-283.
10. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях: монография. Москва: ИНФРА-М, 2020. 273 с.
11. Сычков А.Б., Савченко С.А. Влияние предварительной термической обработки непрерывнолитой заготовки на структурообразование в бунтовом прокате из стали ШХ15 // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2024. № 23. С. 152-162
12. Влияние гомогенизирующего отжига непрерывнолитой заготовки на уровень карбидной сегрегации в бунтовом прокате из подшипниковой стали / С.А. Савченко, И.А. Ковалева, И.В. Астапенко, А.Б. Сычков // Металлург. 2025. № 6. С. 17-21.
13. Совершенствование технологии прокатки периодических профилей слитинг-процессом на стане 370 ОАО «ММК» / С.Ю. Саранча, Г.К. Рожков, С.А. Левандовский [и др.] // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2016. № 22. С. 116-120.

References

1. Terentyev D.V., Usanov M.Yu., Shemetova E.S. et al. Assessment of the stress-strain state of steel-copper wire during drawing in a monolithic die based on modeling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;22(3):170-177. (In Russ.)
2. Sidelnikov S. B., Konstantinov I.L., Voroshilov D.S. *Tekhnologiya prokatki. 3-e izd., dop. i pererab* [Rolling technology. 3rd ed., supplemented and revised]. Moscow: INFRA-M, 2020, 180 p. (In Russ.)
3. Sychkov A.B., Parusov E.V., Moller A.B. et al. *Tekhnologiya termicheskoy obrabotki armaturnogo i fasonnogo prokata: Teoriya i metallurgicheskaya praktika* [Technology of heat treatment of reinforcing and shaped rolled products. Theory and metallurgical practice]. Beau Bassin: Palmarium Academic Publishing, 2017, 264 p. (In Russ.)
4. Kinzin D.I., Moller A.B., Rychkov S.S. Selection of a method for calculating broadening in modeling the rolling of simple-shaped sections. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2012;(10): 32-35. (In Russ.)
5. Snitko S.A., Denishchenko N.P., Yakovchenko A.V. et al. Method of automated design of roll calibrations for rolling round sections using the oval-round calibration system. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy* [High pressure physics and engineering]. 2021;31(2):101-113. (In Russ.)
6. Tulupov O.N., Nalivaiko A.V., Sychkov A.B. et al. Thermal hardening of rolled sections in a rolled section mill flow. *Stal* [Steel]. 2019;(4): 64-70. (In Russ.)
7. Savchenko S.A., Kovaleva I.A., Astapenko I.V., Sychkov A.B. Improving the technology of spheroidizing annealing of rolled coils made of bearing steel. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025;23(1):62-72. (In Russ.)
8. Zakharov E.A., Moller A.B., Tulupov O.N. Determination of the range of permissible diamond shape of a cast blank in order to reduce defect formation during rolling in calibers *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD* [Modeling and development of metal forming processes]. 2006;(1):125-129. (In Russ.)
9. Lutsenko A.N., Monid V.A., Tulupov O.N., Traino A.I. Development of a vector model of metal forming during section rolling *Trudy pyatogo kongressa prokatchikov* [Proceedings of the fifth congress of rolling mills]. Cherepovets, Moscow: Chermetinformatiya, 2004, pp. 278-283. (In Russ.)
10. Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R. *Skorostnye rezhimy induktsionnogo nagreva i termonapryazheniya v izdeliyakh: monografiya* [High-speed modes of induction heating and thermal stress in products: monograph]. Moscow: INFRA-M, 2020, 273 p. (In Russ.)
11. Sychkov A.B., Savchenko S.A. Influence of preliminary heat treatment of continuously cast billets on structure formation in rolled products made of SH15 steel *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialoobrabotki* [Technologies of metallurgy, mechanical engineering and materials processing]. 2024;(23):152-162. (In Russ.)

12. Savchenko S.A., Kovaleva I.A., Astapenko I.V., Sychkov A.B. The influence of homogenizing annealing of continuously cast billets on the level of carbide segregation in rolled products made of bearing steel. *Metallurg* [Metallurgist]. 2025;(6):17-21. (In Russ.)
13. Sarancha S.Yu., Rozhkov G.K., Levandovsky S.A. et al. Improving the technology of rolling periodic sections by the slitting process on mill 370 of PJSC ММК. *Modelirovanie i razvitiye protsessov OMD* [Modeling and development of metal forming processes]. 2016;(22): 116-120. (In Russ.)

Поступила 02.03.2026; принята к публикации 17.04.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 02/03/2026; revised 17/04/2026; published 30/06/2026

Моллер Александр Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры обработки материалов давлением имени М.И. Бояршинова, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: amoller@mail.ru. ORCID: 0000-0001-9090-2080

Тулупов Олег Николаевич – доктор технических наук, проректор по научной и инновационной работе, профессор кафедры обработки материалов давлением имени М.И. Бояршинова, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: o.tulupov@mail.ru.

Левандовский Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры обработки материалов давлением имени М.И. Бояршинова, директор Проектного офиса (НИС-RnD), Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: s.levandovsky@magtu.ru. ORCID: 0000-0002-8650-2241

Михалев Сергей Викторович – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: s.mihalev85@mail.ru

Михалев Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры машин и технологий обработки давлением и машиностроения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mialex@trubprom.com

Савва Аркадий Дмитриевич – магистрант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: savva.arkadiy@mail.ru

Alexander B. Moller – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Materials Pressure Treatment named after M.I. Boyarshinov, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: amoller@mail.ru. ORCID: 0000-0001-9090-2080

Oleg N. Tulupov – DrSc (Eng.), Vice Rector for Reseach and Innovation, Professor of the Department of Materials Pressure Treatment named after M.I. Boyarshinov, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: o.tulupov@mail.ru.

Sergey A. Levandovsky – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Pressure Treatment named after M.I. Boyarshinov, Head of Project Office (RnD), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
s.levandovsky@magtu.ru. ORCID: 0000-0002-8650-2241

Sergey V. Mikhalev – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: s.mihalev85@mail.ru

Alexander V. Mikhalev – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Machines and Technologies of Pressure Treatment and Mechanical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mialex@trubprom.com

Arkadiy D. Savva – Master's Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: savva.arkadiy@mail.ru



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669.017.14

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-82-92

ВЛИЯНИЕ КРИОГЕННОЙ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА CoCrFeNi

Вы Ю.¹, Ю Х.^{1,2}, Песин А.М.², Пустовойтов Д.О.²¹Центральный Южный университет, Чанша, Китай²Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Высокоэнтропийный сплав (ВЭС) CoCrFeNi является материалом с низкой энергией дефекта упаковки, что облегчает образование двойников в процессе пластической деформации при криогенных температурах. Эквивалентный состав и простая однофазная ГЦК-структура делают этот сплав одним из наиболее перспективных для промышленного освоения. Однако в литом состоянии ВЭС CoCrFeNi обладает невысокими пределом текучести (≈ 200 МПа) и пределом прочности (≈ 500 МПа). Обычные методы пластической обработки не могут в полной мере реализовать потенциал упрочнения ВЭС CoCrFeNi, поэтому его механические и эксплуатационные характеристики нуждаются в дальнейшем улучшении. Для решения проблемы повышения механических свойств ВЭС CoCrFeNi может быть применен метод асимметричной криогенной прокатки. Криогенная деформация может способствовать формированию нанодвойников, а скоростная асимметрия – формированию микрополос сдвига с высокой плотностью дислокаций и переходу механизма деформации от скольжения дислокаций к двойникованию. Соответственно, исследование механизмов деформации и упрочнения, реализующихся в ВЭС CoCrFeNi при асимметричной криогенной прокатке, является актуальным. **Цель работы.** Исследование влияния процесса асимметричной криогенной прокатки на микроструктуру и механические свойства высокоэнтропийного сплава CoCrFeNi. **Используемые методы.** Изготовление ВЭС CoCrFeNi выполнялось в лаборатории Центрального южного университета (Чанша, Китай) методом вакуумной левитационной плавки. Микроструктуру и механические свойства ВЭС CoCrFeNi исследовали как в литом состоянии, так и после прокатки по трем различным вариантам: 1) прокатка (симметричная) при комнатной температуре (25 °С); 2) криогенная (симметричная) прокатка (-196 °С); 3) асимметричная криогенная прокатка (-196 °С). Асимметричную криогенную прокатку также осуществляли в лаборатории Центрального южного университета (Чанша, Китай) на четырехвалковом реверсивном стане в рабочих валках одинакового диаметра 80 мм при соотношении скоростей валков $v_1/v_2 = 1,3$. Для создания криогенных условий прокатки использовали жидкий азот. Исходные прямоугольные листовые заготовки размером 3×50×150 мм прокатывали за несколько проходов по четырем вариантам до толщины 2,4, 1,8, 1,2 и 0,6 мм соответственно. Испытания образцов на растяжение проводили с использованием универсальной машины Shimadzu AGS-X 10 кН. Однородность распределения химических элементов определяли методом энергодисперсионной спектроскопии (EDS) (Oxford X-Max20). Анализ методом EBSD проводился с использованием детектора Nordly Max3, подключенного к сканирующему электронному микроскопу с полевой эмиссией JSM-7800F. EBSD-анализ осуществлялся с помощью программного обеспечения Aztec Crystal. Микроструктуру образцов, прокатанных с общей деформацией 80%, дополнительно исследовали с помощью просвечивающего электронного микроскопа Philips CM200 (FEG-TEM). **Результат.** ВЭС CoCrFeNi после асимметричной криогенной прокатки с суммарным обжатием 80% достигал наибольшей прочности (1,45 ГПа) среди трех вариантов прокатки. Установлено, что высокая прочность ВЭС была обусловлена нанодвойниками, формирование которых было вызвано накопленными внутри дефектами упаковки при асимметричной криогенной прокатке. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации режимов пластической деформации высокоэнтропийного сплава CoCrFeNi и улучшения его механических характеристик, требуемых для применения в экстремальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав CoCrFeNi, криогенная асимметричная прокатка, скоростная асимметрия, деформация, микроструктура, механические свойства

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 25-79-31018, <https://rscf.ru/project/25-79-31018/>.

© Вы Ю., Ю Х., Песин А.М., Пустовойтов Д.О., 2026

Для цитирования

Влияние криогенной асимметричной прокатки на микроструктуру и механические свойства высокоэнтропийного сплава CoCrFeNi / Вы Ю., Ю Х., Песин А.М., Пустовойтов Д.О. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 82-92. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-82-92>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFLUENCE OF ASYMMETRIC CRYOGENIC ROLLING ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A CoCrFeNi HIGH-ENTROPY ALLOY

Wu Y.¹, Yu H.^{1,2}, Pesin A.M.², Pustovoytov D.O.²

¹Central South University, Changsha, China

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The CoCrFeNi high-entropy alloy (HEA) is a low-stacking-fault-energy material, which facilitates twin formation during plastic deformation at cryogenic temperatures. Its equiatomic composition and simple single-phase face-centered cubic (FCC) structure make this alloy one of the most promising candidates for industrial applications. However, in the as-cast condition, the CoCrFeNi HEA exhibits relatively low yield strength (≈ 200 MPa) and ultimate tensile strength (≈ 500 MPa). Conventional plastic deformation techniques cannot fully exploit the strengthening potential of the CoCrFeNi HEA; therefore, its mechanical and service properties require further improvement. One promising approach to enhancing the mechanical properties of the CoCrFeNi HEA is asymmetric cryogenic rolling. Cryogenic deformation can promote the formation of nanotwins, while velocity asymmetry between the rolls can facilitate the formation of shear bands with a high dislocation density and induce a transition in the deformation mechanism from dislocation slip to deformation twinning. Therefore, investigating the deformation and strengthening mechanisms operating in the CoCrFeNi HEA during asymmetric cryogenic rolling is of significant scientific and practical interest. **Objectives.** The research is aimed at investigation of the effect of asymmetric cryogenic rolling on the microstructure and mechanical properties of the CoCrFeNi high-entropy alloy. **Methods Applied.** The CoCrFeNi HEA was produced at the Central South University (Changsha, China) using vacuum levitation melting. The microstructure and mechanical properties of the alloy were studied both in the as-cast state and after three different rolling conditions: (1) symmetric rolling at room temperature (25°C); (2) symmetric cryogenic rolling (-196°C); and (3) asymmetric cryogenic rolling (-196°C). The asymmetric cryogenic rolling experiments were also carried out at Central South University (Changsha, China) using a four-high reversing mill with work rolls of equal diameter (80 mm) and a specified roll speed ratio $v_1/v_2 = 1,3$. Liquid nitrogen was used to create cryogenic rolling conditions. Initial sheet specimens with dimensions of $3 \times 50 \times 150$ mm were rolled in several passes to final thicknesses of 2.4, 1.8, 1.2, and 0.6 mm. Tensile tests were performed using a Shimadzu AGS-X 10 kN universal testing machine. The homogeneity of elemental distribution was evaluated by energy-dispersive spectroscopy (EDS) using an Oxford X-Max20 unit. Electron backscatter diffraction (EBSD) analysis was carried out using a Nordlys Max3 detector attached to a JSM-7800F field-emission scanning electron microscope. EBSD data were processed using Aztec Crystal software. The microstructure of samples subjected to a total reduction of 80% was additionally examined using a Philips CM200 field-emission gun transmission electron microscope (FEG-TEM). **Results.** The CoCrFeNi HEA subjected to asymmetric cryogenic rolling with a total thickness reduction of 80% achieved the highest strength among the three rolling conditions, reaching 1.45 GPa. It was established that this superior strength resulted from the formation of nanotwins generated by the accumulation of stacking faults during asymmetric cryogenic rolling. **Practical Relevance.** The results of this study can be used to optimize plastic deformation regimes for the CoCrFeNi high-entropy alloy and improve its mechanical performance for applications under extreme service conditions.

Keywords: CoCrFeNi high-entropy alloy, asymmetric cryogenic rolling, roll speed asymmetry, deformation, microstructure, mechanical properties.

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 25-79-31018, <https://rscf.ru/project/25-79-31018/>.

For citation

Wu Y., Yu H., Pesin A.M., Pustovoytov D.O. Influence of Asymmetric Cryogenic Rolling on the Microstructure and Mechanical Properties of a CoCrFeNi High-Entropy Alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 82-92. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-82-92>

Введение

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) относятся к перспективным высокопрочным и высоковязким материалам, которые демонстрируют превосходные механические свойства в экстремальных условиях эксплуатации [1-7]. При криогенных температурах

ВЭС обладают повышенной прочностью при одновременно высоких пластических свойствах, а также характеризуются высокой вязкостью разрушения. ВЭС не только сохраняют свою пластичность при очень низких температурах, но часто демонстрируют её улучшение. Это явление связано с активацией и взаимодействием множественных механизмов де-

формации, таких как скольжение дислокаций, дефекты упаковки, двойникование и фазовое превращение. При высоких температурах ВЭС сохраняют хорошую термостабильность. Все это определяет огромный потенциал применения ВЭС в различных отраслях промышленности.

В связи с неизбежными литейными дефектами и грубой исходной структурой ВЭС в литом состоянии для получения более совершенных высококачественных изделий требуются специальные методы пластической обработки ВЭС. Асимметричная прокатка и криогенная прокатка относятся к специальным методам, реализующим большие пластические деформации [8-12]. Эти методы в сравнении с традиционной прокаткой обладают наилучшим эффектом упрочнения различных металлов и сплавов. По сравнению с другими известными методами больших пластических деформаций (кручение под высоким давлением, равноканальное угловое прессование и т.д.) асимметричная прокатка и криогенная прокатка позволяют обрабатывать листы относительно большого размера и наиболее подходят для промышленного применения в крупномасштабном производстве наноструктурированных материалов [9]. Криогенная прокатка может эффективно подавлять динамический возврат [13] и повышать эффективность накопления дислокаций. Более высокая плотность дислокаций обеспечивает больше центров зародышеобразования во время отжига, что приводит к формированию более мелких зерен. Асимметричная прокатка преобразует часть или всю силу трения, которая при традиционной (симметричной) прокатке препятствует пластической деформации в силу сдвига, которая, наоборот, облегчает пластическую деформацию металла. В сравнении с деформацией сжатия сдвиговая деформация приводит к формированию более мелких зерен [8]. Процесс асимметричной криогенной прокатки сочетает в себе преимущества как криогенной прокатки, так и асимметричной прокатки [9].

Высокоэнтропийный сплав CoCrFeNi является материалом с низкой энергией дефекта упаковки, что облегчает образование двойников в процессе пластической деформации при криогенных температурах. Эквиазимный состав и простая однофазная ГЦК-структура делают этот сплав одним из наиболее перспективных для промышленного освоения [12]. ВЭС CoCrFeNi обладает превосходной прочностью и вязкостью и показывает чрезвычайно высокий потенциал улучшения механических свойств в низкотемпературных средах, что делает его пригодным для криогенной формовки, которая может дополнительно улучшить его характеристики [14].

В литом состоянии ВЭС CoCrFeNi обладает высокими пределом текучести (≈ 200 МПа) и пределом прочности (≈ 500 МПа). Обычные методы пластической обработки, такие как холодная (симметричная) прокатка, аккумулирующая прокатка, равноканальное угловое прессование, кручение под высоким давлением, а также другие процессы не могут в полной мере реализовать потенциал упрочнения ВЭС

CoCrFeNi , поэтому его механические и эксплуатационные характеристики все еще нуждаются в дальнейшем улучшении [15-18].

Для решения проблемы повышения механических свойств ВЭС CoCrFeNi может быть применен метод асимметричной криогенной прокатки. Криогенная деформация может способствовать формированию нанодвойников, а скоростная асимметрия – формированию микрополос сдвига с высокой плотностью дислокаций и переходу механизма деформации от скольжения дислокаций к двойникованию [15-18].

Однако в настоящее время исследования процессов асимметричной криогенной прокатки относительно ограничены, а существующие работы в основном сосредоточены на традиционных сплавах алюминия, меди, титана и др. [13, 19, 20]. Кроме того, механизмы деформации и упрочнения, реализующиеся в ВЭС CoCrFeNi при асимметричной криогенной прокатке, требуют дальнейшего изучения.

Целью данной работы являлось исследование влияния процесса асимметричной криогенной прокатки на микроструктуру и механические свойства высокоэнтропийного сплава CoCrFeNi . Для сравнения исследовали микроструктуру и механические свойства высокоэнтропийного сплава CoCrFeNi в литом состоянии, а также после симметричной прокатки при комнатной и криогенной температуре. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации режимов пластической деформации высокоэнтропийного сплава CoCrFeNi и улучшения его механических и эксплуатационных характеристик.

Материалы и методы исследования

В качестве материала для исследований использовали эквиазимный высокоэнтропийный сплав (ВЭС) CoCrFeNi , имеющий одну ГЦК-фазу. Исходная заготовка в виде литого слитка была получена методом вакуумной левитационной плавки. Для изготовления ВЭС использовали металлы с чистотой более 99,9%. В процессе вакуумной левитационной плавки, основанной на использовании индуцированного магнитного поля для бесконтактного с тиглем сплавления металлов, обеспечивалась высокая точность поддержания заданной температуры, а также высокая чистота ВЭС. Электромагнитное перемешивание и многократное рафинирование в течение всего процесса плавки дополнительно обеспечивало внутреннюю химическую однородность ВЭС. Из полученного слитка методом электроэрозионной резки были изготовлены прямоугольные листовые заготовки размером $3 \times 50 \times 150$ мм, все поверхности которых были отполированы на шлифовальном станке.

Прокатку осуществляли на четырехвалковом реверсивном стане в лаборатории Центрального южного университета (Чанша, Китай). Характеристики прокатного стана: диаметр опорного вала – 260 мм, диаметр рабочего вала – 80 мм, ширина рабочего вала – 300 мм, максимальное усилие прокатки – 100 тс, скорость прокатки – 1 м/мин. Рассматривали три варианта прокатки: 1) прокатка (симметричная) при

комнатной температуре (25°C); 2) криогенная (симметричная) прокатка (-196°C); 3) асимметричная криогенная прокатка (-196°C). Условия проведения экспериментов представлены в **табл. 1**. Создание режимов симметричной и асимметричной прокатки обеспечивалось путём регулирования соотношения скоростей верхнего и нижнего рабочих валков. При асимметричной криогенной прокатке максимальная скорость составляла 1,3 м/мин. Во всех вариантах прокатку осуществляли без применения смазки в условиях сухого контактного трения. Для криогенной прокатки и асимметричной криогенной прокатки в качестве охлаждающей среды использовался жидкий азот. Перед первым проходом листовую заготовку полностью погружали в жидкий азот и выдерживали не менее 30 мин для стабилизации температуры. Перед каждым проходом образец повторно выдерживали в криогенной камере не менее 10 мин для обеспечения сохранения криогенной температуры при прокатке. Во всех вариантах осуществляли многопроходную прокатку с обжатием за один проход 5%. После различных вариантов прокатки были получены листы толщиной 2,4, 1,8, 1,2 и 0,6 мм, что соответствовало суммарным обжатиям 20, 40, 60 и 80 %.

Листы, симметрично прокатанные при комнатной температуре с различными суммарными обжатиями, обозначены как RTR20, RTR40, RTR60 и RTR80 со-

ответственно. Листы, симметрично прокатанные при криогенной температуре с различными суммарными обжатиями, обозначены как CR20, CR40, CR60 и CR80 соответственно. Листы, асимметрично прокатанные при криогенной температуре с различными суммарными обжатиями, обозначены как ACR20, ACR40, ACR60 и ACR80 соответственно.

После различных вариантов симметричной и асимметричной криогенной прокатки из полученных листов методом электроэрозионной резки были изготовлены образцы для проведения испытаний на растяжение. Образцы вырезались вдоль направления прокатки. Длина рабочей части составляла 13 мм, а ширина – 2,5 мм, как показано на **рис. 1** (RD – направление прокатки, TD – поперечное направление).

Испытания проводили с использованием универсальной машины Shimadzu AGS-X 10 кН. Скорость деформации растяжения при комнатной температуре составляла $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Для обеспечения высокой точности измерений использовался видеоэкстензометр Shimadzu TRView X с абсолютной погрешностью $\pm 1,5 \text{ мкм}$. Кромки образцов полировались наждачной бумагой SiC 800 и 1500. Ширину и толщину каждого образца перед испытанием на растяжение измеряли с помощью цифрового микрометра с погрешностью $\pm 1,0 \text{ мкм}$. Каждое испытание повторяли три раза.

Таблица 1. Условия проведения экспериментов

Table 1. Experimental conditions

Наименование процесса	Температура прокатки, °C	Скорость верхнего валка v_1 , м/мин	Скорость нижнего валка v_2 , м/мин	Соотношение скоростей валков $\frac{v_1}{v_2}$	Суммарное обжатие по толщине ε , %
Прокатка при комнатной температуре (RTR)	25	1,0	1,0	1,0	20
					40
					60
					80
Криогенная прокатка (CR)	-196	1,0	1,0	1,0	20
					40
					60
					80
Асимметричная криогенная прокатка (ACR)	-196	1,0	1,3	1,3	20
					40
					60
					80

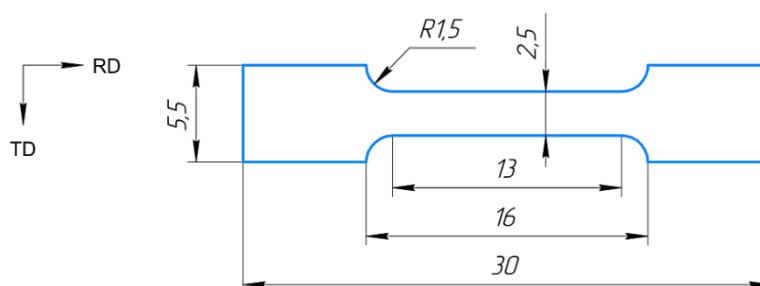


Рис. 1. Размеры образца для испытаний на растяжение
Fig. 1. Dimensions of the tensile test specimen

Однородность распределения химических элементов в высокоэнтропийном сплаве CoCrFeNi определяли методом энергодисперсионной спектроскопии (EDS) (Oxford X-Max20). Образцы для EDS-анализа электрополировали в растворе хлорной кислоты и безводного этанола в соотношении 1:9 при напряжении источника питания 30 В, плотности тока 0,06 А и времени полировки 6 с. Анализ методом EBSD проводился с использованием детектора Nordly Max3, подключенного к сканирующему электронному микроскопу с полевой эмиссией JSM-7800F, с шагом 0,2 мкм. Для подготовки образцов использовался ионный фрезерный станок IM4000. EBSD-анализ осуществлялся с помощью программного обеспечения Aztec Crystal. Микроструктуру образцов, прокатанных с общей деформацией 80%, дополнительно исследовали с помощью просвечивающего электронного микроскопа Philips CM200 (FEG-TEM). Для подготовки образцов использовали установку Thermo Fisher Helios G4 PFIB, а также полировальную машину Fischione 1040 NanoMill.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты EDS-анализа показали, что химические элементы Co, Cr, Fe, Ni были равномерно распределены в исходном слитке, без выделений или сегрегации (рис. 2). Исходная микроструктура представлена на рис. 3, а. Доля малоугловых границ зерен (с углами разориентировки менее 10°) очень мала (2,3%). В исходном состоянии микроструктура состояла преимущественно из зерен с большеугловыми границами (рис. 3, б).

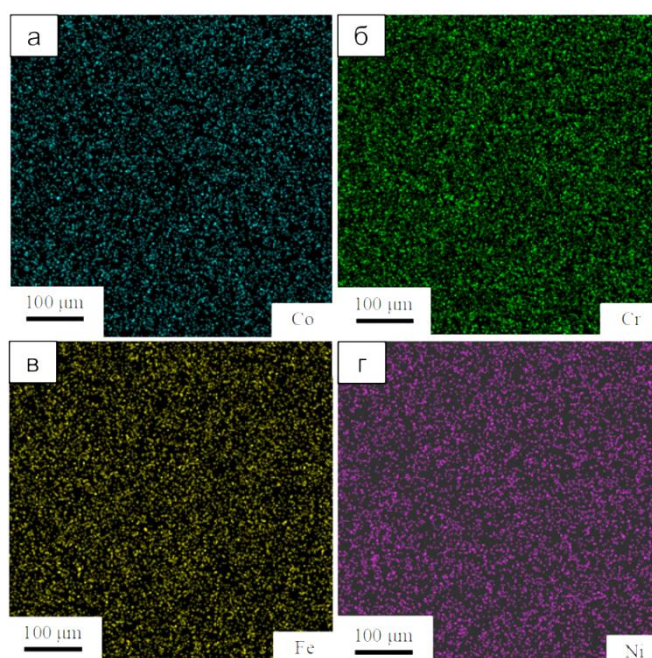


Рис. 2. Распределение химических элементов в литом высокоэнтропийном сплаве CoCrFeNi по результатам EDS-анализа: а – Co; б – Cr; в – Fe; г – Ni

Fig. 2. Distribution of chemical elements in the as-cast CoCrFeNi high-entropy alloy according to EDS analysis results: a is Co; б is Cr; в is Fe; г is Ni

На рис. 4, а-в показаны результаты EBSD-анализа образцов ВЭС после прокатки при комнатной температуре, а также после криогенной прокатки и асимметричной криогенной прокатки с суммарным обжатием 20%. После прокатки при комнатной температуре зерна приобретали слегка вытянутую (эллиптическую) форму вдоль направления прокатки. В зернах наблюдалось мало дислокаций и очень небольшое количество двойников. Это связано с тем, что критическое напряжение сдвига, требуемое для зарождения деформационных двойников, было выше, и для участия большего числа двойников в деформации требовались более высокие напряжения сдвига. В свою очередь, зерна в образцах ВЭС, прокатанных при криогенной температуре (симметрично и асимметрично), претерпели значительные изменения. Зерна приобрели вытянутую полосовидную форму и большое количество дефектов. Наблюдалось большее количество параллельных линий скольжения и двойников.

Среди двух вариантов криогенной прокатки симметрично прокатанный ВЭС демонстрировал более вытянутые полосовидные зерна, в то время как в асимметрично прокатанном ВЭС наблюдались эллиптические зерна, как после прокатки при комнатной температуре, но зерна при этом были меньше по размеру и более однородные. Это связано с особенностями процесса асимметричной прокатки. Соотношение скоростей рабочих валков $\frac{v_1}{v_2} = 1,3$ вызывало дополни-

тельную сдвиговую деформацию в очаге, что способствовало измельчению зерен и делало распределение напряжений сдвига по толщине более равномерным.

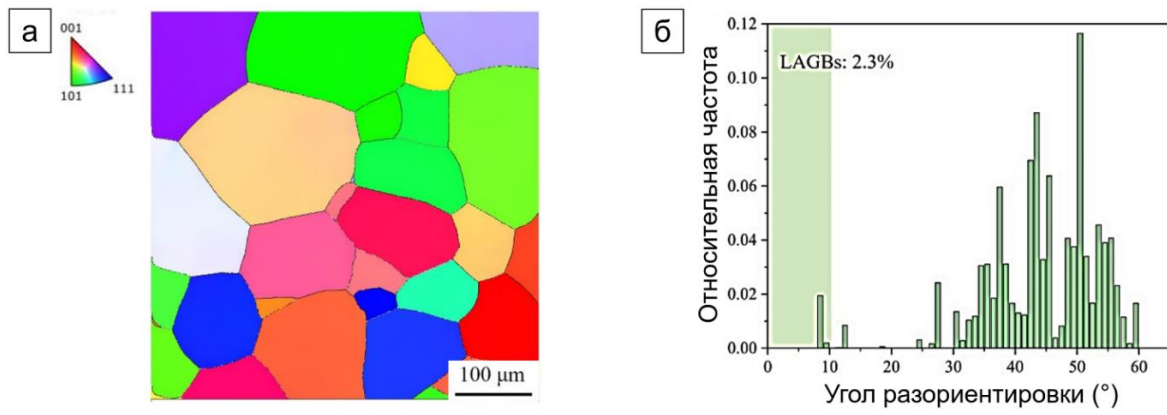


Рис. 3. Исходная микроструктура (а) и частотное распределение углов разориентировки (б)
 Fig. 3. Initial microstructure (a) and misorientation angle distribution (б)

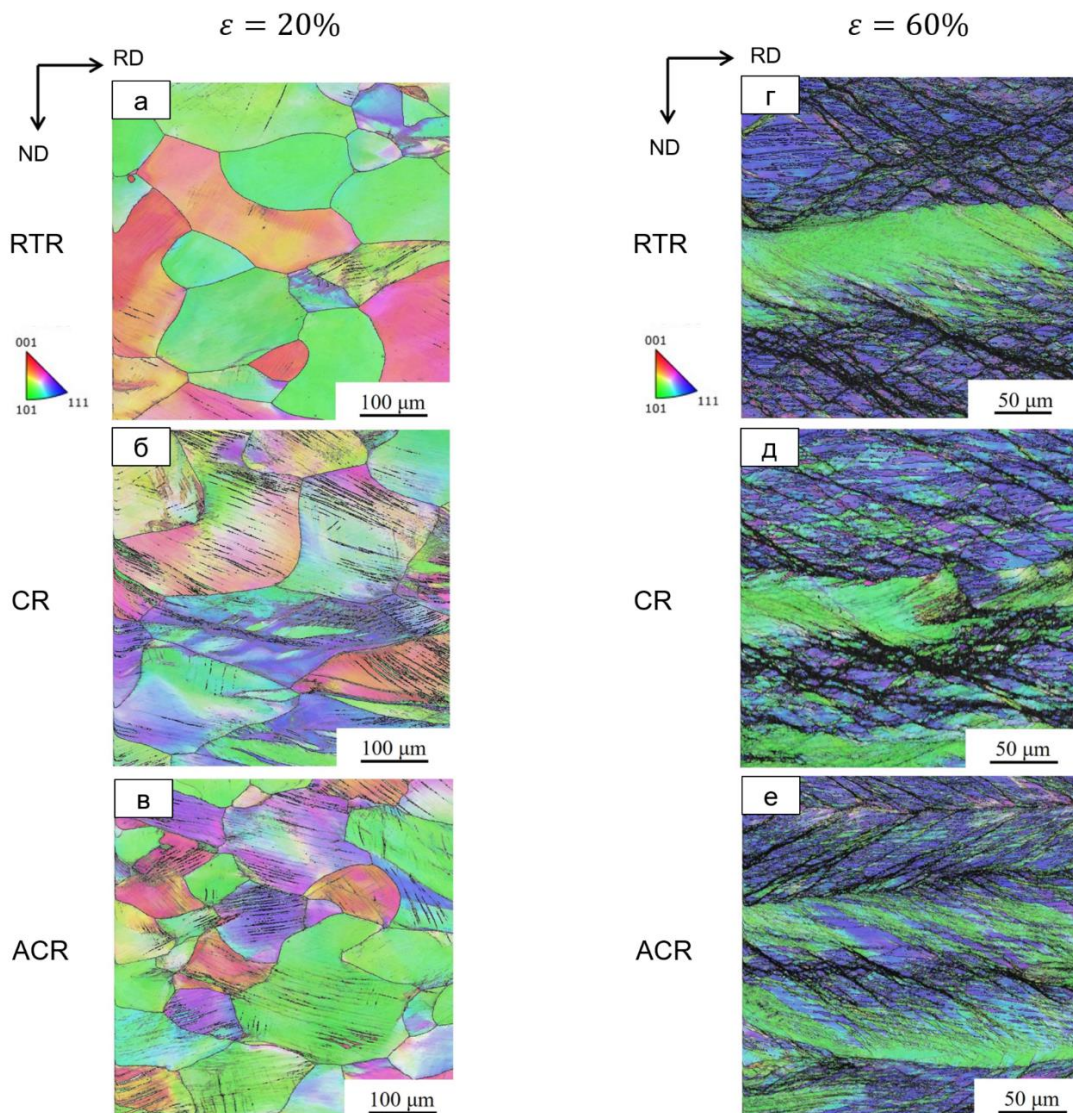


Рис. 4. EBSD-изображение микроструктуры после прокатки при комнатной температуре (RTR), криогенной прокатки (CR), асимметричной криогенной прокатки (ACR):
 а-в – суммарное обжатие 20 %; г-е – суммарное обжатие 60 %
 Fig. 4. EBSD microstructure images after room-temperature rolling (RTR), cryogenic rolling (CR), and asymmetric cryogenic rolling (ACR): а-в are total reduction of 20%; г-е are total reduction of 60%

Металлографический анализ показал, что дислокации концентрировались вблизи границ зерен, линий скольжения и двойников. По сравнению с ВЭС, прокатанным при комнатной температуре, степень концентрации дислокаций в криогенно прокатанных образцах была значительно выше. Причем как при симметричной, так и при асимметричной прокатке. Это связано с тем, что криогенная температура подавляла динамический возврат, вызывая более быстрое накопление дислокаций на ранней стадии деформации.

На **рис. 4, г-е** показаны результаты EBSD-анализа образцов ВЭС после прокатки при комнатной температуре, а также после криогенной прокатки и асимметричной криогенной прокатки с суммарным обжатием 60%. После прокатки при комнатной температуре зерна приобрели сильно деформированное состояние. При величине суммарного обжатия 60 % в ВЭС было активировано больше двойников для участия в деформации, и их ориентация была ближе к направлению прокатки. Появилось много полос сдвига и линий скольжения, похожих на новые границы зерен. Полосы сдвига обычно располагались под углом 30° к направлению прокатки. Образование полос сдвига объяснялось сильной деформацией и разрушением двойников и линий скольжения под действием высоких напряжений при прокатке. Было обнаружено, что с увеличением суммарного обжатия плотность дислокаций увеличивалась. При этом более высокая плотность дислокаций наблюдалась вблизи полос сдвига, линий скольжения и двойников, что указывало на большую локальную деформацию в этих областях.

После криогенной прокатки с суммарным обжатием 60% в структуре образцов наблюдались более выраженные и более крупные полосы сдвига в сравнении со структурой образцов после прокатки при комнатной температуре (см. **рис. 4**). Двойники и линии скольжения наблюдались преимущественно вблизи полос сдвига. Это объяснялось тем, что большее количество двойников при криогенной прокатке подавляло равномерное скольжение дислокаций, что приводило к более выраженным полосам сдвига, адаптирующимся к пластической деформации во время прокатки.

В структуре образцов, полученных методом асимметричной криогенной прокатки с суммарным обжатием 60%, наблюдались более плотные полосы сдвига (см. **рис. 4**). По сравнению с образцами, полученными методом криогенной прокатки, области микрополос сдвига высокой плотности были распределены более равномерно, расстояние между полосами сдвига было уменьшено, а углы некоторых полос сдвига были меньше, чем при симметричной прокатке, что связано с увеличением отношения деформации сдвига к деформации по толщине. При асимметричной криогенной прокатке сдвиговая деформация проникала в центральные слои листовой заготовки, что приводило к более равномерному распределению полос сдвига высокой плотности. Более того, в высокоэнтропийном сплаве CoCrFeNi , прокатанном при комнатной температуре с суммарным обжатием 60%, большинство полос сдвига было окру-

жено дислокациями высокой плотности, чего не наблюдалось в листах, полученных методами криогенной или асимметричной криогенной прокатки. Это объяснялось особенностями активации механизмов двойникования и дислокационного скольжения при большой деформации.

На **рис. 5** представлены ПЭМ-изображения микроstructures после симметричной прокатки при комнатной и криогенной температуре, а также после асимметричной криогенной прокатки с суммарным обжатием 80%. Отметим, что из-за большой деформации распределение дислокаций в ВЭС становится сильно неоднородным (**рис. 5, а**). Неравномерно распределенные дислокации подразделяют микроstructure ВЭС на следующие области: дислокационные ячейки (dislocation cells), дислокационные клубки (dislocation tangled zones), двойники (twin), дислокационные стенки высокой плотности (high-density dislocation walls). Кроме того, как показано на **рис. 5**, в образцах также наблюдались дефекты упаковки (SFs). Дислокационные стенки высокой плотности с размытыми границами, параллельными направлению прокатки, были образованы путем реорганизации планарных дислокаций. Отметим, что в сплавах с ГЦК-решеткой дислокационные стенки высокой плотности являются линиями скольжения, хотя дислокационные стенки высокой плотности и двойники имеют схожую полосчатую морфологию, однако при исследовании методом просвечивающей электронной микроскопии границы двойников более четкие, чем границы дислокационных стенок.

После криогенной прокатки нанокристаллы характеризовались сильно вытянутой морфологией с областями дислокационных стенок высокой плотности, а также дислокационными ячейками (**рис. 5, б, в**). Большинство границ зерен были нечеткие и размытые, что соответствовало типичным структурам металла, подвергнутого интенсивной сдвиговой деформации. Кроме того, результаты ПЭМ-анализа показали, что после криогенной прокатки, а также асимметричной криогенной прокатки в образцах наблюдалось большее количество двойников и дефектов упаковки, что обеспечивало лучший эффект упрочнения. Следует отметить, что в образцах после асимметричной криогенной прокатки с суммарным обжатием 80% дефекты упаковки, агрегированные внутри двойников, дополнительно их измельчали, образуя ромбовидные структуры. В результате размер двойников уменьшался как по ширине, так и по длине, что дополнительно усиливало их упрочняющий эффект.

На **рис. 6** представлены результаты испытания образцов на растяжение после прокатки при комнатной температуре (RTR), криогенной прокатки (CR) и асимметричной криогенной прокатки (ACR) с суммарными обжатиями 20, 40, 60 и 80%. Установлено, что предел текучести и предел прочности у листов после криогенной прокатки и асимметричной криогенной прокатки значительно выше, чем у листов, прокатанных при комнатной температуре.

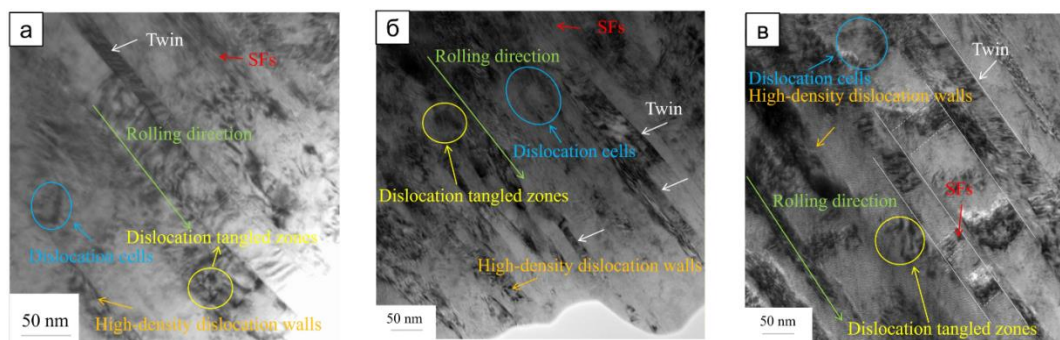


Рис. 5. ПЭМ-изображение микроструктуры после прокатки при комнатной температуре (а), криогенной прокатки (б), асимметричной криогенной прокатки (в) с суммарным обжатием 80%
 Fig. 5. TEM image of the microstructure after room-temperature rolling (a), cryogenic rolling (б), and asymmetric rolling (в) with a total reduction of 80%

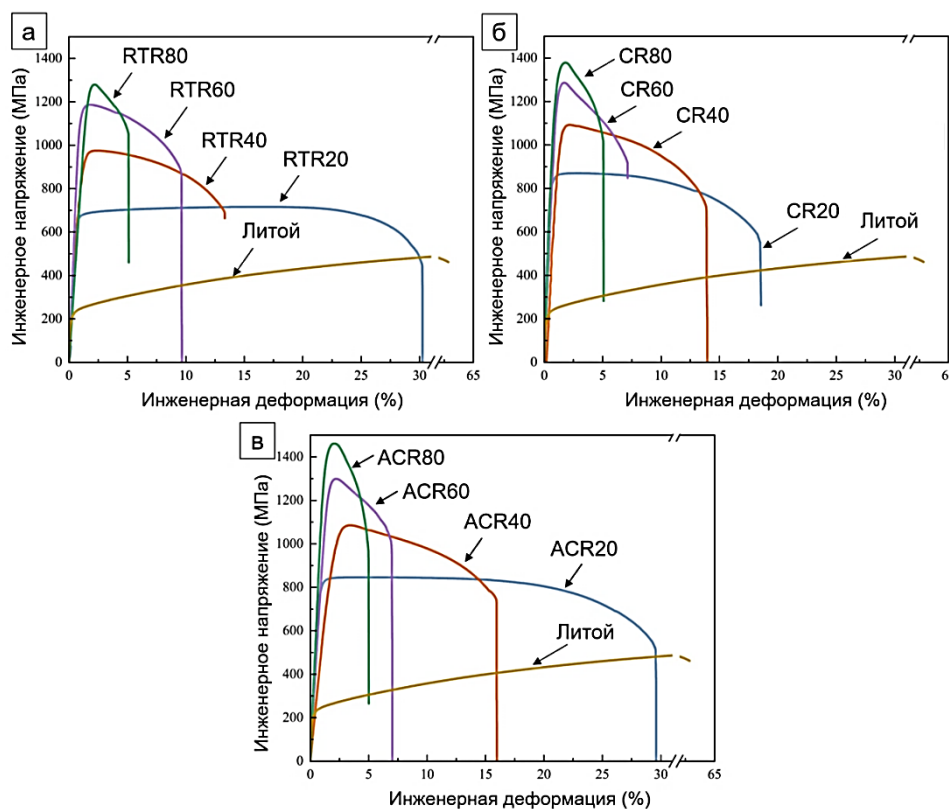


Рис. 6. Результаты испытания образцов на растяжение после прокатки при комнатной температуре (RTR) (а), криогенной прокатки (CR) (б) и асимметричной криогенной прокатки (ACR) (в)
 Fig. 6. Tensile test results for samples after room-temperature rolling (RTR) (а), cryogenic rolling (CR) (б), and asymmetric cryogenic rolling (ACR) (в)

Листы, полученные методом асимметричной криогенной прокатки с суммарным обжатием 20%, демонстрировали более высокую прочность и минимальное снижение пластичности по сравнению с листами, полученными прокаткой при комнатной температуре. Это свидетельствовало о превосходном синергетическом эффекте, обеспечивающем повышенные прочности ВЭС при сохранении его пластичности. После асимметричной криогенной прокатки с суммарным обжатием 40% ВЭС также демонстриро-

вал значительно более высокую прочность, чем ВЭС, прокатанный при комнатной температуре, сохраняя при этом хорошую пластичность. При величине суммарного обжатия 60% механические свойства асимметрично прокатанного ВЭС постепенно выравнивались с механическими свойствами симметрично прокатанного ВЭС при криогенной температуре, но внутренняя микроструктура существенно отличалась, что указывало на различие механизмов их вклада в прочность. При дальнейшем увеличении суммарного

обжатия до 80% асимметрично прокатанный ВЭС демонстрировал максимальное среди трех вариантов прокатки повышение предела прочности до 1,45 ГПа. Предел текучести ВЭС в исходном литом состоянии составлял всего 210 МПа. Однако после асимметричной криогенной прокатки с суммарным обжатием 80% предел текучести увеличился до 1,41 ГПа. При этом он сохранил такое же относительное удлинение, как и ВЭС, симметрично прокатанный при комнатной или криогенной температуре с суммарным обжатием 80%. Это свидетельствовало о том, что асимметричная криогенная прокатка обладает синергетическим эффектом, обеспечивающим повышение прочности ВЭС при сохранении его пластичности.

Заключение

Выполнено исследование микроструктуры и механических свойств высокоэнтропийного сплава CoCrFeNi, обработанного методами симметричной прокатки при комнатной и криогенной температуре, а также методом асимметричной криогенной прокатки с суммарными обжатиями от 20 до 80%.

1. При небольших суммарных обжатиях (20%) криогенная прокатка, а также асимметричная криогенная прокатка оказывали более сильное влияние на повышение прочности ВЭС в сравнении с симметричной прокаткой при комнатной температуре. При небольшой деформации основная роль криогенной температуры заключалась в ускорении накопления дислокаций, что позволяло достичь критического напряжения сдвига, необходимого для зарождения двойников при меньшей деформации. При этом влияние криогенной температуры заключалось не только в дополнительном измельчении зерен и повышении эффективности накопления дислокаций, но и в изменении механизма деформации со скольжения дислокаций, как основного механизма деформации при прокатке при комнатной температуре, на двойникование, которое обычно происходит при большой деформации. Прочность асимметрично прокатанных при криогенной температуре образцов ВЭС была на ≈18% выше, чем прочность образцов, прокатанных при комнатной температуре при сохранении высокой пластичности в обоих случаях. То есть асимметричная криогенная прокатка оказывала лучший синергетический эффект в упрочнение ВЭС при сохранении его пластичности в сравнении с симметричной криогенной прокаткой.

2. По сравнению с прокатанными при комнатной температуре, криогенно прокатанные ВЭС имели более тонкую микроструктуру, в которой присутствовало больше линий скольжения и двойников, активируемых для участия в деформации даже при небольших обжатиях. При этом асимметрично прокатанные при криогенной температуре образцы ВЭС демонстрировали наилучшую однородность микроструктуры. Кроме того, скоростная асимметрия инициировала создание более мелких и равномерно распределенных

микрополос сдвига, способствуя дополнительному измельчению зерен. При асимметричной криогенной прокатке сдвиговая деформация проникала в центральные слои обрабатываемой листовой заготовки, способствуя более равномерному распределению напряжений по толщине.

3. При большой деформации при криогенной температуре рост дислокаций постепенно насыщался, скорость роста снижалась, и двойники полностью активировались, тем самым принимая на себя большую часть деформации, и уменьшая вклад дислокационного скольжения. При асимметричной криогенной прокатке ВЭС дополнительная сдвиговая деформация, вносимая скоростной асимметрией, приводила к формированию более тонких полос сдвига, а также формированию двойников меньшего размера.

4. Высокоэнтропийный сплав CoCrFeNi после асимметричной криогенной прокатки с суммарным обжатием 80 % достигал наибольшей прочности (1,45 ГПа) среди трех вариантов прокатки. При этом ВЭС имел такое же относительное удлинение, как и после симметричной прокатки при комнатной или криогенной температуре с суммарным обжатием 80 %. Дефекты упаковки, агрегированные внутри двойников, дополнительно их измельчали, образуя ромбовидные структуры. В результате размер двойников уменьшался как по ширине, так и по длине, что дополнительно усиливало их упрочняющий эффект. Таким образом, высокая прочность ВЭС была обусловлена нанодвойниками, формирование которых было вызвано накопленными внутри дефектами упаковки при асимметричной криогенной прокатке.

Список источников

1. High entropy alloys: A review of preparation techniques, properties and industry applications / Yang Y.-F., Hu F., Xia T. [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2025, vol. 1010, 177691. doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177691.
2. Ремпель А.А., Гельчинский Б.Р. Высокоэнтропийные сплавы: получение, свойства, практическое применение // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2020. 63(3-4). С. 248-253. doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-248-253.
3. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys // *Nature Reviews Materials*. 2019, no. 4, pp. 515-534. doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4. 551.
4. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. 2017, 122, 448-511. doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081.
5. Шуберт А.В., Коновалов С.В., Панченко И.А. Исследование термических свойств системы высокоэнтропийных сплавов на основе CoCrFeMnNi методом дифференциального термического анализа // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2025. Т. 23. №1. С. 54-61. doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-54-61.
6. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications / Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D. [et al.] // *Science*. 2014, vol. 345, 6201, pp. 1153-1158. DOI: 10.1126/science.1254581.

7. Temperature-dependent hardening contributions in CrFe-CoNi high-entropy alloy / Naeem M., He H., Harjo S. [et al.] // *Acta Materialia*. 2021, vol. 221, 117371. doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117371.
8. Pustovoytov D., Pesin A., Tandon P. Asymmetric (Hot, Warm, Cold, Cryo) Rolling of Light Alloys: A Review // *Metals*. 2021, 11, 956. doi.org/10.3390/met11060956.
9. Special rolling techniques for improvement of mechanical properties of ultrafine-grained metal sheets: A review / Yu H., Lu C., Tieu A.K. [et al.] // *Advanced Engineering Materials*. 2016, 18(5), pp. 754-769.
10. Моделирование немонотонности течения металла при асимметричной тонколистовой прокатке с рассогласованием скоростей валков / Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Швеева Т.В. [и др.] // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова*. 2017. Т. 15. № 1. С. 56-63. doi 10.18503/1995-2732-2017-15-1-56-63.
11. Jeong H.T., Kim W.J. Effect of roll speed ratio on the texture and microstructural evolution of an FCC high-entropy alloy during differential speed rolling // *Journal of Materials Science & Technology*. 2022, vol. 111, pp. 152-166. doi.org/10.1016/j.jmst.2021.08.038.
12. Deformation mechanism and mechanical properties of a CoCrFeNi high-entropy alloy via room-temperature rolling, cryorolling, and asymmetric cryorolling / Wu Y., Liu S., Luo K. [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2023, 960, 170883.
13. Dasharath S.M., Mula S. Microstructural evolution and mechanical properties of low SFE Cu-Al alloys processed by cryorolling followed by short-annealing // *Materials & Design*. 2016, 99, pp. 552-564. doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.095.
14. Excellent ductility and serration feature of metastable CoCrFeNi high-entropy alloy at extremely low temperatures / Liu J., Guo X., Lin Q. [et al.] // *Science China Materials*. 2019, 62(6), pp. 853-863. doi.org/10.1007/s40843-018-9373-y.
15. Effect of cryo-deformation on structure and properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy / Stepanov N., Tikhonovsky M., Yurchenko N. [et al.] // *Intermetallics*. 2015, 59, pp. 8-17. doi.org/10.1016/j.intermet.2014.12.004.
16. Achieving ultra-high strength in a face-centered-cubic FeCrCoNi high entropy alloy through dense nanotwins bundles structure prepared by cryo-rolling / Zeng L., Zeng L., Gao R. [et al.] // *Intermetallics*. 2022, vol. 148, 107638. doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107638.
17. Deformation mechanism and mechanical properties of a CoCrFeNi high-entropy alloy via room-temperature rolling, cryorolling, and asymmetric cryorolling / Wu Y., Liu S., Luo K. [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2023, 960, 170883. doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170883.
18. Phase reversion-induced heterogeneous structure in a ferrous medium-entropy alloy via cryorolling and annealing / Liu S., Luo K., Gu H. [et al.] // *Scripta Materialia*. 2023, 222, 115004. doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.115004.
19. Amit Joshi, Yogesha K.K., Jayaganthan R. Influence of cryorolling and followed by annealing on high cycle fatigue behavior of ultrafine grained Al 2014 alloy // *Materials Characterization*. 2017, vol. 127, pp. 253-271. doi.org/10.1016/j.matchar.2017.02.003.
20. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Ti Fabricated by Cryorolling and Subsequent Annealing / Yu H., Wang L., Yan M. [et al.] // doi.org/10.1002/adem.201901463.

References

1. Yang Y.-F., Hu F., Xia T., et al. High entropy alloys: A review of preparation techniques, properties and industry applications. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025;1010:177691. doi:10.1016/j.jallcom.2024.177691.
2. Rempel A.A., Gelchinskii B.R. High-entropy alloys: production, properties, and practical applications]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]*. 2020;63(3-4):248-253. (In Russ.) doi:10.17073/0368-0797-2020-3-4-248-253.
3. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials*. 2019;(4):515-534. doi:10.1038/s41578-019-0121-4.
4. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017;122:448-511. doi:10.1016/j.actamat.2016.08.081.
5. Shubert A.V., Konovalov S.V., Panchenko I.A. Investigation of thermal properties of CoCrFeMnNi-based high-entropy alloys by differential thermal analysis. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*. 2025;23(1):54-61. (In Russ.) doi:10.18503/1995-2732-2025-23-1-54-61.
6. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*. 2014;345(6201):1153-1158. doi:10.1126/science.1254581.
7. Naeem M., He H., Harjo S., et al. Temperature-dependent hardening contributions in CrFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2021;221:117371. doi:10.1016/j.actamat.2021.117371.
8. Pustovoytov D., Pesin A., Tandon P. Asymmetric (Hot, Warm, Cold, Cryo) Rolling of Light Alloys: A Review. *Metals*. 2021;11:956. doi:10.3390/met11060956.
9. Yu H., Lu C., Tieu A.K., et al. Special rolling techniques for improvement of mechanical properties of ultrafine-grained metal sheets: A review. *Advanced Engineering Materials*. 2016;18(5):754-769.
10. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Shveeva T.V., et al. Modeling of non-monotonic metal flow during asymmetric sheet rolling with roll speed mismatch. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]*. 2017;15(1):56-63. (In Russ.) doi:10.18503/1995-2732-2017-15-1-56-63.
11. Jeong H.T., Kim W.J. Effect of roll speed ratio on the texture and microstructural evolution of an FCC high-entropy alloy during differential speed rolling. *Journal of Materials Science & Technology*. 2022;111:152-166. doi:10.1016/j.jmst.2021.08.038.
12. Wu Y., Liu S., Luo K., et al. Deformation mechanism and mechanical properties of a CoCrFeNi high-entropy alloy via room-temperature rolling, cryorolling, and asymmetric cryorolling. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023;960:170883.
13. Dasharath S.M., Mula S. Microstructural evolution and mechanical properties of low SFE Cu-Al alloys processed by cryorolling followed by short-annealing. *Ma-*

- terials & Design. 2016;99:552-564. doi:10.1016/j.matdes.2016.03.095.
14. Liu J., Guo X., Lin Q., et al. Excellent ductility and serration feature of metastable CoCrFeNi high-entropy alloy at extremely low temperatures. *Science China Materials*. 2019;62(6):853-863. doi:10.1007/s40843-018-9373-y.
 15. Stepanov N., Tikhonovsky M., Yurchenko N., et al. Effect of cryo-deformation on structure and properties of CoCrFeNiMn high-entropy alloy. *Intermetallics*. 2015;59:8-17. doi:10.1016/j.intermet.2014.12.004.
 16. Zeng L., Zeng L., Gao R., et al. Achieving ultra-high strength in a face-centered-cubic FeCrCoNi high entropy alloy through dense nanotwins bundles structure prepared by cryo-rolling. *Intermetallics*. 2022;148:107638. doi:10.1016/j.intermet.2022.107638.
 17. Wu Y., Liu S., Luo K., et al. Deformation mechanism and mechanical properties of a CoCrFeNi high-entropy alloy via room-temperature rolling, cryorolling, and asymmetric cryorolling. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023;960:170883. doi:10.1016/j.jallcom.2023.170883.
 18. Liu S., Luo K., Gu H., et al. Phase reversion-induced heterogeneous structure in a ferrous medium-entropy alloy via cryorolling and annealing. *Scripta Materialia*. 2023;222:115004. doi:10.1016/j.scriptamat.2022.115004.
 19. Joshi A., Yogesha K.K., Jayaganthan R. Influence of cryorolling and followed by annealing on high cycle fatigue behavior of ultrafine grained Al 2014 alloy. *Materials Characterization*. 2017;127:253-271. doi:10.1016/j.matchar.2017.02.003.
 20. Yu H., Wang L., Yan M., et al. Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Ti Fabricated by Cryorolling and Subsequent Annealing. doi:10.1002/adem.201901463.

Поступила 10.12.2025; принята к публикации 14.01.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 10/12/2025; revised 14/01/2026; published 30/06/2026

Ву Юдзе – доктор наук, Государственная ключевая лаборатория прецизионного производства для экстремальных условий эксплуатации, Научно-исследовательский институт лёгких сплавов, Центральный южный университет, Чанша, Китай. ORCID 0000-0003-0479-9246

Хайлян Ю – доктор наук, профессор, Государственная ключевая лаборатория прецизионного производства для экстремальных условий эксплуатации, Научно-исследовательский институт лёгких сплавов, Центральный южный университет, Чанша, Китай; приглашённый ведущий ученый лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: yuhailiang@csu.edu.cn. ORCID 0000-0001-7959-0717

Песин Александр Моисеевич – доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего лабораторией «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: pesin@bk.ru. ORCID 0000-0002-5443-423X

Пустовойтов Денис Олегович – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела компьютерного моделирования лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: pustovoytov_den@mail.ru. ORCID 0000-0003-0496-0976

Yudze Wu – DrSc (Eng.), State Key Laboratory of Precision Manufacturing for Extreme Service Performance, Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha, China. ORCID 0000-0003-0479-9246

Hailiang Yu – DrSc (Eng.), Professor, State Key Laboratory of Precision Manufacturing for Extreme Service Performance, Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha, China. Invited Leading Scientist of the Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: yuhailiang@csu.edu.cn. ORCID 0000-0001-7959-0717

Alexander M. Pesin – DrSc (Eng.), Professor, Deputy Head of the Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: pesin@bk.ru. ORCID 0000-0002-5443-423X

Denis O. Pustovoytov – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Computer Modeling Department of the Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: pustovoytov_den@mail.ru. ORCID 0000-0003-0496-0976

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669.15-194

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-93-101



ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ TRIP-СТАЛЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОТИВООБВАЛЬНЫХ КОЛЬЧУЖНЫХ СЕТОК

Константинов Д.В.¹, Корчунов А.Г.¹, Огнева Е.М.¹, Комкова Д.А.²¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия² Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Защита транспортной и гражданской инфраструктуры в горных регионах от камнепадов и селей требует создания высокоэффективных инженерных заграждений. Традиционные кольчужные сетки из высокоуглеродистой стали часто достигают предела своей энергоемкости из-за низкой пластичности материала, что в условиях динамического удара приводит к локальному хрупкому разрушению колец и пробитию барьера. В этой связи актуальным является поиск новых материалов, способных сочетать высокую прочность с адаптивной пластичностью. **Цель работы.** Исследование и обоснование возможности применения сталей с эффектом пластичности, наведенной превращением (TRIP-сталей), для производства элементов противообвальных кольчужных сеток с целью повышения их энергопоглощающей способности. **Используемые методы.** Исследование проведено методом компьютерного моделирования в программном комплексе Abaqus. Разработана конечно-элементная динамическая модель взаимодействия жесткого индентора массой 300 кг с фрагментом кольчужной сетки при скоростях от 10 до 20 м/с. Проведено сравнительное моделирование поведения сетки из традиционной стали 80 и метастабильной стали TRIP700. Для описания TRIP-эффекта использована модель с учетом зависимости предела текучести и критериев разрушения (Ductile Damage) от скорости деформации. **Новизна.** Впервые предложена и обоснована концепция применения TRIP-сталей в метизном производстве для систем инженерной защиты. Установлено, что за счет фазового превращения аустенита в мартенсит в зонах концентрации напряжений реализуется механизм динамического упрочнения, предотвращающий преждевременную локализацию деформаций в узлах контакта колец. **Результат.** Установлено, что применение стали TRIP700 позволяет увеличить порог поглощаемой энергии конструкции более чем в 4 раза по сравнению с традиционными решениями. Показано, что в TRIP-стали превалирует механизм пластической диссипации энергии (ALLPD), обеспечивающий полную остановку объекта без значительной упругой отдачи, в то время как сталь 80 демонстрирует склонность к мгновенному разрушению при достижении критических скоростей удара. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют рекомендовать внедрение TRIP-сталей в производство высокопрочной проволоки для систем защиты от камнепадов. Использование предложенного материала позволяет создавать «самоадаптирующиеся» защитные барьеры с повышенным ресурсом надежности, способные эффективно гасить энергию удара даже при жестких схемах закрепления или отказе демпфирующих элементов анкерных систем.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, сталь с трансформационно-индуцированной пластичностью, кольчужные сетки, геотекстиль

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (соглашение № 25-29-20042 от 14.05.2025, <https://rscf.ru/project/25-29-20042/>) и финансовой поддержки Правительства Челябинской области (Соглашение № 30-2025-002767 от 07.07.2025).

© Константинов Д.В., Корчунов А.Г., Огнева Е.М., Комкова Д.А., 2026

Для цитирования

Оценка возможности применения TRIP-сталей в производстве противообвальных кольчужных сеток / Константинов Д.В., Корчунов А.Г., Огнева Е.М., Комкова Д.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 93-101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-93-101>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ASSESSMENT OF THE FEASIBILITY OF TRIP STEELS APPLICATION IN THE MANUFACTURING OF ROCKFALL PROTECTION RING-NET BARRIERS

Konstantinov D.V.¹, Korchunov A.G.¹, Ogneva E.M.¹, Komkova D.A.²

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The protection of transport and civil infrastructure in mountainous regions against rockfalls and debris flows requires the development of highly efficient protective barrier systems. Conventional ring-net barriers manufactured from high-carbon steel often reach the limit of their energy absorption capacity due to the material's low ductility. Under dynamic impact loading, this frequently results in localized brittle fracture of the rings and subsequent barrier perforation. Therefore, the search for new materials capable of combining high strength with adaptive ductility is of considerable practical importance. **Objectives.** The aim of this study is to investigate and justify the feasibility of using Transformation-Induced Plasticity (TRIP) steels for the production of ring-net barrier components in order to enhance their energy absorption capacity. **Methods Applied.** The study has been conducted using computer simulation in the Abaqus. A finite-element dynamic model has been developed to simulate the interaction between a rigid indenter with a mass of 300 kg and a fragment of a ring-net barrier at impact velocities ranging from 10 to 20 m/s. Comparative simulations have been performed for barriers manufactured from conventional Grade 80 steel and metastable TRIP700 steel. To describe the TRIP effect, a constitutive model accounting for strain-rate-dependent yield strength and ductile damage criteria has been employed. **Originality.** For the first time, the concept of applying TRIP steels in wire-product manufacturing for engineering protection systems has been proposed and substantiated. It was established that the stress-induced transformation of retained austenite into martensite in regions of stress concentration provides a mechanism of dynamic strengthening, preventing premature strain localization at ring contact nodes. **Result.** The simulations demonstrated that the use of TRIP700 steel increases the energy absorption threshold of the structure by more than four times compared with conventional solutions. It has been shown that plastic energy dissipation (ALLPD) is the dominant energy absorption mechanism in TRIP steel, enabling complete arrest of the impacting object with minimal elastic rebound. In contrast, Grade 80 steel has exhibited a tendency toward instantaneous failure upon reaching critical impact velocities. **Practical Relevance.** The obtained results support the implementation of TRIP steels in the production of high-strength wire for rockfall protection systems. The proposed material enables the development of "self-adaptive" protective barriers with enhanced reliability and service life, capable of efficiently dissipating impact energy even under rigid anchoring conditions or in the event of damping element failure within anchor systems.

Keywords: computer simulation, transformation-induced plasticity steel, ring-net barriers, geotextiles

The study was funded by the Russian Science Foundation (agreement No. 25-29-20042 dated May 14, 2025, <https://rscf.ru/project/25-29-20042/>) and The Government of the Chelyabinsk Region (agreement No. 30-2025-002767 dated July 07, 2025).

For citation

Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Ogneva E.M., Komkova D.A. Assessment of the Feasibility of Trip Steels Application in the Manufacturing of Rockfall Protection Ring-Net Barriers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 93-101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-93-101>

Введение

Проблема защиты инфраструктуры от камнепадов и селей остается критической для горных регионов с высоким риском чрезвычайных ситуаций. Это является одной из наиболее острых проблем инженерной геологии и гражданского строительства [1]. Одним из наиболее эффективных решений для перехвата объектов с высокой кинетической энергией (до 5000–8000 кДж) являются гибкие барьеры на основе кольчужных кольцевых сеток. Традиционно для изготовления противообвальных барьеров применяются кольчужные сетки из высокопрочной стальной проволоки (например, сталь 80) в виде колец из стальных

прутьев или канатов (как правило, с цинковым покрытием для защиты от агрессивной коррозии, характерной для данной области применения). Ключевым требованием к таким конструкциям является не только высокая разрывная нагрузка, но и способность к значительному энергопоглощению. В отличие от жестких конструкций, такие сетки способны к значительным пластическим и геометрическим деформациям, что позволяет плавно гасить энергию удара [2]. При этом следует отметить, что рядовые высокоуглеродистые стали эффективно работают в основном за счет геометрической податливости колец сетки, в то время как ресурс самого материала по пластичности

часто ограничен. Как показывают исследования [3], при высокоскоростном ударе в узлах контакта колец возникают значительные концентраторы напряжений, приводящие к локализации деформаций и преждевременному хрупкому разрушению материала.

В этом контексте перспективным направлением является применение сталей с эффектом пластичности, наведенной превращением (TRIP-стали). Фундаментальные основы этого класса материалов были заложены в работах [4], где было показано, что превращение остаточного аустенита в мартенсит в процессе деформирования позволяет одновременно достичь высокой прочности и исключительной пластичности. Применение TRIP-сталей в автомобильной промышленности доказало их превосходство в поглощении энергии удара [5-7]. Особый интерес представляет поведение TRIP-сталей при высоких скоростях деформации, характерных в том числе для камнепадов. Исследования [8, 9] и [10] подтверждают, что скоростная чувствительность TRIP-сталей способствует более равномерному распределению деформаций по объему материала, что может существенно повысить энергоемкость кольчужной сетки.

Несмотря на глубокую изученность TRIP-эффекта в листовом прокате для автопрома, вопросы применения таких сталей в метизном производстве остаются малоизученными, но перспективными. Современные исследования открывают широкие перспективы их применения в производстве метизов и длинномерных изделий (проволоки и прутков). В отличие от листов, где TRIP-эффект достигается сложной термомеханической обработкой [11] в линиях непрерывного отжига, при производстве высокопрочной проволоки фазовое превращение может инициироваться непосредственно в процессе волочения или последующей деформации готового изделия [12]. В работах [13, 14] рассматривается поведение высокопрочной стальной проволоки с метастабильным аустенитом. Было установлено, что частичное превращение аустенита в мартенсит при деформации прутка позволяет существенно повысить сопротивление материала микропластическим деформациям и увеличить предел выносливости. Это критически важно для метизов, работающих в условиях циклического или ударного нагружения, таких как пружины или элементы кольцевых сеток.

Особое значение для производства противообвальных барьеров имеет работа [15], указывающая на то, что в массивных изделиях круглого сечения распределение фаз происходит более равномерно, что снижает риск локального перенапряжения по сравнению с тонкими листами. Применение TRIP-сталей в производстве высокопрочного крепежа и проволочных канатов также подтверждает, что данный материал эффективно гасит энергию за счет «динамического упрочнения», что позволяет снизить металлоемкость конструкций без потери их защитных свойств. Авторы [16] обосновывают переход от обычных высокопрочных сталей к TRIP-сталям при производстве крепежа. Главная идея указанной рабо-

ты состоит в управляемом сохранении остаточного аустенита в готовом изделии. Это позволяет крепежу «подстраиваться» под нагрузки: если болт испытывает критический удар или импульсную нагрузку уже в составе конструкции, аустенит превращается в мартенсит, локально повышая прочность и предотвращая хрупкое разрушение. В работе [17] особое внимание уделено процессу проектирования маршрутов волочения проволоки с позиции оптимизации количества остаточного аустенита в микроструктуре на каждом этапе волочения. В работе [18] перспективность прикладного применения обозначенных энергопоглощающих свойств продемонстрирована даже при восстановлении деталей машиностроения.

Таким образом, целью представляемой статьи является проверка посредством компьютерного моделирования концептуальной возможности применения TRIP-сталей в производстве противообвальных кольчужных сеток, то есть сравнение в условиях, требующих высокого энергопоглощения, двух пограничных «философий» (высокая прочность против адаптируемой пластичности), которые ранее (около полувека назад) уже противоборствовали в области проектирования систем кузовной автомобильной безопасности.

Материалы и методы исследования

Для исследования динамического взаимодействия была разработана конечно-элементная модель кольчужной сетки размером 10×8 колец. Параметры кольца: внешний диаметр – 300 мм, диаметр поперечного сечения прутка – 20 мм. Индентор («булыжник») имел диаметр описанной окружности 1000 мм. Для учета инерционных характеристик индентор задавался как жесткое тело массой 300 кг, сосредоточенной в центре тяжести. Дискретизация модели выполнена с использованием восьмиузловых линейных гексаэдральных элементов с уменьшенным интегрированием (C3D8R). Плотность сетки в зоне контакта была выбрана таким образом, чтобы обеспечить минимум 4-6 элементов по диаметру сечения прутка для корректного описания градиента напряжений при изгибе. Общий вид сборки представлен на **рис. 1**.

В работе проводилось сравнительное моделирование двух типов сталей:

- Сталь 80: традиционная высокоуглеродистая сталь, моделируемая как упругопластическая среда с изотропным упрочнением.

- Сталь TRIP700: сталь с эффектом пластичности, наведенной превращением.

Для корректного отображения TRIP-эффекта в условиях динамического удара была использована модель табличного задания кривых текучести (Rate-Dependent Yielding). Свойства материала задавались набором кривых «напряжение — пластическая деформация» для фиксированных скоростей деформации: 0, 2, 20 и 200 с⁻¹. Это позволило учесть упрочнение материала, связанное не только с деформационным наклепом, но и с кинетикой образования мартенсита при различных скоростях нагружения.

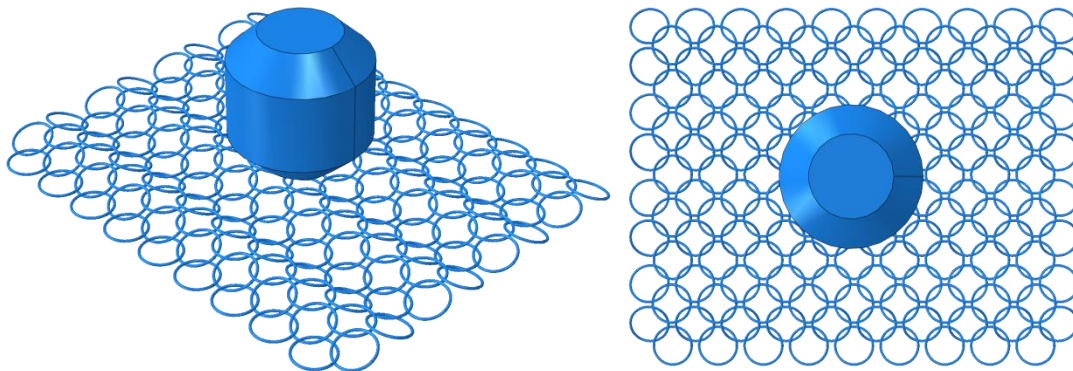


Рис. 1. Общий вид сборки рассматриваемой модели
 Fig. 1. Common view of the model assembly

Для моделирования процесса разрыва колец использована модель накопления повреждений Ductile Damage. Эквивалентная пластическая деформация разрушения задавалась в зависимости от скорости деформации. При статической нагрузке значение составляло 0.35, снижаясь до 0.3 при скорости 200 с⁻¹. Параметр трехосности напряжений (Stress Triaxiality) был принят равным 0.33, что соответствует превалирующему состоянию одноосного растяжения в витках колец при ударе. После достижения критерия инициации разрушения деградация жесткости элементов описывалась параметром Damage Evolution со значением энергии разрушения (или смещения) 1.5, что обеспечивает численный учет вязкого характера разрушения TRIP-стали и предотвращает мгновенную потерю несущей способности элемента.

Для стали 80 деформация разрушения задана на уровне 0.05. Это в 7 раз меньше, чем у TRIP-стали

(0.35). Такая низкая пластичность характерна для высокоуглеродистых сталей с высоким пределом прочности, работающих в условиях динамического удара. Damage Evolution принят равным 0.15. Малое значение этого параметра указывает на резкое, практически мгновенное падение несущей способности кольца после появления первых микротрещин (хрупкий характер разрушения при самом неблагоприятном сценарии нагружения). Значение 0.05 наглядно подчеркивает чувствительность к концентраторам, так как в реальной кольчужной сетке из стали 80 кольца часто разрушаются именно из-за хрупкости.

Полученные результаты и их обсуждение

Анализ энергетического баланса для камня весом 300 кг на скорости 10 м/с (рис. 2, 3) выявил принципиальные различия в работе защитных экранов.

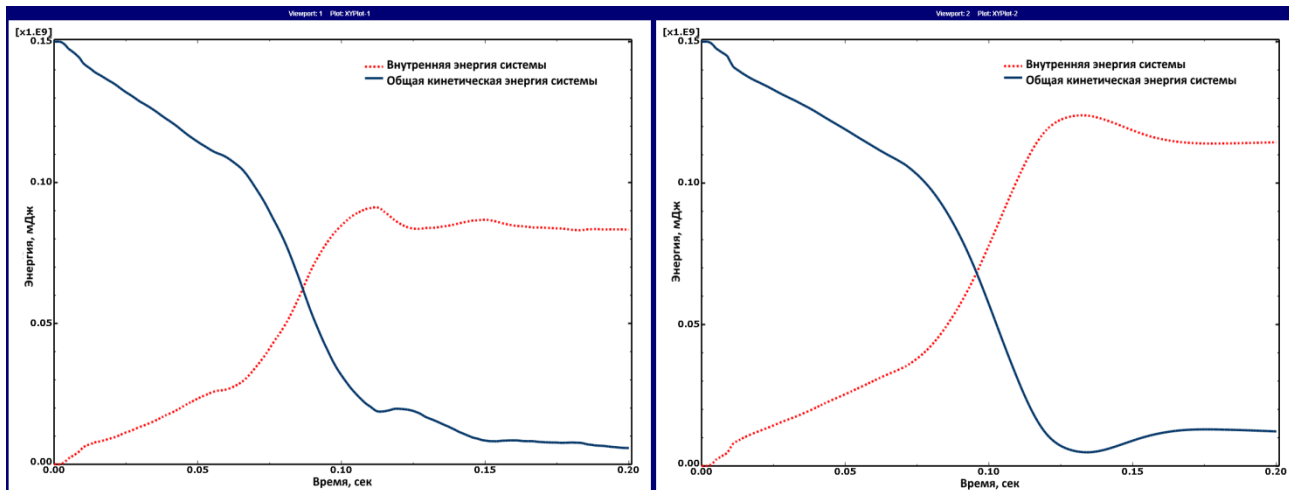


Рис. 2. График изменения во времени общей внутренней энергии системы (красная линия ALLIE) и общей кинетической энергии системы (синяя линия ALLKE) для сетки из стали 80 (слева) и из TRIP700 (справа) для скорости индентора 10 м/с

Fig. 2. Time history graph of the total internal energy (red line ALLIE) and the total kinetic energy (blue line ALLKE) for ring-net barriers made of Grade 80 steel (left) and TRIP700 steel (right) for indenter speed 10 m/s

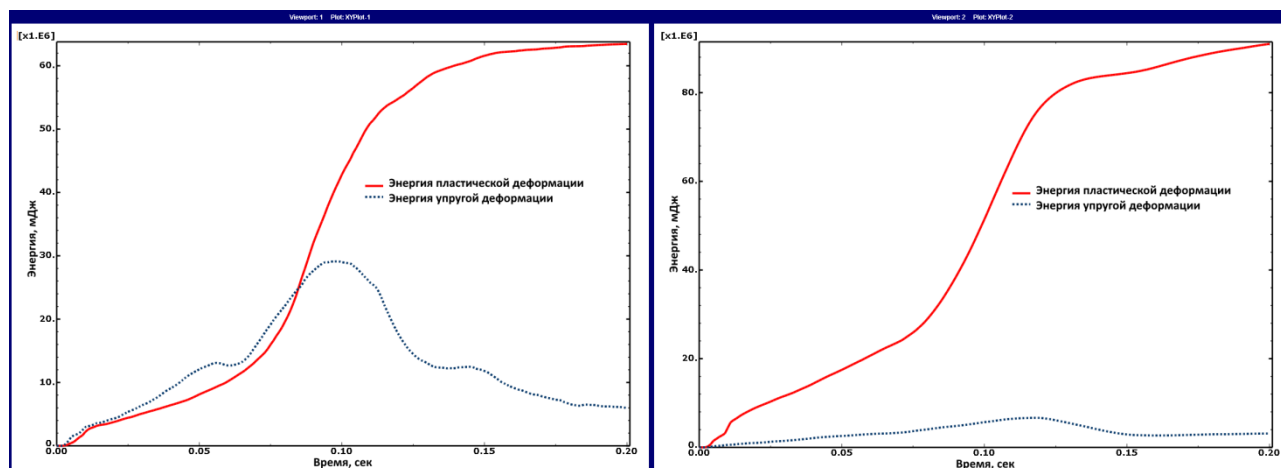


Рис. 3. График изменения во времени общей работы пластической деформации системы (красная линия ALLPD) и общей упругой деформации системы (синяя линия ALLSE) для сетки из стали 80 (слева) и из TRIP700 (справа) для скорости индентора 10 м/с

Fig. 3. Time history graph of the total plastic strain (red line ALLPD) and the total elastic strain (blue line ALLSE) for ring-net barriers made of Grade 80 steel (left) and TRIP700 steel (right) for indenter speed 10 m/s

В модели со сталью 80 наблюдается преждевременный выход кривой внутренней энергии (ALLIE - Internal Energy) на плато, что коррелирует с моментом разрушения критического числа колец и последующим пробитием сетки (остаточная кинетическая энергия камня отлична от нуля). В свою очередь, сетка из TRIP-стали демонстрирует выраженную стадию пластического деформирования. Пиковое значение внутренней энергии в данном случае выше, чем у традиционной стали 80. Характер кривой ALLKE (кинетическая энергия) свидетельствует о полной остановке индентора к моменту времени $t = 0,12$ с (рис. 4).

Таким образом, TRIP-сталь реализует свой потенциал пластичности, обеспечивая более высокую

энергоёмкость конструкции при идентичных геометрических параметрах. На правом графике виден небольшой пик на красной кривой в конце и последующий спад. Это может быть связано с упругой отдачей сетки после остановки камня, то есть эффектом демпфирования и частичного возврата упругой энергии. Сталь 80 аккумулирует значительную долю энергии в виде упругих деформаций (ALLSE), что создает высокие динамические нагрузки на анкеры системы и увеличивает риск рикошета. Для TRIP-стали, наоборот, характерно подавляющее преобладание пластической диссипации (ALLPD) над упругой энергией (ALLSE). Это свидетельствует о высокой демпфирующей способности материала, позволяющей гасить удар практически без упругой отдачи.

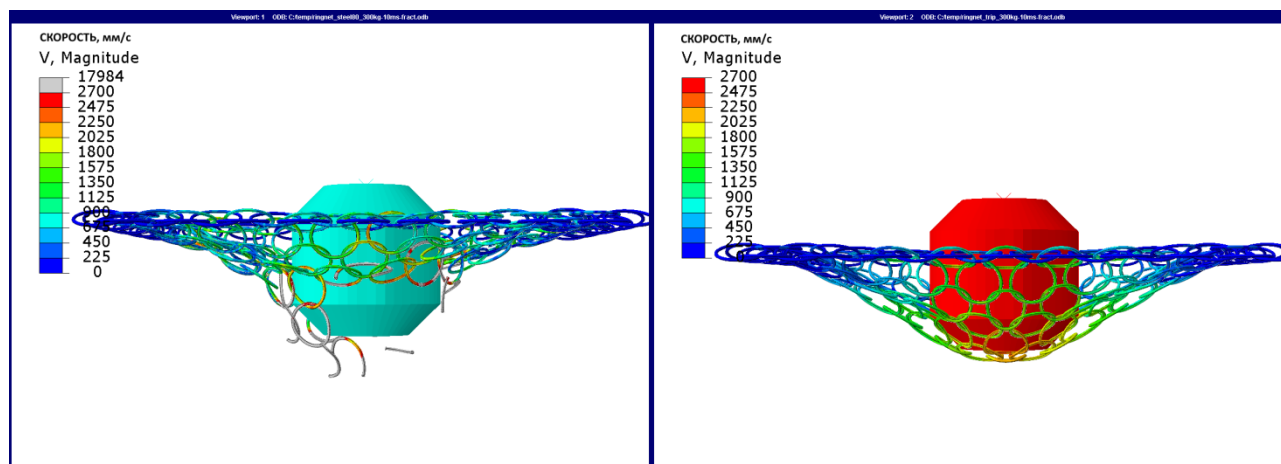


Рис. 4. Распределение амплитудных скоростей (мм/с) в конце расчета для сетки из стали 80 (слева) и из TRIP700 (справа) для изначальной скорости индентора 10 м/с

Fig. 4. Velocities distribution (mm/s) at the end of the calculation for ring-net barriers made of Grade 80 steel (left) and TRIP700 steel (right) with initial indenter velocity 10 m/s

На **рис. 5** в случае стали 80 кинетическая энергия (ALLKE) падает лишь наполовину и замирает на уровне 0.17. То есть в данном случае сетка была пробита практически мгновенно. Индентор улетел, сохранив большую часть скорости. Сталь 80 при такой жесткой фиксации просто «срезается» о границы или в месте контакта. С применением TRIP-стали кривая ALLKE практически касается нуля. Камень практически остановлен, но есть небольшой «хвост» остаточной энергии. Внутренняя энергия (ALLIE) выросла до 0.28, что почти в 3 раза выше, чем у стали 80. На примере этого случая стоит отметить, что принятая в данной работе расчетная схема с жесткой фиксацией граничных колец создает максимально неблагоприятное напряженное состояние, не учитывающее податливость анкерных систем реальных барьеров. Тем не менее именно в таких своего рода «утрированных» условиях преимущество TRIP-стали проявляется наиболее ярко и наглядно. В реальных условиях наличие демпферов на анкерах еще сильнее растянет процесс во времени, что даст TRIP-эффекту еще больше возможностей для реализации. При скорости удара 15 м/с сетка из стали 80 демонстрирует хрупкий характер разрушения, не успевая включить в работу периферийные участки. В то же время TRIP-сталь за счет высокого ресурса пластичности и динамического упрочнения успевает диссипировать около 90% кинетической энергии индентора. Это позволяет предположить, что в составе реальных конструкций с демпфирующими элементами применение TRIP-сталей обеспечит кратный рост надежности при экстремальных нагрузках.

Анализ графиков для скорости 20 м/с (**рис. 6**) показал, что для сетки из стали 80 кинетическая энергия (ALLKE) практически не снижается. Булыжник «пролетает» сквозь сетку, потеряв лишь 20% своей энер-

гии (с 0.6 до 0.45). В это же время внутренняя энергия (ALLIE) остается на крайне низком уровне. Таким образом, из-за высокой скорости удара и низкой пластичности (0.05) кольца в зоне контакта разрушаются мгновенно, не успевая передать нагрузку на остальную часть полотна. Происходит локальное пробитие. При этом TRIP-сталь снижает кинетическую энергию практически до нуля. Сетка смогла остановить объект, летящий на скорости 72 км/ч, несмотря на жесткое закрепление границ. Внутренняя энергия (ALLIE) системы в данном случае достигает достаточно высоких значений (около 0.5 на графике), то есть материал в зоне контакта не разрушается сразу, а начинает интенсивно упрочняться и растягиваться, вовлекая в работу соседние кольца. Сетка работает как единое целое, превращая всю кинетическую энергию булыжника в работу пластической деформации. Несмотря на экстремальные условия и жесткую фиксацию контура, за счет высокого значения энергии разрушения и способности к динамическому упрочнению сетка обеспечивает полную остановку объекта. Значение внутренней энергии (Internal Energy) в этом случае в 5 раз превышает показатели стали 80. Это доказывает, что применение TRIP-сталей позволяет перевести механизм взаимодействия из локального разрушения в общее деформирование всей системы, что является ключевым фактором живучести противообвальных барьеров.

Ввиду прямой экспоненциальной зависимости доли мартенсита от эквивалентной пластической деформации зоны максимального упрочнения полностью совпадают с областями локализации PEEQ (в соответствии с моделью Олсона-Коэна (Olson-Cohen model)), продемонстрированными на **рис. 7** (нулевые значения для наглядности исключены из визуализации).

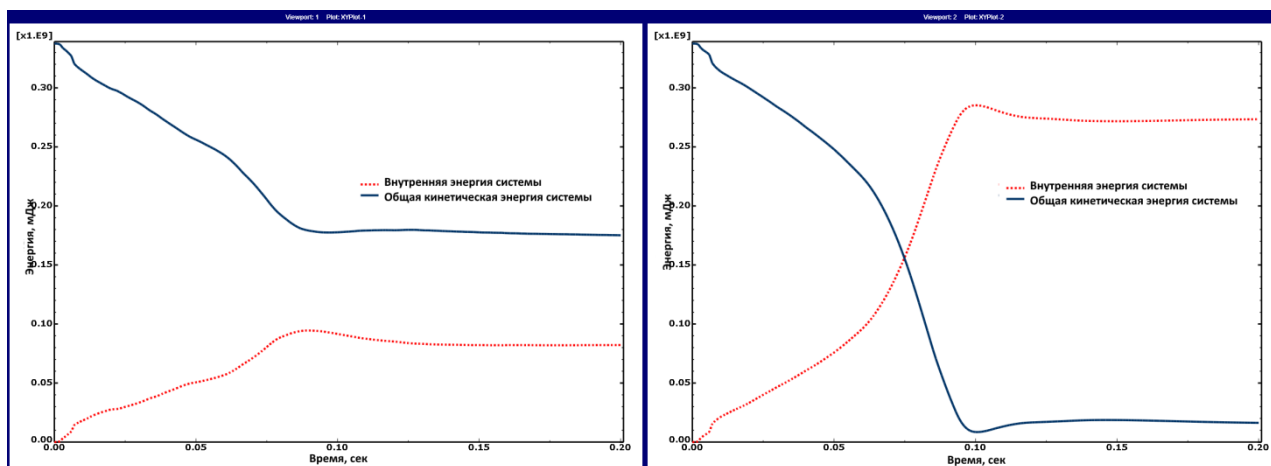


Рис. 5. График изменения во времени общей внутренней энергии системы (красная линия ALLIE) и общей кинетической энергии системы (синяя линия ALLKE) для сетки из стали 80 (слева) и из TRIP700 (справа) для скорости индентора 15 м/с

Fig. 5. Time history graph of the total internal energy (red line ALLIE) and the total kinetic energy (blue line ALLKE) for ring-net barriers made of Grade 80 steel (left) and TRIP700 steel (right) for indenter speed 15 m/s

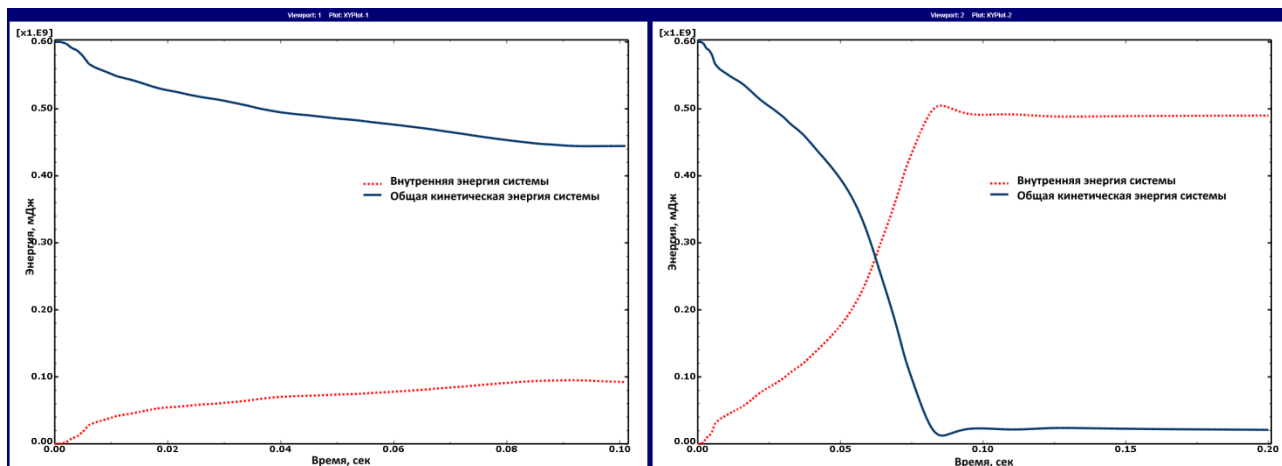


Рис. 6. График изменения во времени общей внутренней энергии системы (красная линия ALLIE) и общей кинетической энергии системы (синяя линия ALLKE) для сетки из стали 80 (слева) и из TRIP700 (справа) для скорости индентора 20 м/с

Fig. 6. Time history graph of the total internal energy (red line ALLIE) and the total kinetic energy (blue line ALLKE) for ring-net barriers made of Grade 80 steel (left) and TRIP700 steel (right) for indenter speed 20 m/s

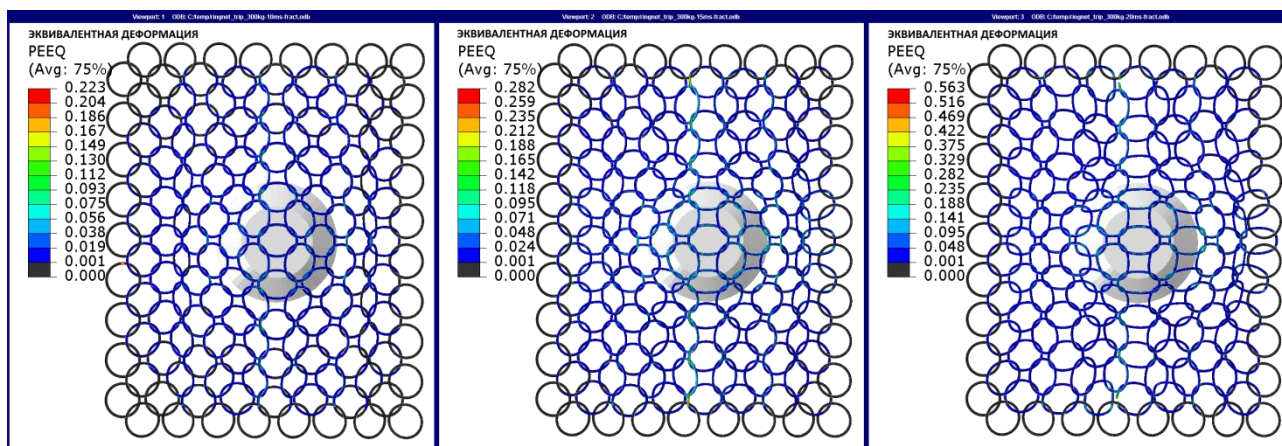


Рис. 7. Распределение эквивалентной деформации в конце расчета для сетки из стали TRIP700 для изначальной скорости индентора (слева-направо) 10, 15, 20 м/с

Fig. 7. Equivalent strain distribution at the end of the calculation for TRIP700 steel ring-net barriers for initial indenter velocity (from left to right) of 10, 15, 20 m/s

Сравнительный анализ полей эквивалентных деформаций и концентрации мартенситной фазы подтверждает адаптивный характер поведения TRIP-стали. Установлено, что фазовое превращение локализуется в зонах максимального градиента деформаций у границ закрепления сетки. Это обеспечивает локальное повышение несущей способности именно в тех узлах, которые являются критическими для целостности всей конструкции при высокоскоростном ударе.

Заключение

Таким образом, применение стали TRIP700 вместо стали 80 позволяет повысить порог поглощаемой энергии сетки более чем в 4 раза (с 15 до 60 кДж) в условиях цифрового эксперимента с жестким закреп-

лением. Установлено, что TRIP-эффект эффективно предотвращает локализацию деформаций при высоких скоростях удара (до 20 м/с), обеспечивая вовлечение всей площади сетки в процесс диссипации энергии. Следовательно, можно сделать вывод, что теоретически использование TRIP-сталей в метизном производстве для систем защиты от камнепадов позволяет существенно снизить риск пробития барьера при сверхнормативных нагрузках, даже без учета работы демпфирующих анкерных систем. Смежным преимуществом в данном случае является тот факт, что TRIP-сталь позволяет эффективнее использовать металлоемкость сетки. При динамическом ударе (20 м/с) сталь 80 не успевает проявить свои упругие свойства, и локальное превышение предела прочности ведет к лавинообразному разрушению. Для стали

80 критически важна работа анкерной системы, а TRIP-сталь в условиях представленного цифрового эксперимента проявила себя как «самодостаточный» демпфирующий материал, который может спасти конструкцию, даже если анкеры сработали некорректно или они установлены слишком жестко.

При этом важно отметить, что целью исследования не являлась замена действующих систем с применением высокоуглеродистой стали. В работе проводилось сравнение лишь еще одной дополнительной альтернативной стратегии защиты, которая наиболее эффективно может раскрыться именно в комбинации с действующими средствами.

Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение гибридных структур, например, сочетающих кольца из различных марок стали либо многослойные барьеры, где каждый слой выполняет наиболее пригодную для себя эксплуатационную задачу.

Список источников

1. Rockfall characterisation and structural protection – a review / Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L. K. A., Gerber W. and Jaboyedoff M. // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011, no. 11, 2617–2651.
2. Grassl. H. Design of rockfall protection systems : diss. ... Dr. sc. techn. Zurich: ETH Zurich. 2002. 134 p.
3. Full-scale dynamic analysis of an innovative rockfall fence under impact using the discrete element method: from the local scale to the structure scale / Bertrand D., Trad A., Limam A. et al. // *Rock Mech Rock Eng.* 2012, no. 45, pp. 885–900.
4. The enhancement of ductility on high-strength steel / Zaccay V.F., Parker E.R., Fahr D., et al. // *Transactions of Applied Structures Mechanics.* 1967, no. 60, pp. 252-258.
5. Bleck W., Xiaofei Guo, Yan Ma. The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels // *Steel Research International.* 2017, no. 88(10), 1700218.
6. Soleimani M., Kalhor A., Mirzadeh H. Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: A review // *Materials Science and Engineering: A.* 2020, 795, 140023.
7. High strength Fe–Mn–(Al, Si) TRIP/TWIP steels development — properties — application / Grassel O., Krüger L., Frommeyer G., Meyer L. W. // *International Journal of Plasticity.* 2000, vol. 16, no. 10–11, pp. 1391-1409.
8. On the sources of work hardening in multiphase steels assisted by transformation-induced plasticity / Jacques P., Furnémont Q., Mertens A., Delannay F. // *Philosophical Magazine A.* 2001, vol. 81, no. 7, pp. 1789-1812.
9. Константинов Д.В., Огнева Е.М., Корчунов А.Г. Перспективы стали с ТРИП-эффектом в производстве пенометаллических изделий // *Механическое оборудование металлургических заводов.* 2025. № 2(25). С. 31-37.
10. The effect of strain-induced martensitic transformation on mechanical properties of TRIP steel / Dan W.J., Li S.H., Zhang W.G., Lin Z.Q. // *Materials & Design.* 2008, vol. 29, no. 3, pp. 604-612.
11. Полякова М.А., Извеков Ю.А. Описание пластической деформации многофазных сталей в процессе термометаллической обработки с учетом изменения фазового состава // *Теория и технология металлургического производства.* 2025. №3(54). С. 21-25.
12. Heller W., Bleck W., Ohlert J. Development of high-strength wire rod with improved ductility by using the TRIP effect // *Stahl und Eisen.* 2004, vol. 124, no. 1, pp. 31–37.
13. Shen Y. Z., Kim J. M., Kim S. J. Mechanical properties and TRIP effect of a metastable austenitic steel wire // *Materials Letters.* 2012, no. 85, pp. 71–73.
14. Effect of cold drawing strain on the microstructure and mechanical properties of TRIP-aided steel wires / J. J. Zhu, Y. Z. Shen, J. M. Kim, S. J. Kim // *Journal of Iron and Steel Research International.* 2014, vol. 21, no. 8, pp. 783–788.
15. Fonstein N. Advanced high strength sheet steels: physical metallurgy, design, processing, and properties. Cham: Springer International Publishing, 2015. 395 p.
16. Мультимасштабное компьютерное моделирование производства и эксплуатации самоадаптирующегося крепежа из стали с трип-эффектом / А. Г. Корчунов, Д. В. Константинов, Е. М. Огнева [и др.] // *Черные металлы.* 2025. № 11. С. 27–33.
17. Корчунов А.Г., Константинов Д.В., Огнева Е.М. Моделирование структурообразования стали с трип-эффектом в процессе многократного волочения проволоки // *Черные металлы.* 2026. № 2. С. 62–67.
18. Константинов Д.В., Шекшеев М.А., Полякова М.А. Восстановление деталей машин лазерной наплавкой порошка TRIP-стали и компьютерное моделирование их обработки и эксплуатации // *Механическое оборудование металлургических заводов.* 2025. №1(25). С. 11-16.

References

1. Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L. K. A., Gerber W., Jaboyedoff M. Rockfall characterisation and structural protection - a review. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2011;11:2617-2651.
2. H. Grassl. Design of rockfall protection systems : diss. ... Dr. sc. techn. Grassl Hans. Zurich: ETH Zurich, 2002. 134.
3. Bertrand D., Trad A., Limam A. et al. Full-scale dynamic analysis of an innovative rockfall fence under impact using the discrete element method: from the local scale to the structure scale. *Rock Mech Rock Eng.* 2012;45:885-900.
4. Zaccay V.F., Parker E.R., Fahr D. et al. The enhancement of ductility on high-strength steel. *Transactions of Applied Structures Mechanics.* 1967;60:252-258.
5. Bleck W., Xiaofei Guo, Yan Ma. The TRIP effect and its application in cold formable sheet steels. *Steel Research International.* 2017;88(10):1700218.
6. Soleimani M., Kalhor A., Mirzadeh H. Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: A review. *Materials Science and Engineering: A.* 2020;795:140023.
7. Grassel O., Krüger L., Frommeyer G., Meyer L. W. High strength Fe–Mn–(Al, Si) TRIP/TWIP steels development — properties — application. *International Journal of Plasticity.* 2000;16(10-11):1391-1409.
8. Jacques P., Furnémont Q., Mertens A., Delannay F. On the sources of work hardening in multiphase steels assisted by

- transformation-induced plasticity. *Philosophical Magazine A*. 2001;81(7):1789-1812.
9. Konstantinov D.V., Ogneva E.M., Korchunov A.G. Prospects of trip steel in the production of metallic foam products. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants]. 2025;(2(25)):31-37
 10. Dan W.J., Li S.H., Zhang W.G., Lin Z.Q. The effect of strain-induced martensitic transformation on mechanical properties of TRIP steel. *Materials & Design*. 2008;29(3):604-612.
 11. Polyakova M.A., Izvekov Yu.A. Description of plastic deformation of multiphase steels during thermodeformation treatment taking into account the change in phase composition. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2025;54(3):21-25. (In Russ.)
 12. Heller W., Bleck W., Ohlert J. Development of high-strength wire rod with improved ductility by using the TRIP effect. *Stahl und Eisen*. 2004;124(1):31-37.
 13. Shen Y.Z., Kim J.M., Kim S.J. Mechanical properties and TRIP effect of a metastable austenitic steel wire. *Materials Letters*. 2012;85:71-73.
 14. Zhu J.J., Shen Y.Z., Kim J.M., Kim S.J. Effect of cold drawing strain on the microstructure and mechanical properties of TRIP-aided steel wires. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2014;21(8):783-788.
 15. Fonstein N. Advanced high strength sheet steels: physical metallurgy, design, processing, and properties. Cham: Springer International Publishing, 2015, 395 p.
 16. Korchunov A.G., Konstantinov D.V., Ogneva E.M. et al. Multiscale computer simulation of production and operation of self-adapting TRIP-steel fasteners. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2025;(11):27-33. (In Russ.)
 17. Korchunov A.G., Konstantinov D.V., Ogneva E.M. Modeling structure formation in TRIP steel during multiple wire drawing. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2026;(2):62-67.
 18. Konstantinov D.V., Shekshuev M.A., Polyakova M.A. Restoration of machine parts by laser surfacing of trip steel powder and computer modeling of their processing and operation. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants]. 2025;(1(25)):11-16.

Поступила 07.05.2026; принята к публикации 18.05.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 07/05/2026; revised 18/05/2026; published 30/06/2026

Константинов Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
E-mail: const_dimon@mail.ru. ORCID 0000-0003-3979-9940

Корчунов Алексей Георгиевич – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
E-mail: agkorchunov@mail.ru. ORCID 0000-0002-2844-8283

Огнева Екатерина Михайловна – кандидат технических наук, старший преподаватель,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
E-mail: fekla_med@mail.ru. ORCID 0000-0003-2893-7412

Комкова Дарья Аркадьевна – научный сотрудник,
Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
E-mail: komkova_d@imp.uran.ru. ORCID 0000-0001-5252-8913

Dmitry V. Konstantinov – PhD (Eng.), Researcher,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: const_dimon@mail.ru. ORCID 0000-0003-3979-9940

Alexey G. Korchunov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: agkorchunov@mail.ru. ORCID 0000-0002-2844-8283

Ekaterina M. Ogneva – PhD (Eng.), Senior Lecturer,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
E-mail: fekla_med@mail.ru. ORCID 0000-0003-2893-7412

Daria A. Komkova – Researcher
M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia.
E-mail: komkova_d@imp.uran.ru. ORCID 0000-0001-5252-8913



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9.048.4
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-102-114

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОКАЧКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ В ХОДЕ ПРОВОЛОЧНО-ВЫРЕЗНОЙ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Федоров А.А., Бредгауэр Ю.О., Полонянкин Д.А., Гаранин Д.В., Бобков Н.В., Осташ С.В.

Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Аннотация. Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка (ПВЭЭО) широко применяется в машиностроении, однако обрывы проволочного электрода-инструмента остаются в настоящее время одной из ключевых проблем, снижающих эффективность процесса. Исследование гидродинамики диэлектрической жидкости в рабочем зазоре позволяет выявить критические режимы обработки и минимизировать вероятность обрывов. Недостаточность сведений о месте образования мостика сварки и его влиянии на возникновение короткого замыкания и обрывы проволоки, а также противоречивость данных об условиях стабильной прокачки диэлектрической жидкости обуславливают актуальность данного исследования. Целью работы является экспериментальное исследование потоков диэлектрической жидкости при ПВЭЭО для определения зон возникновения «мостика сварки» и предотвращения обрывов электрода-инструмента. Методом вычислительной гидродинамики выполнено компьютерное моделирование потоков жидкости с последующими макетными и натурными экспериментами на станке Sodick VZ 300L. Научная новизна работы заключается в установлении области столкновения встречных потоков диэлектрической жидкости в рабочем зазоре при ПВЭЭО, расположенной на 5% ниже геометрической полувысоты детали, подвергнутой обработке в режиме «CLOSE». На основе результатов моделирования предложена гипотеза о локализации области формирования «мостика сварки», приводящего к обрыву проволоки. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности оптимизации системы подачи диэлектрической жидкости в межэлектродный зазор, снижении вероятности обрывов проволоки и повышении производительности ПВЭЭО. С учетом полученных результатов представляет интерес моделирование условий удаления частиц шлама из межэлектродного промежутка при различных режимах промывки межэлектродного зазора (отключение одного из сопел, увеличение/уменьшение давления промывки для предотвращения образования «рециркуляционной зоны»). Альтернативным направлением развития дальнейших исследований является разработка алгоритмов адаптивного управления параметрами прокачки в реальном времени.

Ключевые слова: проволочно-вырезная электроэрозионная обработка, обрыв проволоки, мостик сварки, прокачка жидкости, моделирование потоков жидкости, короткое замыкание

© Федоров А.А., Бредгауэр Ю.О., Полонянкин Д.А., Гаранин Д.В., Бобков Н.В., Осташ С.В., 2026

Для цитирования

Имитационное моделирование и экспериментальное исследование прокачки диэлектрической жидкости в ходе проволочно-вырезной электроэрозионной обработки / Федоров А.А., Бредгауэр Ю.О., Полонянкин Д.А., Гаранин Д.В., Бобков Н.В., Осташ С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 102-114. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-102-114>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF DIELECTRIC FLUID FLUSHING DURING WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Fedorov A.A., Bredgauer Ju.O., Polonyankin D.A., Garanin D.V., Bobkov N.V., Ostash S.V.

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract. Wire electrical discharge machining (WEDM) is widely used in mechanical engineering; however, wire electrode breakage remains one of the key issues reducing process efficiency. Study of the hydrodynamics of the dielectric fluid in the machining gap makes it possible to identify critical machining conditions and minimize the probability of wire breakage. The lack of information regarding the location of weld bridge formation and its influence on short circuits and wire breakage, as well as contradictory data concerning the conditions required for stable dielectric fluid flushing, determine the relevance of this study. The aim of this work is to experimentally study dielectric fluid flows during WEDM in order to identify the regions where a “weld bridge” is formed and to prevent wire electrode breakage. Computational fluid dynamics has been employed to model fluid flows, followed by laboratory-scale and full-scale experiments conducted on a Sodick VZ300L machine tool. The scientific novelty of the study lies in identifying the region where opposing dielectric fluid flows collide within the machining gap during WEDM in the “CLOSE” mode. This region is located approximately 5% below the geometric mid-height of the workpiece. Based on the simulation results, a hypothesis is proposed regarding the localization of the weld bridge formation zone that leads to wire breakage. The practical relevance of the obtained results lies in the possibility of optimizing the dielectric fluid supply system in the interelectrode gap, reducing the likelihood of wire breakage, and increasing WEDM productivity. Considering the obtained findings, further research should focus on modeling the conditions for debris particle removal from the interelectrode gap under various flushing modes (such as disabling one of the nozzles or increasing/decreasing flushing pressure) to prevent the formation of a recirculation zone. Another promising direction is the development of adaptive real-time control algorithms for dielectric fluid flushing parameters.

Keywords: wire electrical discharge machining (WEDM), wire breakage, weld bridge, dielectric fluid flushing, fluid flow modeling, short circuit

For citation

Fedorov A.A., Bredgauer Ju.O., Polonyankin D.A., Garanin D.V., Bobkov N.V., Ostash S.V. Simulation and Experimental Study of Dielectric Fluid Flushing During Wire Electrical Discharge Machining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 102-114. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-102-114>

Введение

Проволочно-вырезная электроэрозионная обработка (ПВЭЭО) – высокотехнологичный электрофизический метод, обеспечивающий достижение высокой точности размеров, формы, а также низкой шероховатости поверхностного слоя деталей, в том числе из труднообрабатываемых сталей и сплавов при производстве вырубных матриц, пресс-форм и штамповой оснастки. Ключевыми преимуществами метода ПВЭЭО являются: 1) возможность обработки любых токопроводящих материалов, в том числе труднообрабатываемых лезвийными методами; 2) возможность бездеформационной обработки нетехнологичных конструктивных элементов, таких как узкие щели и прорези, тонкостенные элементы.

Вместе с тем сравнительно невысокая производительность до сих пор является неразрешенной проблемой технологии ПВЭЭО. Одной из главных причин снижения производительности в ходе ПВЭЭО являются обрывы проволоки, обуславливающие повышенное потребление электроэнергии, образование поверхностных дефектов и увеличение продолжительности обработки [1–6].

С момента выпуска первого коммерческого проволочно-вырезного электроэрозионного станка (1967 год) научно-технологическим сообществом предпринимаются попытки предотвращения обрывов проволочного электрода-инструмента, однако до настоящего времени проблема обрывов проволоки полностью не решена. К основным хорошо изученным причинам обрывов проволоки ученые относят совокупное влияние следующих факторов:

- тепловое воздействие разрядных искр и уменьшение сечения проволоки вследствие образования кратеров в ходе плавления и испарения материала на ее поверхности;
- термонапряжения в проволоке и ее механическое растяжение, вызываемое преднатягом;
- локальные нарушения в системе обратной связи (в системе мониторинга межэлектродного зазора).

К наименее изученной причине обрывов проволоки относится короткое замыкание (КЗ) проволочного электрода-инструмента и обрабатываемой детали и, как следствие, выделение большого количества тепла на проволоке и ее плавление [7–10]. В межэлектродном промежутке, величина которого в современных станках составляет от 30 до 50 мкм, нахо-

дятся частицы шлама, образующиеся при плавлении обрабатываемой детали. В подавляющем большинстве случаев частицы шлама обладают сферической формой, а их размеры варьируются от единиц до нескольких десятков микрометров, что является достаточным условием для перекрытия межэлектродного зазора одной или несколькими частицами, и возникновения короткого замыкания (КЗ) [10], обуславливающего обрывы проволоки.

В работах [11-15] рассматриваются особенности образования «мостика сварки» в ходе ЭЗО. В статье [11] упомянут «мостик шлама», который образуется вследствие накопления шлама в межэлектродном зазоре. Авторами статьи [12] сообщается о возникновении дуги между электродами при электроэрозионной обработке мелких отверстий, вызванной скоплением шлама в зазоре, вследствие чего происходит короткое замыкание. Авторы исследования [15] выполнили анализ движения частиц шлама под действием электростатической силы при ПВЭЗО и пришли к выводу, что частицы шлама образуют «мостики» между анодом и катодом во время паузы между импульсами.

В работе [15] установлено, что накопление частиц шлама в межэлектродном промежутке обеспечивает образование «мостика шлама» между электродом-инструментом и поверхностью обрабатываемой детали, перекрывая рабочий зазор, тем самым способствуя возникновению КЗ.

В процессе электроэрозионной обработки концентрация шлама в зазоре снижает производительность [11, 16–18]. По этой причине производители проволочно-вырезных станков оснащают их соплами для промывки межэлектродного зазора и удаления накапливающегося в нем шлама. Прокачка диэлектрической жидкости из верхнего и нижнего сопел должна предотвращать скопление шлама и эффективно удалять его из рабочего зазора. Однако в ходе исследования потоков жидкости с помощью высокоскоростной камеры обнаружено, что за проволокой в геометрическом центре детали возможно возникновение «рециркуляционного потока» [19], который образуется при столкновении потоков из нижнего и верхнего сопел, что также подтверждается методами вычислительной гидродинамики [9]. Аналогичное явление наблюдали и российские ученые в ходе анализа эффективности промывки межэлектродного промежутка при копировально-прошивной электроэрозионной обработке полимерных композиционных материалов. Экспериментальные данные и компьютерное моделирование свидетельствуют о том, что при определенном положении сопел в ходе обработки возникает турбулентное движение потоков, способствующее снижению давления промывки, а также налипанию шлама на электрод-инструмент и возникновению КЗ [20]. Образование «рециркуляционного потока» приводит к столкновению частиц шлама, а также является причиной неэффективной эвакуации частиц шлама из зоны обработки.

Исследование влияния уровня подачи диэлектрической жидкости на обрывы проволоки показало, что при снижении скорости прокачки происходит увеличение амплитуды колебаний проволоки, а также возрастает количество частиц шлама, скопившихся в зазоре, что особенно выражено при врезании электрода-инструмента в заготовку (первые 1–3 мм обработки) и способствует росту числа обрывов проволоки [20].

Как сообщается в работе [2], частота обрывов проволоки в нижней части заготовки выше, чем в верхней. Данный эффект возникает благодаря действию силы тяжести на потоки диэлектрической жидкости и частицы шлама, способствующей более интенсивному движению частиц шлама в нижнем направлении, что повышает вероятность образования их агломератов, «мостика сварки» и, как следствие, возникновения КЗ.

Таким образом, существующие подходы к решению проблемы удаления частиц шлама посредством теоретического и(или) экспериментального исследования условий прокачки диэлектрической жидкости через межэлектродный зазор представлены в литературе весьма ограниченно, кроме того, опубликованные данные обладают отчасти противоречивым характером.

В настоящее время механизм образования «мостика сварки» не изучен детально, в научнотехнической литературе обнаруживаются фрагментарные данные о влиянии частиц шлама и «мостика сварки» на возникновение КЗ и обрывы проволоки, что обуславливает актуальность и практическую значимость данной работы, целью которой является моделирование процесса прокачки диэлектрической жидкости при ПВЭЗО, определение области столкновения потоков и характера течений диэлектрической жидкости в межэлектродном зазоре.

Материалы и методы исследования

Работы по данному исследованию были разделены на три части:

- 1) Компьютерное моделирование потоков диэлектрической жидкости в рабочем промежутке в среде SolidWorks FlowSimulation.
- 2) Макетное моделирование потоков диэлектрической жидкости в рабочем промежутке.
- 3) Проверка полученных данных на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Sodick VZ300L.

1. Компьютерное моделирование потоков диэлектрической жидкости в рабочем промежутке в среде SolidWorks FlowSimulation.

Для компьютерного моделирования были спроектированы 3D-модели заготовки (30×30×80 мм) (рис. 1, а, позиция 1), проволоки диаметром 0,25 мм (рис. 1, а, позиция 2), верхнего и нижнего сопел (рис. 1, а, позиции 3 и 4 соответственно), диаметр выходного канала сопел равен 6 мм, что соответствует паспорту станка. С учетом диаметра проволоки (0,25 мм) и межэлект-

родного зазора (0,05 мм) в заготовке спроектирована прорезь, имитирующая заход проволочного электрода-инструмента (рис. 1, б) при работе станка.

Расположение сопел относительно заготовки регулируется на станке режимами «CLOSE», «OPEN» и «OPEN U» (рис. 2). В данном исследовании расположение сопел относительно заготовки соответствует режиму «CLOSE», так как опыт работы авторов на станке показывает, что обрывы проволоки чаще происходят в этом режиме. Режим «CLOSE» обеспечива-

ет расстояние между обрабатываемой заготовкой и соплами, равное 0,1 мм.

При моделировании была выбрана рабочая жидкость – деионизированная вода, ее плотность составляет 997 кг/м^3 . Скорость потока диэлектрической жидкости равна 75 м/с (рис. 3), это граничное условие задается в зависимости от площади выпускных отверстий сопел, при этом направление стрелок имитирует направление потоков, они направлены навстречу друг другу, что обеспечивает промывку межэлектродного промежутка.

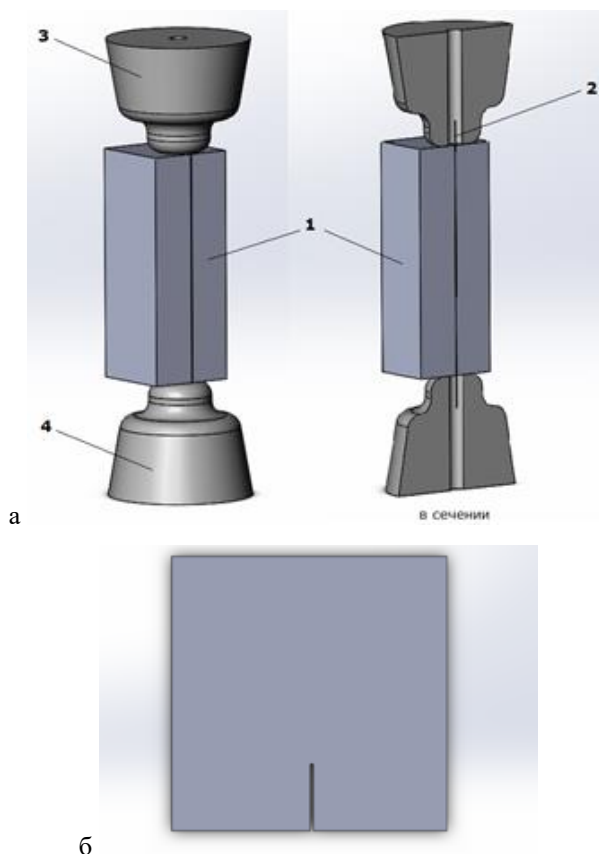


Рис. 1. Спроектированная 3D-модель для компьютерного моделирования (а) и вид заготовки сверху (б):
1 – заготовка; 2 – проволока; 3 – верхнее сопло; 4 – нижнее сопло

Fig. 1. Designed 3D model for computer simulation (a) and (б) top view of the workpiece:
1 is workpiece; 2 is wire; 3 is upper nozzle; 4 is lower nozzle



Рис. 2. Схематичное расположение сопел при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке:
а – в режиме «OPEN U»; б – в режиме «OPEN»; в – в режиме «CLOSE»

Fig. 2. Schematic diagram of nozzle disposition during WEDM: а is in the "OPEN U" mode;
б is in the "OPEN" mode; в is in the "CLOSE" mode

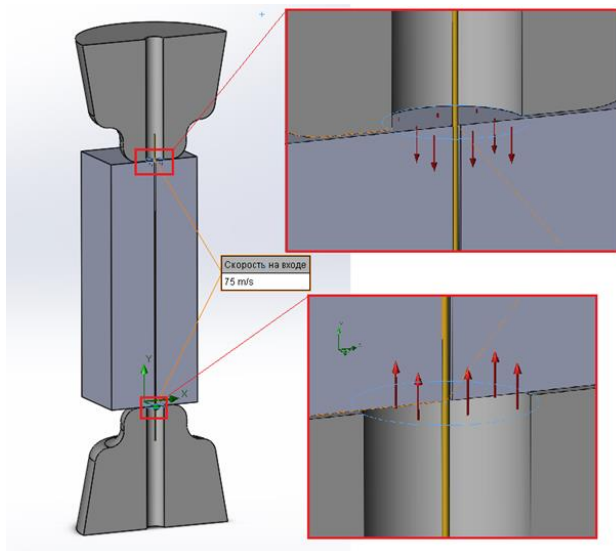


Рис. 3. Задание граничных условий (скорость потока диэлектрической жидкости равна 75 м/с)

Fig. 3. Specification of boundary conditions (the dielectric fluid flow velocity is 75 m/s)

Во время обработки проволочный электрод-инструмент проматывается через рабочую зону со скоростью 13 м/мин. Процесс обработки обеспечивается перемещением стола по траектории, заданной программой. Для упрощения модели было пренебрежено указанными условиями, так как они незначительно влияют на условия промывки в рабочей зоне.

2. Макетное моделирование потоков диэлектрической жидкости в рабочем промежутке.

Для макетного моделирования потоков диэлектрической жидкости при ПВЭЭО был изготовлен экспериментальный стенд (демонстрируется на рис. 4), состоящий из имитатора сопел электроэрозионного станка (рис. 4, а), макета заготовки (30×30×80 мм) из органического стекла с прорезью длиной 15 мм и шириной 0,35 мм в центре, которая имитирует рабочую зону при ПВЭЭО (рис. 4, б), емкости размерами 300×300×300 мм и толщиной стенки 4 мм, выполненной из оргстекла (рис. 4, г), а также силиконовых трубок для подачи жидкости (рис. 4, в, г) и гидростанции с насосом Grundfos (на рисунке не демонстрируется). Макет заготовки был изготовлен из оргстекла для реализации принципиальной возможности наблюдения потоков жидкости во время процесса прокачки. Регистрация потоков диэлектрической жидкости в макете заготовки выполнялась с использованием высокоскоростной камеры Microtron EoSens CL MC1363 (Германия) с частотой кадров 150 fps и разрешением 640×1024 пикселя на дюйм (см. рис. 4, г), при этом камера располагалась рядом с фотобоксом.

Имитатор сопел станка Sodick VZ 300L был изготовлен методом 3D-печати по технологии DLP (Digital Light Processing) на 3D-принтере Anycubic Photon Mono из фотополимерной смолы ELEGOO UV Standart Resin Red с учетом зазоров между соплами и обрабатываемой заготовкой в положении «CLOSE» (закрытая обработка – оба сопла находятся на расстоянии 0,1 мм от заготовки), диаметр сопел составлял 6 мм.

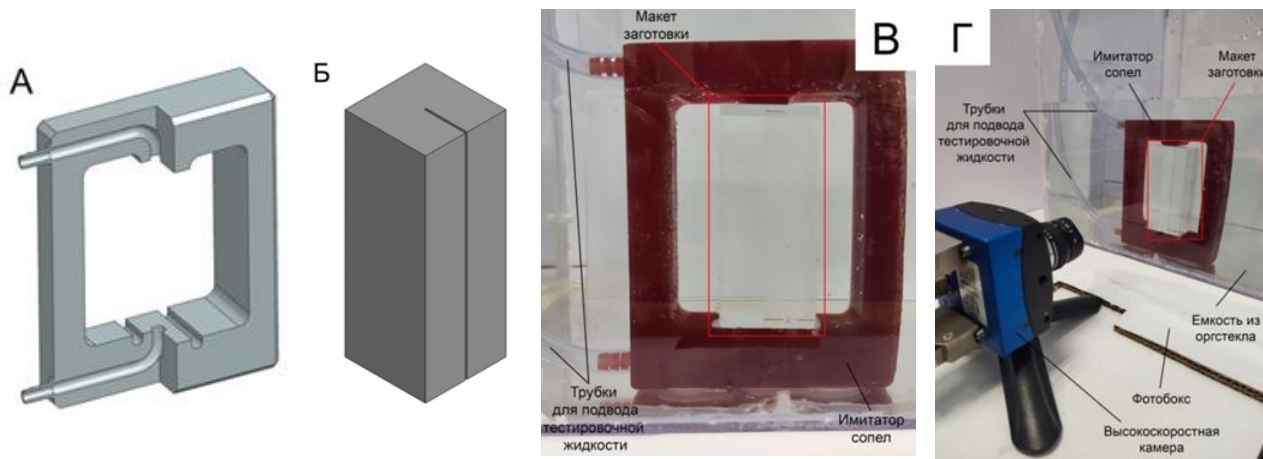


Рис. 4. Стенд для проведения высокоскоростной съемки потоков тестировочной жидкости при прокачке через рабочую зону макета заготовки: а – имитатор сопел станка Sodick VZ300L; б – 3D-модель макета заготовки; в – имитатор сопел с установленным макетом заготовки из оргстекла; г – общий вид стенда – взаимное расположение емкости из оргстекла, имитатора сопел, фотобокса, макета заготовки и высокоскоростной видеокамеры

Fig. 4. Experimental setup for high-speed imaging of the test fluid flow during flushing through the working zone of the workpiece mock-up: а is nozzle simulator of the Sodick VZ300L machine; б is 3D model of the workpiece mock-up; в is nozzle simulator with the installed acrylic workpiece mock-up; г is general view of the setup showing the relative positions of the acrylic tank, nozzle simulator, light box, workpiece mock-up, and high-speed video camera

Для видеорегистрации потоков жидкости в заготовке использовалась подкрашенная перманганатом калия с концентрацией 2 г/л дистиллированная вода (здесь и далее «тестирующая жидкость»), обеспечивающая возможность наглядной визуализации потоков на фоне оптически прозрачной деионизированной воды в условиях достаточного для регистрации высокоскоростной камерой контраста. Фиксация макета заготовки на имитаторе сопел, а также всей полученной конструкции на дне ванны из оргстекла выполнялась с использованием термоклея. Сборка ванны производилась с использованием разведенного в дихлорэтане небольшого количества полилактидной стружки (PLA – Polylactic Acid). После чего ванна заполнялась водой для проверки ее герметичности и последующего выполнения экспериментов.

Далее включалась запись высокоскоростной камеры, а затем кратковременно выполнялась подача тестирующей жидкости через силиконовые трубки, имитатор сопел, за счет чего тестирующая жидкость прокачивалась через рабочую зону макета заготовки с одновременной видеофиксацией процесса прокачки на высокоскоростную камеру.

3. Проверка полученных данных на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Sodick VZ300L.

В третьей части эксперимента полученные на стенде данные верифицировались на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Sodick VZ300L для сопоставления компьютерного и макетного моделирования с обработкой на промышленном оборудовании. В качестве заготовки (материал – сталь 5ХНМ) был использован параллелепипед (рис. 5) размерами 170×30×80 мм (Д×Ш×В), который устанавливался на столе станка и закреплялся стандартными прижимами. В параллелепипеде был изготовлен паз размерами 10×5×80 мм. Выпадающая часть, образованная при изготовлении паза проанализирована в пункте «Результаты макетного моделирования потоков диэлектрической жидкости при ПВЭЭО на стенде». Электродом-инструментом являлась латунная проволока диаметром 0,25 мм (Cu – 60%, Zn – 40%). Диэлектрической жидкостью являлась дистиллированная вода. В ходе эксперимента положение сопел находилось в позиции «CLOSE» – оба сопла находились на расстоянии 0,1 мм от заготовки. Схема положения сопел представлена на рис. 2, в.

Действующие значения тока и напряжения, рассчитанные программным обеспечением станка, в

Таблица. Режимы проволочно-вырезной электроэрозионной обработки на станке Sodick VZ 300L

Table. Wire-cut electrical discharge machining modes on the Sodick VZ 300L machine

ON	OFF	IP	MAO	SV	V	SF	WT	WS	WP	EPA
4,5*	7,5	15	243	21	8	3	12	13	55	0
008**	014	2215		+021,0	8,0	0030	120	130	055	

* В верхней части строки указано фактическое значение каждого параметра: длина импульса (ON), мкс; длина паузы между импульсами (OFF), мкс; максимальный ток (IP), А; критерии стабильности обработки (MAO) – в кодированных значениях; напряжение искрового зазора (SV), В; напряжение источника питания генератора (V), В; верхний предел скорости обработки (SF), мм/мин; усилие преднатяжения проволоки (WT), Н; скорость промотки проволоки (WS), м/мин; частота инвертора прокачки высокого давления (WP), Гц; EPA – упрощенная регулировка мощности.

** В нижней части строки указано зашифрованное кодовое значение со стойки ЧПУ-станка Sodick VZ300L.

процессе ПВЭЭО принудительно не изменялись и фиксировались с использованием встроенных вольтметра и амперметра. Среднее значение тока составило 8,8 А при изменении силы тока в диапазоне от 8,7 до 8,9 А, а среднее значение напряжения составило 24 В, при этом напряжение варьировалось в диапазоне от 22 до 26 В. Остальные параметры обработки приведены в таблице.



Рис. 5. Положение заготовки на столе станка

Fig. 5. Position of the workpiece on the machine table

Полученные результаты и их обсуждение

Общеизвестно, что ухудшение условий прокачки диэлектрической жидкости через МЭП приводит к снижению производительности ПВЭЭО, а также способствует повышению вероятности обрывов проволоки [19]. Другими словами, эффективность удаления шлама из межэлектродного промежутка потоками диэлектрической жидкости оказывает непосредственное влияние на стабильность процесса ПВЭЭО. Однако некоторые исследования зачастую демонстрируют противоречивые результаты [18, 21-22]. Поэтому для получения достоверных результатов с высокой степенью сходимости при моделировании были воспроизведены параметры, технологические режимы и характеристики промышленного оборудования.

1. Результаты компьютерного моделирования потоков диэлектрической жидкости при ПВЭЭО.

Результаты 3D-моделирования представлены на рис. 6. Направление потоков диэлектрической жидкости указаны синими стрелками. Можно выделить три основных направления распределения потоков. Часть потоков из нижнего и верхнего сопел, указанные на рис. 6 цифрами 1 и 2, разбиваются о нижнюю и верхнюю поверхности заготовки, так как диаметр сопел (6 мм) значительно превышает размер межэлектродного промежутка (0,05 мм). Этот фактор не позволяет всему объему жидкости проникнуть в рабочую зону. Однако жидкость, попавшая в межэлектродный промежуток, продолжает движение по нему, тем самым обеспечивая промывку рабочей зоны. Движение диэлектрической жидкости вдоль межэлектродного промежутка продолжается до момента столкновения двух потоков, направленных из нижнего и верхнего сопел. По результатам моделирования можно заключить, что столкновение происходит в середине заготовки, так как нижнее и верхнее сопла равноудалены от заготовки и скорость потоков, направленных из них, одинакова.

Часть потока, обозначенная цифрой 3 на рис. 6, выходит из рабочей зоны в направлении, противоположном направлению обработки.

Как известно, при столкновении двух ламинарных потоков возникает интенсивное вихреобразование и турбулентность, поскольку потоки пытаются выров-

нять свои скорости. Поэтому, по нашему предположению, в зоне столкновения потоков, обозначенной красным квадратом на рис. 6, может наблюдаться рециркуляция потоков в связи с резким изменением направления движения жидкости. «Рециркуляционная зона» увеличивает эффективность эвакуации частиц из зоны столкновения потоков, однако может способствовать образованию «эффективных частиц», потенциально приводящих к короткому замыканию [22].

2. Результаты макетного моделирования потоков диэлектрической жидкости при ПВЭЭО на стенде.

Для более детального анализа особенностей распространения тестировочной жидкости в межэлектродном промежутке макета-заготовки в различные моменты времени ($t = 19,034 - 19,397$ с) с видеозаписи были сделаны стоп-кадры, наглядно отражающие изменение характера движения потоков тестировочной жидкости (рис. 7). Как видно из рис. 7, все значимые события протекают в течение 0,363 с. Дальнейшее наблюдение потоков тестировочной жидкости становится невозможным в связи с полным заполнением ею межэлектродного промежутка макета-заготовки. Также необходимо пояснить начало появления значимых событий с 19-й секунды эксперимента. Данный временной интервал был необходим для подготовительных работ перед запуском насоса гидростанции, в то время как видеозапись уже была включена.

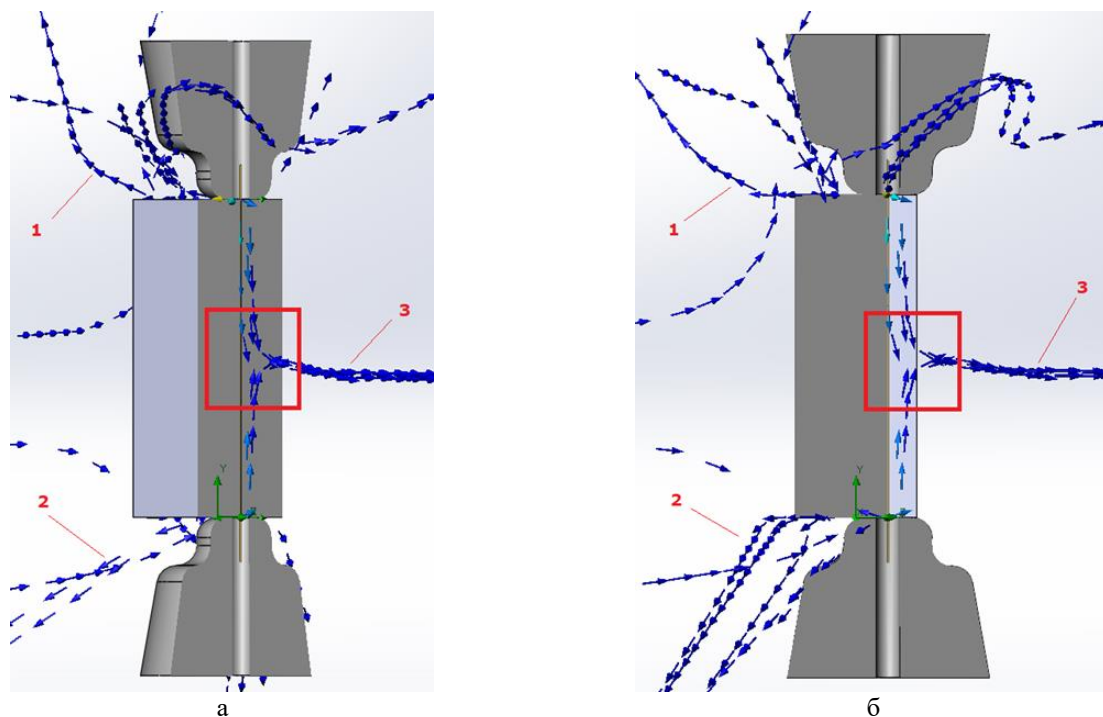


Рис. 6. Результаты 3D-моделирования потоков диэлектрической жидкости при ПВЭЭО с помощью ПО SolidWorks FlowSimulation: а – поперечное сечение; б – продольное сечение

Fig. 6. Results of 3D modeling of dielectric fluid flows during WEDM using SolidWorks FlowSimulation software: а is cross section; б is longitudinal section

При анализе первого стоп-кадра с высокоскоростной камеры (рис. 7, а) наблюдаются два потока тестировочной жидкости из верхнего и нижнего сопел (показаны белыми стрелками). При этом более интенсивный поток тестировочной жидкости виден с верхнего сопла. Это можно объяснить сонаправленностью векторов силы притяжения и направления распространения потока из верхнего сопла. Через 0,028 с потоки выравниваются (рис. 7, б) и выглядят практически одинаковыми, встречаясь ниже середины длины заготовки на 5% от всей длины заготовки, о чем свидетельствует более насыщенный темно-фиолетовый цвет. Однако стоит отметить, что в связи с насыщенностью цвета тестировочной жидкости тяжело определить точное место столкновения потоков. Рис. 7, в-д демонстрирует дальнейшую интенсификацию процесса прокачки. Это хорошо прослеживается по усилению окраса центральной части межэлектродного промежутка. При этом потоки при столкновении в центре распространяются вправо – в единственно возможное направление, в область открытого реза. Распространение влево невозможно из-за конфигурации макета-заготовки (см. рис. 1, б). В этом можно убедиться, наблюдая четкую границу в

левой части макета-заготовки на каждом из снимков, представленных на рис. 7.

Рис. 7, е характеризуется более интенсивным заполнением межэлектродного промежутка тестировочной жидкостью, так как потоки с верхнего и нижнего сопла перемешиваются и двигаются. Мы предполагаем, что таким образом формируется «поток разворота», в котором сталкиваются частицы шлама при ПВЭО, формируя «мостик сварки». Однако здесь же можно наблюдать участки (отмечены белыми стрелками), где циркуляция тестировочной жидкости все еще отсутствует. Начиная с момента времени $t = 19,205$ с (см. рис. 7, е), на наш взгляд, образуются наиболее опасные условия прокачки с точки зрения образования застойной зоны и формирования «мостика сварки», поскольку он возникает непосредственно в ходе электроэрозионной обработки, при этом эффективное удаление шлама на всей длине межэлектродного промежутка не реализуется. Условия прокачки в момент времени $t = 19,205$ с и аналогичные ему моменты способствуют быстрому росту концентрации частиц шлама в межэлектродном промежутке и, как следствие, приводят к увеличению вероятности образования «мостика сварки» с последующим КЗ и обрывом проволоки.

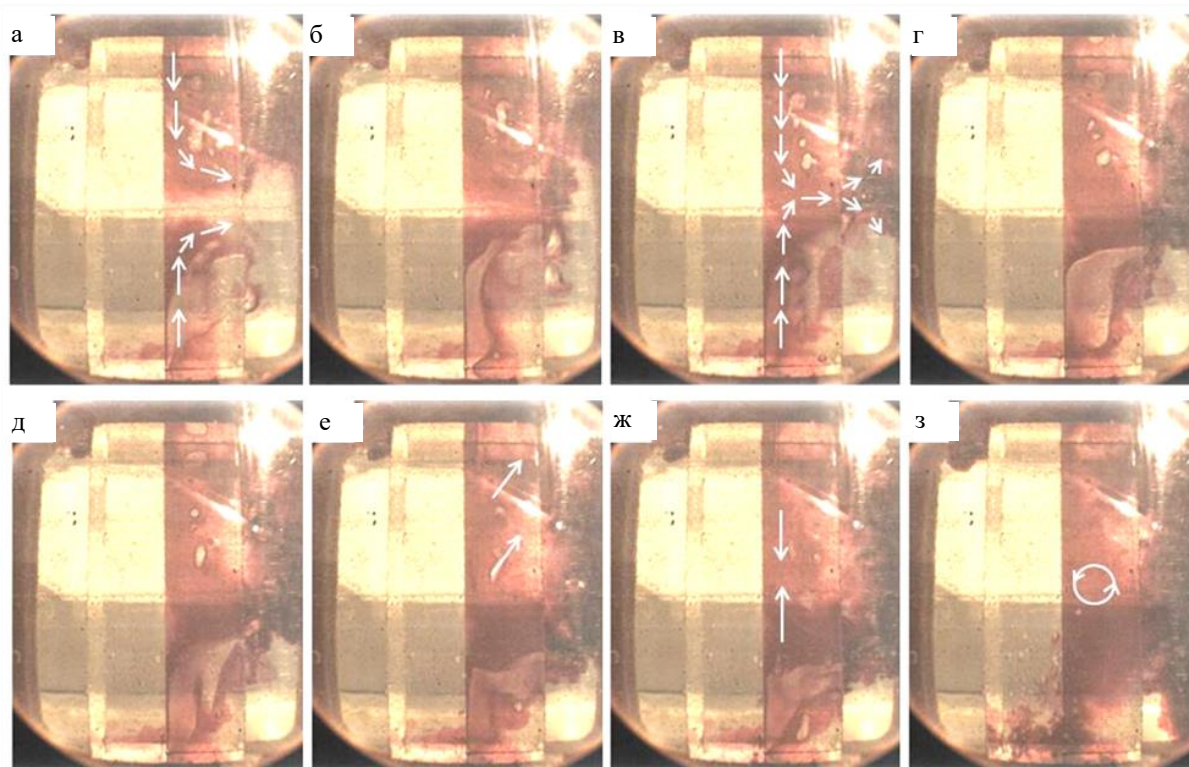


Рис. 7. Номера стоп-кадров и соответствующее им время на видеозаписи прокачки диэлектрической жидкости в различные моменты времени: а – 2779 (19,034 с); б – 2783 (19,062 с); в – 2791 (19,116 с); г – 2796 (19,150 с); д – 2798 (19,164 с); е – 2804 (19,205 с); ж – 2807 (19,226 с); з – 2832 (19,397 с)

Fig. 7. Frame numbers and corresponding timestamps on the video recording of dielectric fluid flushing at different moments in time: a is frame 2779 (19.034 s); б is frame 2783 (19.062 s); в is frame 2791 (19.116 s); г is frame 2796 (19.150 s); д is frame 2798 (19.164 s); е is frame 2804 (19.205 s); ж is frame 2807 (19.226 s); з is frame 2832 (19.397 s)

На **рис. 7, ж** можно наблюдать межэлектродный промежуток, практически полностью окрашенный тестировочной жидкостью. Наблюдение динамики потоков становится затруднительным. Важно отметить наличие центра столкновения потоков, он представлен одним из самых темных участков фотографии (указан белыми стрелками).

Дальнейшие снимки процесса прокатки, где $t = 19,397$ с (**рис. 7, з**), не представляют интереса, так как заполнение МЭП тестировочной жидкостью полностью окрасило межэлектродный промежуток и делает наблюдение практически невозможным. Стоит отметить, что вихревые потоки (отмечены белыми стрелками) создают дополнительное сопротивление движению основного потока, препятствуя более эффективно удалению частиц шлама.

3. *Результаты исследования прокатки диэлектрической жидкости на проволочно-вырезном электроэрозионном станке Sodick VZ300L.*

В ходе эксперимента был зафиксирован один обрыв проволоки, несмотря на использование заводских параметров реза, рассчитанных программным обеспечением станка, которые считаются оптимальными и должны предотвращать обрывы проволоки. Этот факт еще раз подчеркивает необходимость исследований, направленных на минимизацию количества обрывов проволочного электрода-инструмента.

Полученный на указанных в **таблице** режимах образец (выпадающая часть) представлен на **рис. 8**.

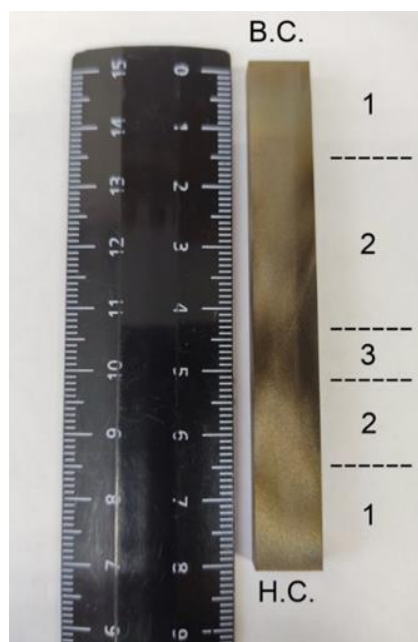


Рис. 8. Выпадающая часть образца стали 5XhNM, обработанного в режиме «CLOSE»: B.C. – положение верхнего сопла, H.C. – положение нижнего сопла

Fig. 8. Detached part of the 5KhNM steel sample machined in the “CLOSE” mode: B.C. is position of the upper nozzle; H.C. is position of the lower nozzle

На образце четко визуализируются три зоны: зоны 1, зоны 2, зона 3. Как видно, зоны 1 протяженностью 15 мм находятся в верхней и нижней частях образца. Они имеют самый светлый оттенок, что свидетельствует о минимальном количестве налипшего на них шлама, следовательно, уровень прокатки диэлектрической жидкости и вымывания шлама в этих областях были наилучшими. Это объясняется тем, что верхнее и нижнее сопла во время эксперимента были приближены к детали на 0,1 мм и поток деионизированной воды попадал непосредственно в межэлектродный зазор, интенсивно вымывая шлам. Столкновение частиц шлама и возможность образования «мостика сварки» в этих зонах маловероятны.

Зоны 2 следуют непосредственно за зонами 1 и также расположены в верхней и нижней частях образца. Очевидно, что из-за падения давления уровень прокатки в зонах 2 менее интенсивный, чем в зонах 1, следовательно, налипшего шлама в этих зонах больше (проследивается по более темному оттенку). Также следует отметить, что зона 2 для верхнего сопла более протяжённая, чем для нижнего.

После зон 2 на образце выделяется зона 3, обладающая наименьшей протяженностью. Необходимо отметить, что центр зоны 3 располагается не на полувысоте детали, а немного ниже ее, примерно на 5% от всей длины заготовки, ближе к нижнему соплу. Это также можно объяснить действием силы притяжения. Цвет зоны 3 – черный, что объясняется большим количеством налипшего шлама. Это свидетельствует о наименьшем уровне прокатки диэлектрической жидкости и, как следствие, наихудшем вымывании шлама и наличии застойной зоны с потоками разворота и столкновениями частиц шлама, приводящих к формированию «мостика сварки», инициирующему КЗ и обрыв проволоки.

В центре зоны 3 наблюдается участок более светлого оттенка по сравнению с остальной частью данной зоны. Как показывают результаты моделирования условий прокатки, описанные выше в пункте 1, участку светлого оттенка в зоне 3 соответствует область столкновения верхнего и нижнего потоков диэлектрической жидкости. Уровень вымывания шлама в этой области, вероятно, более высокий по сравнению с остальной частью зоны 3, поэтому его налипание происходит менее интенсивно.

4. *Обобщение данных компьютерного моделирования, макетного моделирования на стенде и промышленного реза на станке.*

Для комплексной оценки проведенных исследований необходимо провести сравнение результатов, описанных в пунктах 1-3.

При сопоставлении результатов численного моделирования, выполненного с применением методов вычислительной гидродинамики, с экспериментальными данными, полученными на промышленном электроэрозионном станке, выявлено частичное несо-

ответствие моделей реальным процессам в части расположения места столкновения потоков. В компьютерном моделировании место столкновения соответствует геометрическому центру высоты заготовки, однако по результатам макетного моделирования и реального реза на оборудовании наблюдается смещение места столкновения потоков на 5% ниже геометрического центра заготовки. Предположительно расхождения могут обуславливаться следующими факторами. Во-первых, наличием выраженного уменьшения потоков – попадание струи рабочей жидкости, выходящей из сопла диаметром 6 мм, в узкий межэлектродный промежуток (0,05 мм). Это может быть связано с формированием нелинейных эффектов вторичных течений, вызванных уменьшением потока (соотношение диаметра струи к ширине зазора менее 0,01). Во-вторых, гравитационным воздействием на диэлектрическую жидкость: верхний поток под собственным весом отклоняется вниз, изменяя точку его встречи с противоположным потоком. Для повышения результатов компьютерного моделирования требуются дальнейшие исследования, направленные на уточнение математических моделей течений в условиях узких прорезей и щелей с учетом микрогеометрии поверхности, по которой распространяется течение, и гравитационных сил.

Также полученные в ходе экспериментальных исследований данные (пункты 1-3) целесообразно сопоставить с данными компьютерного моделирования [18] в программном продукте STAR-CCM+, который позволяет рассчитывать данный вид модели прокатки посредством вычислительной гидродинамики. Компьютерная модель показала неустойчивость потока прокачиваемой жидкости из-за сильной турбулентности при длине прорези менее 2 мм и образовании за проволокой, в средней части пропила, застойной зоны. Здесь же японские исследователи упоминают, что при длине пропила более 3 мм сопла диаметром 6 мм полностью находятся: нижнее – под деталью, верхнее – над деталью, и большая часть потока из сопел поступает в обработанный пропил, делая поле потока устойчивым. При этом стабильность прокатки должна быть высокой, а количество обрывов проволоки минимальным. Однако авторами данного исследования при макетном моделировании прокатки на стенде, даже при длине прорези 15 мм, не было получено стабильного потока прокатки (см. пункт 2). Вероятно, данное противоречие связано с тем, что в [18, рис. 3] компьютерное моделирование не учитывает микропульсации гидравлического потока, присутствующие в реальных гидравлических системах.

Также необходимо сопоставить данные **рис. 8**, полученного при промышленном резе, и данные анализа отслеживания частиц шлама в зазоре, полученные с помощью модели Лагранжа [18, рис. 4]. Модель учитывает движение твердофазного шлама в потоке деионизированной воды. При толщине детали 10 мм А. Окада и др. [18] разделили деталь условно на 10

слоев, каждый высотой 1 мм, и в каждом слое расположили 5 частиц шлама в межэлектродном зазоре – между проволокой и обрабатываемой заготовкой. Таким образом, в модели каждую секунду в межэлектродном зазоре генерировалось 50 частиц. Результаты расчёта показали, что при прокатке в середине прорези за проволокой образуется «застойная зона» и некоторые частицы шлама могут задерживаться в ней в течение длительного периода времени, вплоть до 50 мкс. Этот факт удовлетворительно коррелирует с нашей гипотезой о формировании «мостика сварки», когда одна частица сталкивается с дугой, образуя агломерат, способный перекрыть межэлектродный промежуток и вызвать КЗ с дальнейшим обрывом проволоки. Однако в модели есть и противоречащие **рис. 8** данные. В частности, не объясняется отсутствие скопления частиц шлама непосредственно в месте столкновения потоков, хотя, по нашим данным (см. **рис. 8**, зона 3), в нем должно присутствовать значительное количество шлама (см. пункт 3). Кроме того, **рис. 8** свидетельствует об ухудшающемся вымывании шлама в зоне 3, которое значительно хуже, чем в зоне 2, а расчетная модель [18], напротив, показывает наибольшее скопление шлама в зонах 2 и интенсивное удаление в зоне 3.

Проведенные исследования с использованием компьютерного, макетного и промышленного моделирования позволили установить, что место столкновения потоков при проволочно-вырезной электроэрозивной обработке в режиме «CLOSE» находится на 5% ниже середины геометрического центра заготовки – наиболее вероятном месте образования эффективных частиц и «мостика сварки». Полученные данные могут быть использованы для дальнейшей оптимизации технологии ПВЭЭО с целью снижения обрывов проволоки и повышения производительности обработки.

Таким образом, экспериментальные данные (см. пункт 3) демонстрируют удовлетворительную сходимость с результатами моделирования (см. пункты 1 и 2), подтверждая адекватность использованного подхода.

Заключение

На основании проведенных исследований по компьютерному и макетному моделированию потоков диэлектрической жидкости на стенде с последующей верификацией данных на промышленном оборудовании для проволочно-вырезной электроэрозивной обработки можно сформулировать следующие выводы:

1. Сопоставляя данные макетного моделирования и реального реза, можно отметить, что область фактического столкновения потоков прокачиваемого диэлектрика находится приблизительно на 2-5% ниже геометрической полувысоты детали в режиме «CLOSE», что, вероятно, связано с сонаправленностью силы гравитационного притяжения и направления распространения потока диэлектрика из верхнего сопла.

2. Наиболее вероятной областью обрывов проволоки в процессе ПВЭЭО в режиме «CLOSE» является полувысота детали – ближе к нижнему соплу. Это обусловлено снижением скорости прокачки диэлектрической жидкости в области столкновения потоков и формированием в ней застойной зоны с образованием мостиков сварки из частичек шлама, формируемых в ходе оплавления заготовки и проволочного электрода-инструмента.

3. Анализ показал, что компьютерное моделирование демонстрирует ограниченную точность при описании потоков в реальных условиях обработки, особенно в областях с экстремально малыми зазорами. Перспективным направлением совершенствования моделей является детальное изучение гидродинамики в стесненных межэлектродных промежутках.

На основании полученных выводов интерес представляет моделирование условий удаления частиц шлама из межэлектродного промежутка при различных режимах промывки (отключение одного из сопел, увеличение/уменьшение давления промывки для уменьшения возможности образования «рециркуляционной зоны»). В будущем планируется проведение таких исследований по влиянию режимов промывки рабочей жидкости на обрыв проволоки при ПВЭЭО.

Список источников

1. Yan M. T., Huang P. H. Accuracy improvement of wire-EDM by real-time wire tension control // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004, vol. 44, no. 7-8, pp. 807-814.
2. Kinoshita N., Fukui M., Gamo G. Control of wire-EDM preventing electrode from breaking // *CIRP Annals*. 1982, vol. 31, no. 1, pp. 111-114. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63279-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63279-X)
3. Wang W. M., Rajurkar K. P. Monitoring sparking frequency and predicting wire breakage in WEDM // *Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers*. Publ by ASME, 1992. С. 49-64.
4. Tosun N., Cogun C. An investigation on wire wear in WEDM // *Journal of materials processing technology*. 2003, vol. 134, no. 3, pp. 273-278. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01045-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01045-2)
5. Abhilash P. M., Chakradhar D. Failure detection and control for wire EDM process using multiple sensors // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021, vol. 33, pp. 315-326.
6. Исследование причин обрыва электрода при проволочно-вырезной электроэрозионной обработке паке-тированных заготовок / Шлыков Е. С. и др. // *Современные проблемы науки и образования*. 2013. № 5. С. 76-76.
7. Investigation of the impact of Rehbinder effect, electrical erosion and wire tension on wire breakages during WEDM / Fedorov A.A. et al. // *Journal of Materials Processing Technology*. 2018, vol. 256, pp. 131-144. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.02.002>
8. Pramanik A., Basak A. K. Sustainability in wire electrical discharge machining of titanium alloy: understanding wire rupture // *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 198, pp. 472-479. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.045>.
9. A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718 / Tanjilul M. et al. // *Journal of Materials Processing Technology*. 2018, vol. 255, pp. 263-274. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.12.016>
10. Study on the Movement Rule of Discharge Products in Large Area Titanium Alloy Machining by Electrical Discharge Machining / Dong L. I. et al. // *Journal of Mechanical Engineering*. 2017, vol. 53, no. 21, pp. 200-208. <https://doi.org/10.3901/JME.2017.21.200>
11. Bommeli B., Frei C., Ratajski A. On the influence of mechanical perturbation on the breakdown of a liquid dielectric // *Journal of electrostatics*. 1979, vol. 7, pp. 123-144. [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(79\)90067-6](https://doi.org/10.1016/0304-3886(79)90067-6)
12. Kumar R., Singh I. Productivity improvement of micro EDM process by improvised tool // *Precision Engineering*. 2018, vol. 51, pp. 529–535.
13. Yanatori K., Kunieda M. Study on debris movement in EDM gap // *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers*. 1995, vol. 29, no. 61, pp. 19-27.
14. Li Z., Bai J. Influence of alternating side gap on micro-hole machining performances in micro-EDM // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, vol. 94, no. 1, pp. 979-989. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0959-9>
15. Schumacher B. M. About the role of debris in the gap during electrical discharge machining // *CIRP annals*. 1990, vol. 39, no. 1, pp. 197-199. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61034-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61034-8)
16. Suda T. Movement of conductive particles in EDM gap // *JSEME*. 1974, vol. 7, no. 14, pp. 19-28.
17. Yanatori K., Kunieda M. Study on debris movement in EDM gap // *Journal of The Japan Society of Electrical Machining Engineers*. 1995, vol. 29, no. 61, pp. 19-27. https://doi.org/10.2526/jseme.29.61_19
18. Computational fluid dynamics analysis of working fluid flow and debris movement in wire EDMed kerf / Okada A. et al. // *CIRP annals*. 2009, vol. 58, no. 1, pp. 209-212. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.003>
19. Шлыков Е. С., Абляз Т. Р., Муратов К. Р. Теоретическое моделирование процесса промывки межэлектродного пространства при копировально-прошивной электроэрозионной обработке изделий, выполненных из полимерных композитных материалов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2022. Т. 24, № 2. С. 25–38. <http://dx.doi.org/10.17212/1994-6309-2022-24.2-25-38>
20. Wire breakage and deflection caused by nozzle jet flushing in wire EDM / Okada A. et al. // *CIRP annals*. 2015, vol. 64, no. 1, pp. 233-236. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.034>
21. Optimization of nozzle flushing method for smooth debris exclusion in wire EDM / Fujimoto T. et al. // *Key Engineering Materials*. 2012, vol. 516, pp. 73-78. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.516.73>
22. Investigating wire breakage during EDM with fractographic analysis // *Journal of Physics: Conference Series / Bredgauer I. O. et al. // IOP Publishing*. 2021, vol. 1791, no. 1, pp. 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1791/1/012005>

References

1. Yan M.T., Huang P.H. Accuracy improvement of wire-EDM by real-time wire tension control. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004;44(7-8):807-814.
2. Kinoshita N., Fukui M., Gamo G. Control of wire-EDM preventing electrode from breaking. *CIRP Annals*. 1982;31(1):111-114. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63279-X
3. Wang W.M., Rajurkar K.P. Monitoring sparking frequency and predicting wire breakage in WEDM. *Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers*. New York: ASME, 1992, pp. 49-64.
4. Tosun N., Cogun C. An investigation on wire wear in WEDM. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;134(3):273-278. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)01045-2
5. Abhilash P.M., Chakradhar D. Failure detection and control for wire EDM process using multiple sensors. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021;33:315-326.
6. Shlykov E.S. et al. Study of the causes of electrode breakage during wire electrical discharge machining of stacked blanks. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2013;(5):76. (In Russ.)
7. Fedorov A.A. et al. Investigation of the impact of Rehbinder effect, electrical erosion and wire tension on wire breakages during WEDM. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;256:131-144. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.002
8. Pramanik A., Basak A.K. Sustainability in wire electrical discharge machining of titanium alloy: understanding wire rupture. *Journal of Cleaner Production*. 2018;198:472-479. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.045
9. Tanjilul M., [et al.]. A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;255:263-274. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.12.016
10. Dong L.L., [et al.]. Study on the Movement Rule of Discharge Products in Large Area Titanium Alloy Machining by Electrical Discharge Machining. *Journal of Mechanical Engineering*. 2017;53(21):200-208. DOI: 10.3901/JME.2017.21.200
11. Bommeli B., Frei C., Ratajski A. On the influence of mechanical perturbation on the breakdown of a liquid dielectric. *Journal of Electrostatics*. 1979;7:123-144.
12. Kumar R., Singh I. Productivity improvement of micro EDM process by improvised tool. *Precision Engineering*. 2018;51:529-535.
13. Kunieda M., Yanatori K. Study on debris movement in EDM gap. *International Journal of Electrical Machining (IJEM)*. 1995;29(61):19-27.
14. Li Z., Bai J. Influence of alternating side gap on micro-hole machining performances in micro-EDM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;94(1):979-989. DOI: 10.1007/s00170-017-0959-9
15. Schumacher B.M. About the role of debris in the gap during electrical discharge machining. *CIRP Annals*. 1990;39(1):197-199. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61034-8
16. Suda T. Movement of conductive particles in EDM gap. *Journal of the Japan Society of Electrical Machining Engineers (JSEME)*. 1974;7(14):19-28.
17. Yanatori K., Kunieda M. Study on debris movement in EDM gap. *Journal of the Japan Society of Electrical Machining Engineers*. 1995;29(61):19-27. DOI: 10.2526/jseme.29.61_19
18. Okada A. et al. Computational fluid dynamics analysis of working fluid flow and debris movement in wire EDMed kerf. *CIRP Annals*. 2009;58(1):209-212. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.003
19. Shlykov E.S., Ablyaz T.R., Muratov K.R. Theoretical modeling of the process of interelectrode gap flushing during die-sinking electroerosion machining of products made of polymer composite materials. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metalworking (technology, equipment, tools)]. 2022;24(2):25-38. (In Russ.) DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.2-25-38
20. Okada A. et al. Wire breakage and deflection caused by nozzle jet flushing in wire EDM. *CIRP Annals*. 2015;64(1):233-236. DOI: 10.1016/j.cirp.2015.04.034
21. Fujimoto T. et al. Optimization of nozzle flushing method for smooth debris exclusion in wire EDM. *Key Engineering Materials*. 2012;516:73-78. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.516.73
22. Bredgauer I.O. et al. Investigating wire breakage during EDM with fractographic analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing. 2021;1791(1):012005. DOI: 10.1088/1742-6596/1791/1/012005

Поступила 26.11.2025; принята к публикации 27.03.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 26/11/2025; revised 27/03/2026; published 30/06/2026

Федоров Алексей Аркадьевич – кандидат технических наук,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: aafedorov@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-6681-087X

Бредгауэр Юлия Олеговна – старший преподаватель,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: jobredgauer@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-0267-8179

Полонянкин Денис Андреевич – кандидат педагогических наук,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: dapolonyankin@omgtu.ru. ORCID 0000-0001-6799-3105

Гаранин Денис Владимирович – старший преподаватель,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: dvgaranin@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-7920-5783

Бобков Николай Владимирович – старший преподаватель,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: nvbobkov@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-5831-282X

Осташ Софья Викторовна – студент,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: ostash.sofiya@mail.ru . ORCID 0009-0004-5644-6885

Alexey A. Fedorov – PhD (Eng.),
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: aafedorov@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-6681-087X

Iulia O. Bredgauer – Senior Lecturer,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: jobredgauer@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-0267-8179

Denis A. Polonyankin – PhD (Eng.),
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: dapolonyankin@omgtu.ru. ORCID 0000-0001-6799-3105

Denis V. Garanin – Senior Lecturer,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
Email: dvgaranin@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-7920-5783

Nikolay V. Bobkov – Senior Lecturer,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
Email: nvbobkov@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-5831-282X

Sophia V. Ostash – Student,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia
Email: ostash.sofiya@mail.ru. ORCID 0009-0004-5644-6885



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.5, 005.6, 621.762.06, 621.763
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-115-126

К ВОПРОСУ О КАЧЕСТВЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

Михеева Н.В.¹, Тимофеев А.Н.², Логачёва А.И.², Басков Ф.А.², Воейко О.А.¹

¹ «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова» – филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», Королёв, Россия

²АО «Композит», Королёв, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Внедрение аддитивных технологий в производство требует обеспечения высокой производительности при стабильно высоком качестве продукции. Прямое лазерное выращивание (ПЛВ) представляет собой перспективную технологию для изготовления крупногабаритных деталей сложной геометрии из порошковых материалов в ракетно-космической отрасли, что позволяет отказаться от традиционных подходов. Данная технология относится к классу аддитивных методов 3D-печати металлических изделий с прямым подводом энергии и материала. Однако процесс ПЛВ характеризуется высокой чувствительностью к технологическим параметрам, что может приводить к разбросу физико-механических свойств и образованию дефектов, таких как поры. Существующие методы постпроцессного контроля готовых изделий не позволяют прогнозировать и предотвращать возникновение дефектов, а также зачастую экономически неэффективны. **Цель работы.** Проведение анализа причинно-следственных связей, обуславливающих возникновение пор, для обеспечения гарантированного качества крупногабаритных изделий, изготавливаемых методом ПЛВ. **Используемые методы.** Комплексное управление качеством деталей, основанное на системном и процессном подходах с применением инструментов качества – диаграммы Исикава, диаграммы Ганта, экспертного метода МСА, а также метрологического обеспечения производства. **Новизна.** Применение комплексного подхода управления качеством на всех этапах жизненного цикла производства крупногабаритных изделий (диаметром более 2000 мм и высотой более 1500 мм), направленного на обеспечение требуемого качества и установление оптимальных технологических параметров для метода ПЛВ. **Результат.** В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния технологических параметров на свойства изделий из алюминиевого порошка марки РС-320. На основе проведенных исследований по рекомендованным технологическим режимам методом прямого лазерного выращивания была изготовлена обечайка корпуса летательного аппарата в виде тонкостенного полого цилиндра «с ребрами жесткости вафельного типа». **Практическая значимость.** ПЛВ расширяет технологические и конструкторские возможности за счет значительного повышения производительности (приблизительно в 10 раз), возможности изготовления сложнопрофильных крупногабаритных конструкций, автоматизации процесса, улучшения эксплуатационных свойств готовой продукции и снижения массы при сохранении прочностных характеристик. Внедрение сквозного контроля на всех этапах производства позволяет гарантировать стабильное качество выпускаемой продукции.

Ключевые слова: прямое лазерное выращивание (ПЛВ), управление качеством крупногабаритных металлических изделий, диаграмма Исикавы, диаграмма Ганта, метод МСА

© Михеева Н.В., Тимофеев А.Н., Логачёва А.И., Басков Ф.А., Воейко О.А., 2026

Для цитирования

К вопросу о качестве крупногабаритных сложнопрофильных деталей из алюминиевых сплавов, полученных методом прямого лазерного выращивания / Михеева Н.В., Тимофеев А.Н., Логачёва А.И., Басков Ф.А., Воейко О.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 115-126. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-115-126>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ON THE QUALITY OF LARGE-SCALE COMPLEX-SHAPED ALUMINUM ALLOY COMPONENTS MANUFACTURED BY DIRECT LASER DEPOSITION

Mikheeva N.V.¹, Timofeev A.N.², Logacheva A.I.², Baskov F.A.², Voeyko O.A.¹

¹ Leonov Moscow Region University of Technology, branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Geodesy and Cartography, Korolev, Russia

² JSC Compozit, Korolev, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The implementation of additive manufacturing technologies in industrial production requires ensuring high productivity while maintaining consistently high product quality. Direct Laser Deposition (DLD) is a promising technology for manufacturing large-scale components with complex geometries from powder materials in the aerospace industry, enabling the replacement of conventional manufacturing approaches. This technology belongs to the class of metal additive manufacturing methods based on directed energy and material deposition. However, the DLD process is highly sensitive to technological parameters, which may lead to variations in physical and mechanical properties and the formation of defects such as porosity. Existing post-process inspection methods for finished products do not allow prediction and prevention of defect formation and are often economically inefficient. **Objectives.** The research is aimed at analyzing the cause-and-effect relationships leading to pore formation in order to ensure the guaranteed quality of large-scale products manufactured by Direct Laser Deposition. **Methods Applied.** It is the integrated quality management of components based on system and process approaches using quality management tools, including the Ishikawa diagram, Gantt chart, Measurement System Analysis (MSA), and metrological support of production processes. **Originality.** It lies in the application of an integrated quality management approach throughout all stages of the life cycle of large-scale products (with diameters exceeding 2000 mm and heights exceeding 1500 mm), aimed at ensuring the required quality and determining optimal technological parameters for the DLD process. **Result.** The paper presents the results of an experimental study on the influence of process parameters on the properties of products manufactured from RS-320 aluminum powder. Based on the conducted research and recommended processing conditions, an aircraft structural shell in the form of a thin-walled hollow cylinder with waffle-type stiffening ribs was fabricated using the Direct Laser Deposition process. **Practical Relevance.** DLD expands technological and design capabilities through a significant increase in productivity (approximately tenfold), the ability to manufacture large-scale components with complex geometries, process automation, improved service properties of finished products, and weight reduction while maintaining strength characteristics. The implementation of comprehensive quality control at all stages of production ensures stable and guaranteed product quality.

Keywords: Direct Laser Deposition (DLD), quality management of large-scale metal products, Ishikawa diagram, Gantt chart, Measurement System Analysis (MSA)

For citation

Mikheeva N.V., Timofeev A.N., Logacheva A.I., Baskov F.A., Voeyko O.A. On the Quality of Large-Scale Complex-Shaped Aluminum Alloy Components Manufactured by Direct Laser Deposition. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 115-126. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-115-126>

Введение

Одной из главных задач современного производства летательных аппаратов (ЛА) является создание новых технологических процессов изготовления крупногабаритных сложнопрофильных деталей (далее – деталей), обеспечивающих повышение надежности и экономичности изделий при снижении их массы [1]. Снижение массы летательных аппаратов достигается за счет использования сложных геометрий деталей, производство которых часто невозможно с применением традиционных методов обработки [2]. В этой связи для ракетно-космической отрасли становится критически важным переход на инновационные технологии [3], обусловленный сменой тех-

нологического уклада и глобальной трансформацией производства в сторону комплексной автоматизации и цифровизации [4].

Особенно актуальна проблема получения всевозможных корпусных деталей ЛА, изготавливаемых из листовых материалов (баки, обечайки, конуса, детали сферической, параболической и оживальной формы и др.), диаметром и высотой свыше 1000 мм. По условиям эксплуатации они, как правило, подвергаются всевозможным нагрузкам, особенно при полете ЛА в сложных условиях окружающей среды, в том числе в условиях открытого космоса [1].

Особый интерес с точки зрения совершенствования технологий представляют обечайки корпусов ЛА в виде тонкостенных полых цилиндров с вафельным

фоном на внутренней либо наружной поверхности. Наличие вафельного фона вызвано необходимостью снижения массы изделия, что является основным требованием в конструкции летательного аппарата с обеспечением достаточной жесткости конструкции корпуса ЛА [5]. На **рис. 1** показаны основные способы формирования вафельных конструкций.

Известно, что электрофизические методы трудоемки и энергоемки. Электрохимическое фрезерование используется для формирования неглубокого фона, доработок обечаек по массе либо по толщине оставшегося полотна. При сворачивании возникают дефекты из-за большой разности напряжений сжатия и растяжения по ребрам и стенке корпуса, поэтому такое решение вызывает некоторые проблемы при эксплуатации изделия [5].

Основным методом формирования вафельного фона является механическое фрезерование в листе, полуоболочках и в обечайке после свертки на станках с ЧПУ [6]. Процесс изготовления из полуоболочек требует наличия дополнительного продольного шва, что снижает один из показателей, гарантирующих качество изделия – надежность, включающая свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности [5, 7]. В процессе фрезерования часть нагартованного слоя, образованного при прокатке, удаляется

в стружку, что приводит к снижению прочности и жесткости конструкции. В стружку уходит до 86 % всей массы заготовки. Применяемый в настоящее время метод получения вафельного фона механической обработкой не позволяет наращивать производство и снижать затраты [5].

Вместе с тем задача создания технологий, позволяющих в едином технологическом цикле (**рис. 2**) получать такие изделия, остается, и одним из перспективных способов, как следствие развития порошковой металлургии в части аддитивных технологий, является прямое лазерное выращивание (ПЛВ) из металлических порошковых материалов. Востребована технология аддитивного производства для деталей размером до 3000 мм в диаметре и 2000 мм высотой, позволяющая получать сложнопрофильные, точные заготовки [8-12].

Разработка аддитивных технологий обусловлена возможностью с их помощью существенно сокращать время от разработки изделия до выпуска готовой продукции, материалоемкость продукции, потребление энергоресурсов, а также возможностью изготовления изделий с улучшенными свойствами и сложных конструкций, которые ранее не представлялось возможным производить из-за технологических ограничений [13].

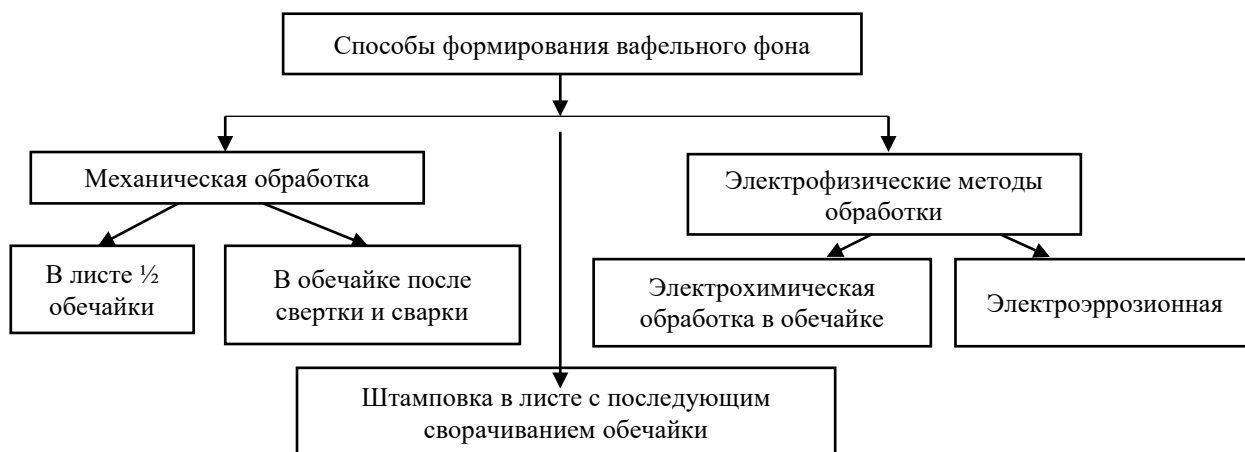


Рис. 1. Способы обработки вафельного фона [5]

Fig. 1. Methods of waffle structure processing [5]

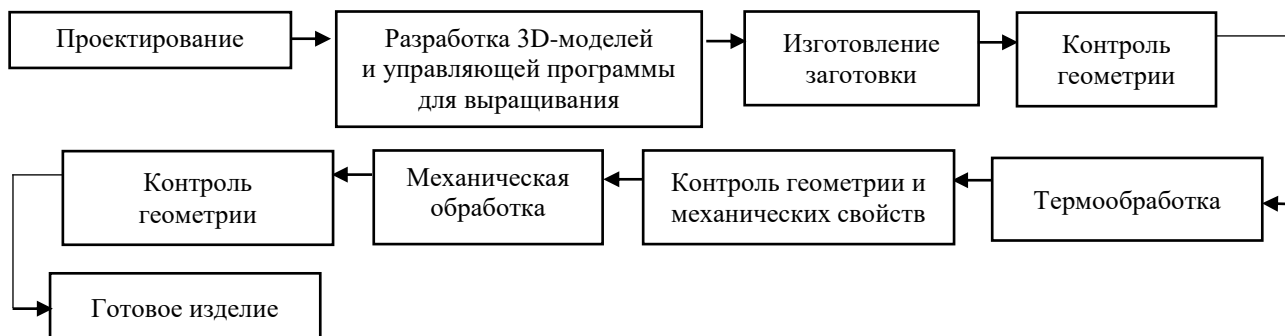


Рис. 2. Схема процесса изготовления детали методом ПЛВ

Fig. 2. Diagram of part manufacturing by the DLD process

Внедрение технологии ПЛВ изготовления деталей невозможно без разработки комплексного подхода к управлению технологическими операциями в обеспечении качества продукции. Традиционный постпроцессный контроль для аддитивных технологий себя исчерпал и не позволяет прогнозировать и предотвращать дефекты. Работы [14, 15] подтверждают значимость устранения ошибок на ранних стадиях проектирования, а также неустранимости образующихся дефектов в готовой детали, а как следствие, необходимости выращивания детали заново. Поэтому в соответствии с правилом десятикратного увеличения стоимости устранения ошибок (рис. 3 [16]) контроль после изготовления не только неэффективен и технически ограничен, но и экономически нецелесообразен. К настоящему времени информация об управлении качеством деталей, полученных методом ПЛВ, имеет разрозненный характер по:

1) параметрам процесса (мощности лазерного излучения, размера пятна лазерного луча, ширины валика, скорости процесса, расхода подаваемого порошка, смещения по высоте и др. [2]);

2) контролю качества (входной контроль) металлопорошковой композиции (МПК в соответствии с ГОСТ Р 59035 п. 3.1 [17]);

3) последующей постобработке. В этой связи сквозной цикл управления, заключающийся в предиктивном проектировании, адаптивном in-situ-управлении процессом в реальном времени и многоэтапном контроле.

Данный подход также будет применим к другим аддитивным процессам с учетом их особенностей. Таким образом, комплексная модель управления качеством деталей из порошкового алюминиевого материала является крайне актуальной задачей.

Материалы и методы исследования

ПЛВ является наиболее перспективной технологией для внедрения аддитивного производства деталей в ракетно-космической промышленности [18]. Данная технология позволяет изготавливать детали цельной конструкции без паяных, сварных соединений.

Аддитивные технологии имеют множество преимуществ перед традиционными. Благодаря прямому построению деталей становится возможным получение изделий любых форм и размеров. При переходе от детали с одной геометрией к деталям с другой геометрией не требуется дополнительной дорогостоящей оснастки. Становится возможным получение изделий с топографическим дизайном, с градиентной структурой. При этом происходит значительный рост производительности и снижение затрат исходного сырья [2, 19]. Автономные и роботизированные производственные системы совершают революцию в производстве инструментов и деталей для космических аппаратов [20], к тому же способствуют сокращению цикла изготовления. Для сравнения и наглядного представления технологических циклов традиционного и аддитивного производства были разработаны диаграммы Ганта [21] для традиционного производства (рис. 4, а) и аддитивного (рис. 4, б). Этот графический инструмент применяется для визуализации технологических операций, их последовательности и длительности. Для аддитивной технологии есть возможность проводить технологические операции параллельно (этапы 1 и 2).

Одним из преимуществ технологии ПЛВ является получение сложных изделий с толщиной стенки менее 3 мм. Так, исследователями из Санкт-Петербургского морского технического университета получены габаритные изделия с толщиной стенки 1,8–2 мм [22].



Рис. 3. Правило десятикратного увеличения стоимости устранения ошибки [16]

Fig. 3. Tenfold cost escalation rule for error correction [16]

Этапы изготовления	7 7 7 7	7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	7 7 7 7 7 7 7 7	7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	Срок
1 Конструирование и проектирование	█				7 дн
2 Технологическая подготовка	█	█			112 дн
3 Изготовление			█	█	154 дн
4 Механообработка				█	70 дн
5 Сборка				█	28 дн
6 Термообработка				█	14 дн
7 Финал. механообработка, контроль				█	14 дн
Итого для традиционного производства					~ 1 год

а

Этапы изготовления	7 7 7 7 7 7 7 7	Срок
1 Разработка 3D-модели и управ-й программы	█	14 дн
2 Технологическая подготовка	█	7 дн
3 Выращивание	█	21 день
4 Контроль геометрии	█	2 дн
5 Термообработка	█	7 дн
6 Механообработка и контроль	█	7 дн
Итого для аддитивного производства (ПЛВ)		~ 2 мес

б

Рис. 4. Длительность технологического цикла традиционного производства (а) и аддитивного производства (б)
 Fig. 4. Duration of the production cycle in conventional manufacturing (a) and additive manufacturing (б)

Схема процесса ПЛВ представлена на рис. 5.

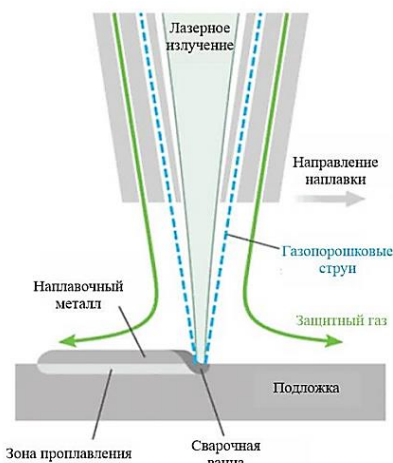


Рис. 5. Схема процесса ПЛВ [1]
 Fig. 5. Scheme of the DLD process [1]

Через медное сопло, расположенное коаксиально лазерному излучению, подается металлический порошок фракцией от 40 до 200 мкм. На подложке или предыдущем слое под воздействием лазерного излучения формируется ванна расплава, в которую попадает металлический порошок. В процессе кристаллизации формируется валик [1].

При последовательной наплавке валиков по заданным траекториям формируется готовое изделие. Коаксиальное сопло крепится к лазерной голове, которое, в свою очередь, крепится к роботу или системе приводов [1]. Подложки могут крепиться к многоосевому позиционеру, что позволяет выращивать изделия сложной формы. Максимальные габариты наплавляемых изделий зависят от размера технологического комплекса. ПЛВ – технологически сложный

процесс, так как на конечный результат влияет много параметров. Это и параметры, относящиеся к источнику нагрева – лазеру, такие как мощность излучения, диаметр и форма распределения энергии пятна, а также параметры самого процесса: скорость движущегося инструмента и форма наплавляемого валика, а также стратегия наплавки [1].

Также имеют значение показатели качества порошкового материала: его форма и размер частиц, физические свойства основного металла и т.д. В работе [23] часть параметров объединены в показатель объемной плотности энергии, который помогает на первоначальных этапах выбору режима наплавки. Объемная плотность энергии E , Дж/мм³, записывается как формула

$$E = P/(v \cdot h \cdot d), \tag{1}$$

где P – мощность лазерного излучения, Вт; v – скорость наплавки, мм/с; h – высота слоя, мм; d – диаметр лазерного пятна, мм.

Следует отметить, что данная формула широко распространена для технологий селективного лазерного плавления (СЛП), где толщина слоя h является строго задаваемым параметром. В случае ПЛВ высота наплавляемого валика в значительной степени зависит от динамики процесса и расхода порошка, поэтому прямое использование этой формулы требует осторожности и экспериментальной проверки применительно к ПЛВ.

Свойства конечного изделия, как и во всех методах порошковой металлургии, зависят не только от свойств исходного материала и параметров выращивания, но и от режимов последующей обработки. Критически важным этапом является термообработка полученной детали для снятия остаточных напряжений.

Технология ПЛВ является сложным и многофакторным процессом с большим количеством параметров, влияющих на конечный результат. Поэтому для понимания взаимосвязей между параметрами и получением изделий с заданными характеристиками исследования необходимо проводить комплексно [24].

Для анализа производственного процесса была разработана диаграмма Исикавы [25], или диаграмма рыбьего скелета (рис. 6), которая представляет собой наглядный графический метод причинно-следственных связей. Принцип диаграммы заключается в объективной оценке, идентификации возможных причин несоответствий и дефектов и выявлении потенциальных проблем технологического процесса изготовления деталей методом ПЛВ.

Основными категориями технологии ПЛВ являются исходное сырье (порошковый материал), технология и оборудование, постобработка, а также персонал.

Базовая концепция управления производством ПЛВ основывается на развитии стандартизации, методов управления качеством и внедрении системы

качества с применением процессного подхода, регламентируемом международными стандартами ISO серии 9000, а также возможностью выбора управленческих решений в режиме реального времени.

Наиболее востребованными конструкционными материалами, используемыми в аэрокосмической отрасли являются алюминиевые сплавы, применение которых дает возможность снизить массу изделий (плотность ρ менее $3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) [26]. Объем их применения составляет около 70 % от общего количества конструкционных материалов в составе ракеты-носителя по массе [28]. При этом самое широкое распространение получил алюминиевый сплав АМг6 [27], химический состав сплава представлен в табл. 1.

Механические испытания осуществлялись по ГОСТ 1497 [34] на машине для испытаний конструкционных материалов УТС 111.2-50-22 (№ 56294-11 в федеральном информационном фонде обеспечения единства измерений (далее – ФИФ ОЕИ)). Полученные результаты представлены в табл. 2.

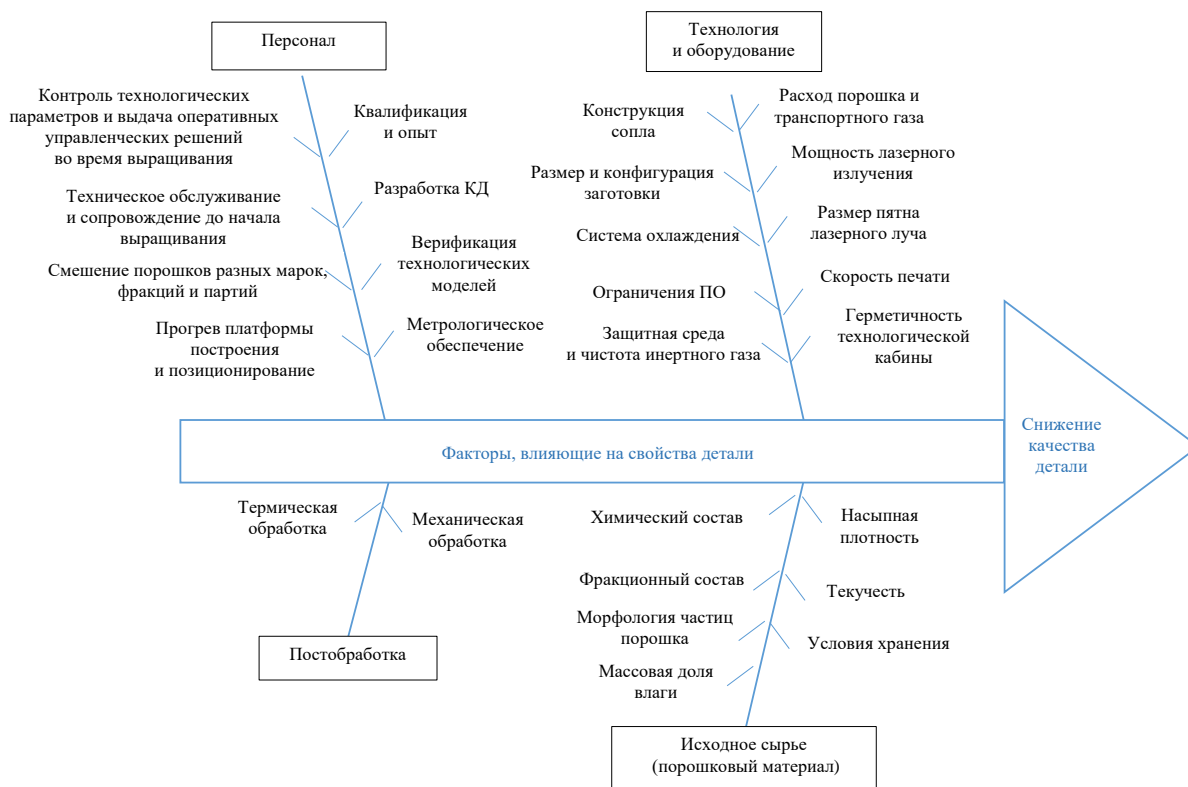


Рис. 6. Причинно-следственная связь процесса изготовления детали методом ПЛВ
 Fig. 6. Cause-and-effect relationship in part manufacturing by the DLD process

Таблица 1. Химический состав АМг6, % [26]
 Table 1. Chemical composition of АМг6, % [26]

Mg*	Mn	Ti	Be	Al	Fe	Si	Zn	Cu	Прочие примеси	
									каждая	Сумма
5,8-6,8	0,5-0,8	0,02-0,1	0,0002-0,005	Основа	0,4	0,4	0,2	0,1	Не более	
									0,05	0,1

*Выгорание магния при лазерной наплавке алюминиевых сплавов является важной технологической проблемой аддитивных технологий. Контроль содержания магния до и после процесса ПЛВ позволит гарантировать требуемый химический состав, а также механические свойства готового изделия.

Таблица 2. Механические свойства изделий из АМг6
Table 2. Mechanical properties of АМг6 alloy products

Марка порошка	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
АМг6	299 ± 31	147 ± 9	22 ± 11

Высокий разброс свойств материала, выражающийся в широком доверительном интервале, связан с методом его изготовления. В первую очередь, в процессе послойного сплавления материал кристаллизуется в метастабильном состоянии, а из-за постоянного градиента температуры (плавления с последующей быстрой кристаллизацией) возникают остаточные термические напряжения. Данная особенность, характерная для всех материалов, полученных методом послойного сплавления, и приводит к увеличению разброса механических свойств и, как следствие, что для большинства алюминиевых сплавов, используемых в изготовлении таких деталей, как отсеки и другие конструкционные элементы, минимально достаточный показатель пластичности составляет 5,5%.

АМг6 обладает высокой технологичностью, однако термической обработкой не упрочняется, что является существенным недостатком для аддитивного производства, поскольку комплекс физических, механических, технологических и коррозионных свойств сплавов определяется не только химическим и фазовым составом, но и способом получения и режимом термической обработки [26]. Термические методы применяются для уменьшения остаточных напряжений.

Институтом легких материалов и технологий (ИЛМиТ) (научно-производственный центр АО «РУСАЛ») для аддитивных технологий разработана

Таблица 3. Химический состав РС-320, мас.% [29]
Table 3. Chemical composition of RS-320, wt.% [29]

Основные элементы					Примеси, не более				
Al	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Ti	Zn	Каждая	Сумма
Основа	10,5-11,3	0,30-0,60	0,50-0,80	0,15-0,25	0,30-0,70	0,12-0,25	0,03	0,05	0,15

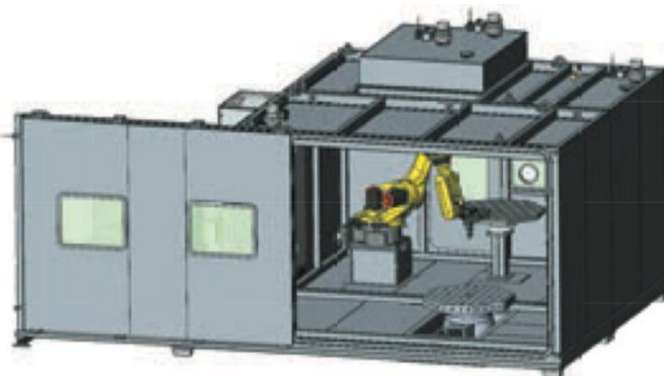


Рис. 7. Общий вид установки лазерной наплавки (фото с презентации ИЛИСТ СПбГМТУ)
Fig. 7. General view of the laser cladding system (photo from the presentation of the Institute of Laser and Welding Technologies, St. Petersburg State Marine Technical University)

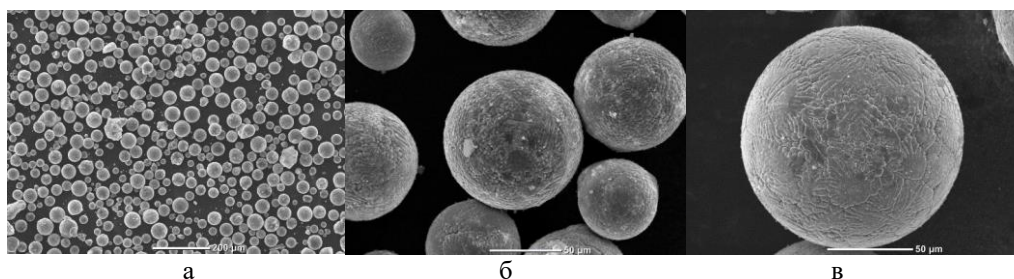


Рис. 8. Вид гранул порошка РС-320 при увеличении: а – ×100; б – ×500; в – ×600
 Fig. 8. Morphology of RS-320 powder particles at magnifications: a is ×100; б is ×500; в is ×600

Качество деталей, полученных ПЛВ, складывается из взаимодействия множества факторов, которые разделяются на прямые (непосредственно влияющие на процесс наплавки) и косвенные (влияющие на стабильность процесса наплавки). Оценка уровня качества выпускаемой продукции определяется путем сравнения совокупности показателей качества и базового образца, соответствующего мировому уровню или лучшим отечественным образцам [7]:

$$K_i = P_i / P_{oi}, \quad (2)$$

где P_i – показатель качества продукции; P_{oi} – базовое значение показателя качества эталонного (базового) образца.

Наиболее значимые факторы, влияющие на качество детали, определены экспертным анализом на основании разработанной причинно-следственной связи (см. рис. 6). Инструментом для оценки был выбран метод МСА (Multicriteria analysis) [32] по следующим критериям: влияние на геометрическую точность наплавки, влияние на образование дефектов и влияние на стабильность процесса наплавки. Экспертный анализ значимости факторов проводили квалифицированной группой, состоящей из конструктора, технолога, материаловеда и оператора установки для наплавки. В результате определены наиболее приоритетные параметры (критически значимые), которые могут приводить к дефектам (табл. 4).

Таблица 4. Прямые и косвенные влияющие факторы
 Table 4. Direct and indirect influencing factors

Фактор	Влияние
Прямое воздействие	
Химический состав и свойства порошкового материала	Определяет температуру плавления, теплопроводность и наследственную микроструктуру
Мощность лазерного излучения	Определяет количество подводимой энергии
Скорость наплавки (сканирования)	Определяет время воздействия лазера и кристаллизации, а также глубину проплавления
Диаметр лазерного пятна	Определяет площадь распределения подводимой энергии
Расход и скорость подачи порошка	Определяет количество порошка, поступающего в ванну расплава
Смещение по ширине между валиками в слое	Определяет перекрытие между валиками, оказывает влияние на шероховатость поверхности и появление дефектов в виде непроваров
Стратегия обработки для управляющей программы	Влияет на теплораспределение по всей детали
Косвенное воздействие	
Массовая доля влаги в порошке	Влияет на процесс наплавки и свойства детали по причине парообразования, рассеивания лазерного излучения, появления газовых пор
Содержание кислорода в технологической кабине	Влияет на появление пористости и неметаллических включений
Стабильность подачи порошка	Неоднородность геометрии
Качество и подготовка подложки	Чистота, шероховатость и прогрев влияют на сплавление выращиваемой заготовки, теплообмен
Калибровка технологического инструмента и позиционера, прохождение техосмотра, а также засорение сопла	Влияет на технологические параметры наплавки (на прямые факторы)
Термическая обработка	Влияет на остаточные напряжения и получаемую микроструктуру, механические свойства
Механическая обработка	Влияет на качество поверхности изделия и геометрические параметры
Метрологическое обеспечение	Влияет на контроль и воспроизведение технологических параметров (прямых факторов), а также на результаты измерений и испытаний (достоверность получаемой информации)

Эксперимент и результаты исследования

Для экспериментальной отработки и поиска приемлемых технологических параметров процесса наплавки был выбран алюминиевый порошок РС-320 фракцией 60-140 мкм. Поскольку технология ПЛВ применяется в основном для изготовления ответственных крупногабаритных деталей в мелкосерийном (и единичном) производстве, для получения гарантированных бездефектных структур необходимо проводить предварительные изготовления образцов как на металлографические исследования, так и на механические испытания [2]. На рис. 9 представлена схема выращивания технологических проб для проведения испытаний для определения физико-механических свойств.

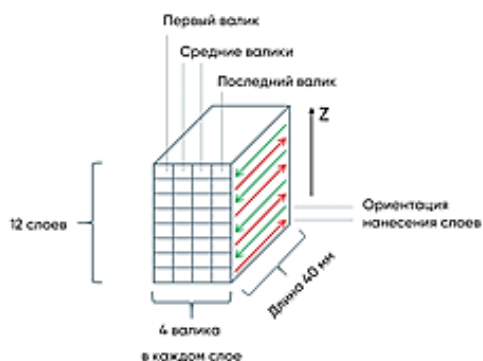


Рис. 9. Схема выращивания технологических проб
Fig. 9. Scheme of manufacturing technological test specimens

В качестве контролируемого параметра была выбрана пористость, являющаяся одним из критических дефектов аддитивных технологий в частности и для ПЛВ-деталей из алюминиевых сплавов, влияющих на качество конечных изделий. Пористость зависит от выбранных технологических параметров наплавки. В работе технологические пробы изготавливались по коммерческим режимам сплавления (режимы №1–4). В эксперименте варьированию подвергались мощность лазерного излучения от 2200 до 3400 Вт, диаметр пятна лазерного луча от 1,9 до 3,0 мм. В качестве инертного газа применялся аргон.

Серия экспериментов проводилась для исследования влияния технологических параметров на появление пористости с применением метода оптической микроскопии. Оценку осуществляли на поверенном средстве измерений – комплексе программно-аппаратного анализа микроструктуры поверхности твердых тел Thixomet (№ 48386-11 в ФИФ ОЕИ). Принцип действия основан на получении изображений структуры поверхности шлифов (изготовленных из технологических проб) при заданном увеличении на металлографическом микроскопе AxioVert A1 с фиксацией изображения цифровой видеокамерой EZIS PM. Результаты представлены в табл. 5.

Для режимов № 3 и 4 лучшие результаты пористости – 2,06 об. %, что не соответствует предъявляемым требованиям – не более 1,0 об.%.

Таблица 5. Результаты металлографического анализа
Table 5. Results of metallographic analysis

Номер пробы	Мощность лазерного излучения, Вт	Пористость, об.%
Режим №1		
1	3000	1,04
2	3200	1,29
3	3400	1,11
4	2200	1,39
5	2400	0,82
6	2600	1,67
7	2800	1,00
Режим №2		
1	3000	1,20
2	3200	1,10
3	3400	0,99
4	2200	1,40
5	2400	1,56
6	2600	1,34
7	2800	1,60

Механические свойства исследовались в соответствии с ГОСТ 1497 [33] на машине для испытаний конструкционных материалов УТС 111.2-50-22 (№ 56294-11 в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений (ФИФ ОЕИ)). Полученные данные представлены в табл. 6. Результаты испытаний демонстрируют, что материал, полученный методом ПЛВ из сплава РС-320, обладает более высокими механическими характеристиками по сравнению с традиционным сплавом АМг6 (см. табл. 2) при сохранении удовлетворительного уровня пластичности. На основании этого сплав РС-320 можно рассматривать в качестве перспективного материала для замены сплава АМг6 при изготовлении ответственных конструкций.

Таблица 6. Механические свойства образцов, изготовленных из технологических проб
Table 6. Mechanical properties of specimens manufactured from technological test samples

Марка порошка	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
РС-320	355 ± 10	265 ± 5	7 ± 1

Заключение

1. Установлено, что основными технологическими параметрами ПЛВ, определяющими формирование пор в алюминиевом сплаве РС-320, являются мощность лазера (оптимальный диапазон (3000 ± 200) Вт в зависимости от толщины детали) и скорость подачи порошка (до 150 г/мин).

2. Внедрен комплексный подход к контролю качества, включающий:

- предиктивный анализ технологических параметров;
- in-situ-мониторинг всего технологического процесса;
- автоматизированную систему принятия решений для коррекции режимов.

3. Апробированы оптимальные режимы ПЛВ, позволившие изготовить крупногабаритные заготовки с содержанием пор менее 1,0 об. % и пределом прочности не менее 320 МПа.

Список источников

1. Свицерский В.П. Разработка технологического обеспечения изготовления тонкостенных крупногабаритных корпусных деталей летательных аппаратов с применением комбинированной деформирующей обработки: автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.07.02 / Рос. гос. технол. ун-т им. К.Э. Циолковского (МАТИ). Москва, 2004. 37 с.
2. Вильданов А.М. Исследование особенностей формирования макродефектов объемной лазерной наплавки и разработка метода получения бездефектных наплавленных слоев: дис. ... канд. техн. наук : 2.5.8. / Вильданов Артур Маратович; ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Санкт-Петербург, 2022. 129 с.
3. Бельский А.Н., Карасев Д.В., Тихонова Н.А. Развитие современной ракетно-космической отрасли: роль научно-технических инноваций // Молодой ученый. 2016. № 20 (124). С. 124-127. URL: <https://moluch.ru/archive/124/34155>
4. Распоряжение Правительства РФ от 05.11.2020 № 2869-р (ред. от 21.10.2024) «Об утверждении Стратегии развития станкоинструментальной промышленности на период до 2035 года».
5. Батрутдинов Р.Г., Сысоев С.К. Технология изготовления вафельного фона в обечайках летательных аппаратов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики». 2011. Т.1. №7. С. 7-8.
6. Кузнецов С.В. Актуальный репортаж: Интервью генерального конструктора ГКНПЦ им. М.В. Хруничева. 02.03.2020. <http://www.khrunichev.ru/main.php?id=3&nid=3794>
7. Захаров В.И. Взаимозаменяемость, качество продукции и контроль в машиностроении: общие сведения, ЕСДП СЭВ, приборы и калибры, госприемка. Л.: Лен-издат, 1990. 302 с.
8. Campbell T.A., Ivanova O.S. Additive manufacturing as a disruptive technology: implications of three-dimensional printing // Technol. Innov. 2013, no. 15 (1), pp. 67-79.
9. Qualification and certification of metal additive manufactured hardware for aerospace applications / R. Russell, et al. // Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, Elsevier. 2019, pp. 33-66.
10. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition, Springer New York, New York, NY, 2015.
11. Murr L.E. Handbook of Materials Structures, Properties, Processing and Performance, Springer International Publishing, Cham, 2015.
12. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016, no. 83 (1-4), pp. 389-405.
13. Распоряжение Правительства РФ от 14.07.2021 № 1913-р (ред. от 21.10.2024) «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года».
14. Елисеева О.В., Беляев Н.Д. Технология прямого лазерного выращивания элементов узла уплотнения дейдвудного устройства // Оригинальные исследования (ОРИС). 2023. № 3. С. 243-250.
15. Прямое лазерное выращивание – прорыв в изготовлении крупногабаритных изделий / Туричин Г.А., Скляр М.О., Бабкин К.Д., Климова-Корсмик О.Г., Земляков Е.В. // Аддитивные технологии. 2017. №3. С. 32-35.
16. Боровков А.И. Деловой форум «Стратегия России», доклад «Цифровая трансформация высокотехнологичной промышленности: новые бизнес-процессы и бизнес-модели на основе цифровых двойников».
17. ГОСТ Р 59035 – 2020. Аддитивные технологии. Металлопорошковые композиции. Общие требования.
18. Особенности получения качественных изделий из титановых сплавов, изготовленных технологией прямого лазерного выращивания / М.О. Гуцина, О.Г. Климова-Корсмик, С.А. Шальнова, А.М. Вильданов, Е.А. Валдайцева // Фотоника. 2019. Т. 13. № 8. С. 722-735.
19. Исследование влияния параметров процесса 3D-наплавки проволочных материалов на формирование остаточных деформаций / Сметанников О.Ю., Максимов П.В., Трушников Д.Н., Пермяков Г.Л., Бельский В.Я., Фарберов А.С. // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. №2. С. 181-194.
20. Subin Antony Jose, Jordan Jackson, Jayden Foster, Terrence Silva, Ethan Markham, Pradeep L. Menezes. In-Space Manufacturing: Technologies, Challenges, and Future Horizons. 5 March 2025. <https://www.mdpi.com/2504-4494/9/3/84>
21. Quality Glossary Definition: Gantt chart. What is a Gantt Chart? <https://asq.org/quality-resources/gantt-chart>
22. Development of laser metal deposition process for a large IN625 part using small 125 trial samples / Babkin Konstantin, Kovchik Anton, Arkhipov Andrey, Gushchina Marina // 11th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2020] on September 7-10, 2020. Procedia CIRP. 2020, 94, 310-313. 10.1016/j.procir.2020.09.058.
23. Еремеев А.Д. Особенности формирования структуры и механические свойства металла при лазерной наплавке алюминиевых сплавов: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2022. 132 с.
24. Технологические основы высокоскоростного прямого лазерного выращивания изделий методом гетерофазной порошковой металлургии / Г. Туричин, О. Климова, Е. Земляков и др. // Фотоника. 2015. № 4 (52). С. 68-83. <https://asq.org/quality-resources/fishbone>
25. Авиационные материалы: справочник. В 9 т. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы / [подгот. Н.А. Аристова, В.П. Батраков, В.Ф. Беренсон и др.]; науч. ред. д. т. н. М.Б. Альтман. М., 1986. 132 с.
26. Компания «Формунг». Изготовление деталей для космической отрасли. <https://formung.ru/space?ysclid=mh84e4t0um279191025>
27. Казаков М.С. Улучшение структуры и свойств алюминиевых сплавов для изделий перспективной ракетно-космической техники совершенствованием режимов технологических воздействий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 2.6.17 / Казаков Михаил Сергеевич; ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». Самара, 2023. 21 с. : ил.
28. ТУ 24.42.00-002-44669951-2019. Порошок из сплава на основе алюминия. Технические условия.

30. ГОСТ 19440 – 94. Порошки металлические. Определение насыпной плотности. Ч. 1. Метод с использованием воронки. Ч. 2. Метод волюмометра Скотта.
31. ГОСТ 20899 – 98 (ИСО 4490-78). Порошки металлические. Определение текучести с помощью калиброванной воронки (прибора Холла).
32. https://research.unl.pt/ws/portalfiles/portal/96582884/Advancing_Sustainable_Decision_Making_in_Additive_Manufacturing.pdf
33. ГОСТ 1497–2023. Металлы. Методы испытаний на растяжение.
10. Gibson I, Rosen D., Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 2nd ed. New York: Springer, 2015.
11. Murr L.E. Handbook of materials structures, properties, processing and performance. Cham: Springer International Publishing; 2015.
12. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016;(83(1-4)):389-405.
13. Order of the Government of the Russian Federation “On Approval of the Strategy for the Development of Additive Manufacturing Technologies in the Russian Federation until 2030” No. 1913-r dated July 14, 2021 (as amended on October 21, 2024).
14. Eliseeva O.V., Belyaev N.D. Direct laser deposition technology for stern tube sealing assembly components. *Originalnye issledovaniya (ORIS) [Original Research]*. 2023;(3):243-250. (In Russ.)
15. 15. Turichin G.A., Sklyar M.O., Babkin K.D., Klimova-Korsmik O.G., Zemlyakov E.V. Direct laser deposition as a breakthrough in manufacturing large-sized products. *Additivnye tekhnologii [Additive Technologies]*. 2017;(3):32-35. (In Russ.)
16. Borovkov A.I. Digital transformation of high-tech industry: new business processes and business models based on digital twins. Proceedings of the Business Forum “Strategy of Russia”. (In Russ.)
17. State Standard GOST R 59035–2020. Additive Technologies. Metal Powder Compositions. General Requirements.
18. Gushchina M.O., Klimova-Korsmik O.G., Shalnova S.A., Vildanov A.M., Valdaytseva E.A. Production of high-quality titanium alloy products by direct laser deposition technology. *Fotonika [Photonics]*. 2019;13(8):722-735. (In Russ.)
19. Smetannikov O.Yu., Maksimov P.V., Trushnikov D.N., Permyakov G.L., Belenkiy V.Ya., Farberov A.S. Influence of wire-feed additive manufacturing parameters on residual deformations. *Vestnik PNIPU. Mekhanika [PNRPU Bulletin. Mechanics]*. 2019;(2):181-194. (In Russ.)
20. Jose S.A., Jackson J., Foster J., Silva T., Markham E., Menezes P.L. In-Space Manufacturing: Technologies, Challenges, and Future Horizons. *Designs*. March 5, 2025. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-4494/9/3/84>
21. Quality Glossary Definition: Gantt Chart. Available at: <https://asq.org/quality-resources/gantt-chart>
22. Babkin K., Kovchik A., Arkhipov A., Gushchina M. Development of laser metal deposition process for a large IN625 part using small 125 trial samples. 11th CIRP Conference on Photonic Technologies [LANE 2020] on September 7-10, 2020. *Procedia CIRP*. 2020;94:310-313. doi:10.1016/j.procir.2020.09.058.
23. Ereemeev A.D. *Osobennosti formirovaniya struktury i mekhanicheskie svoystva metalla pri lazernoy naplavke aluminievyykh splavov: dis. ... kand. tekhn. nauk [Structure formation and mechanical properties of aluminum alloys produced by laser deposition. Ph.D. dissertation]*. Saint Petersburg, 2022. 132 p.
24. Turichin G., Klimova O., Zemlyakov E., et al. Technological foundations of high-speed direct laser deposition using heterophase powder metallurgy. *Fotonika [Photonics]*. 2015;(4(52)):68-83. (In Russ.)
25. Available at: <https://asq.org/quality-resources/fishbone>.

References

1. Sviderskiy V.P. *Razrabotka tekhnologicheskogo obespecheniya izgotovleniya tonkostennykh krupnogabaritnykh korpusnykh detaley letatelnykh apparatov s primeneniem kombinirovannoy deformiruyushchey obrabotki: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk [Development of technological support for manufacturing thin-walled large-sized aircraft structural parts using combined deformation processing. Extended abstract of Dr.Sc. dissertation]*. Moscow: Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky (MATT), 2004. 37 p.
2. Vildanov A.M. *Issledovanie osobennostey formirovaniya makrodefektov obemnoy lazernoy naplavki i razrabotka metoda polucheniya bezdefektnykh naplavlennykh sloev: dis. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of macrodefect formation during laser metal deposition and development of a method for producing defect-free deposited layers. Ph.D. dissertation]*. Saint Petersburg, 2022. 129 p.
3. Belenkiy A.N., Karasev D.V., Tikhonova N.A. Development of the modern rocket and space industry: the role of scientific and technological innovations. *Molodoy uchenyy [Young Scientist]*. 2016;20(124):124-127. Available at: <https://moluch.ru/archive/124/34155> (In Russ.)
4. Order of the Government of the Russian Federation “On Approval of the Strategy for the Development of the Machine Tool Industry until 2035” No. 2869-r dated November 5, 2020 (as amended on October 21, 2024).
5. Batrutdinov R.G., Sysoev S.K. Manufacturing technology of waffle structures in aerospace shells]. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики [Current Problems of Aviation and Cosmonautics]*. 2011;1(7):7-8. (In Russ.)
6. Kuznetsov S.V. Interview with the General Designer of The Khronichev State Research and Production Space Center. March 2, 2020. Available at: <http://www.khronichev.ru/main.php?id=3&nid=3794>.
7. Zakharov V.I. *Vzaimozamenyaemost, kachestvo produktsii i kontrol v mashinostroenii: Obshchie svedeniya, ESDP SEV, pribory i kalibry, gospriemka [Interchangeability, Product Quality and Quality Control in Mechanical Engineering. Background, Unified system of tolerances and fits, instrumentation and calibration testing, state quality control]*. Leningrad: Lenizdat, 1990, 302 p. (In Russ.)
8. Campbell T.A., Ivanova O.S. Additive manufacturing as a disruptive technology: implications of three-dimensional printing. *Technol. Innov.* 2013;15(1):67-79.
9. Russell R., et al. Qualification and certification of metal additive manufactured hardware for aerospace applications. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. Elsevier; 2019. pp. 33-66.

26. Aristova N.A., Batrakov V.P., Berenson V.F., et al. *Aviatsionnye materialy: spravochnik*. V 9 t. T. 4. *Aluminiumyve i berillievye splavy* [Aviation Materials Handbook. In 9 Volumes. Vol. 4. Aluminum and Beryllium Alloys]. Ed. By M.B. Altman, Dr.Sc. Moscow, 1986, 132 p. (In Russ.)
27. Formung Company. Manufacturing of Parts for the Space Industry. Available at: <https://formung.ru/space?ysclid=mh84e4t0um279191025>
28. Kazakov M.S. *Uluchshenie struktury i svoystv aluminiumykh splavov dlya izdeliy perspektivnoy raketno-kosmicheskoy tekhniki sovershenstvovaniem rezhimov tekhnologicheskikh vozdeystviy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improvement of structure and properties of aluminum alloys for advanced aerospace products by optimizing technological treatment modes. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Samara, 2023, 21 p.
29. Technical Specifications TU 24.42.00-002-44669951-2019. Aluminum alloy powder. Specifications.
30. State Standard GOST 19440-94. Metal powders. Determination of apparent density. Part 1. Funnel method. Part 2. Scott volumeter method.
31. State Standard GOST 20899-98 (ISO 4490-78). Metal Powders. Determination of flow rate by means of a calibrated funnel (Hall flowmeter).
32. Available at: https://research.unl.pt/ws/portalfiles/portal/96582884/Advancing_Sustainable_Decision_Making_in_Additive_Manufacturing.pdf
33. State Standard GOST 1497-2023. Metals. Tensile testing methods.

Поступила 10.12.2025; принята к публикации 10.02.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 10/12/2025; revised 10/02/2026; published 30/06/2026

Михеева Наталья Владимировна – начальник группы,
Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова – филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,
Королёв, Россия.
Email: n_v_mikheeva@mail.ru.

Тимофеев Анатолий Николаевич – доктор технических наук,
заместитель генерального директора по научной работе,
АО «Композит», Королёв, Россия.
Email: info@kompozit-mv.ru

Логачёва Алла Игоревна – доктор технических наук, начальник отделения металлических материалов и металлургических технологий,
АО «Композит», Королёв, Россия.
Email: ailogacheva@yandex.ru

Басков Федор Алексеевич – кандидат технических наук, начальник сектора,
АО «Композит», Королёв, Россия.
Email: baskov_fa@mail.ru. ORCID 0000-0001-6238-4378

Воейко Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой управления качеством и стандартизации,
Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова – филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», Королёв, Россия.
Email: voeйко@ut-mo.ru

Natalia V. Mikheeva – Head of the Group,
Leonov Moscow Region University of Technology, branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Geodesy and Cartography, Korolev, Russia.
Email: n_v_mikheeva@mail.ru.

Anatoly N. Timofeev – DrSc (Eng.), Deputy General Director for Scientific Work,
JSC Compozit, Korolev, Russia.
Email: info@kompozit-mv.ru

Alla I. Logacheva – DrSc (Eng.), Head of the Department of Metal Materials and Metallurgical Technologies,
JSC Compozite, Korolev, Russia.
Email: ailogacheva@yandex.ru

Fedor A. Baskov – PhD (Eng.), Head of the Sector,
JSC Compozit, Korolev, Russia.
Email: baskov_fa@mail.ru. ORCID 0000-0001-6238-4378

Olga A. Voeйко – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Quality Management and Standardization,
Leonov Moscow Region University of Technology, branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Geodesy and Cartography, Korolev, Russia.
Email: voeйко@ut-mo.ru



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.923
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-127-137

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Носенко В.А., Кременецкий Л.Л., Кленцова И.В.

Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета,
Волжский, Россия

Аннотация. Глубинное шлифование широко применяется при изготовлении ответственных деталей из жаропрочных авиационных материалов, однако сопровождается интенсивным адгезионно-когезионным процессом и значительным тепловыделением в зоне резания. Для титановых сплавов, обладающих высокой адгезионной способностью, особенно актуальной является проблема засаливания шлифовального круга и шаржирования поверхности продуктами износа абразивного инструмента, что может негативно сказываться на эксплуатационных характеристиках получаемых изделий. Известно, что эффективность процесса глубинного шлифования титановых сплавов определяется выбором параметров режима резания и характеристик шлифовального круга. Тем не менее вопрос влияния данных условий обработки на интенсивность адгезионно-когезионного процесса и состояние микрорельефа обработанной поверхности до сих пор остается малоизученным. В работе представлены результаты исследования состояния обработанной поверхности титанового сплава Ti6Al4V после глубинного шлифования. Представленные в работе результаты экспериментальных исследований получены с использованием сканирующего электронно-ионного микроскопа. Исследования проводили с учетом этапов формообразования поверхностного слоя, влияния глубины шлифования и характеристики абразивного инструмента из карбида кремния. Установлено, что состояние сплава Ti6Al4V определяется закономерностями изменения мгновенной режущей способности и изменяется по длине обработанной поверхности. На этапе постоянной длины дуги контакта наблюдается максимальная интенсивность адгезионного взаимодействия и переноса на обрабатываемую поверхность налипov металла и объектов с кристаллическим строением. На протяжении этапа выхода интенсивность этих процессов последовательно снижается. Установлено, что применение шлифовального круга с более высокой твердостью и меньшим размером зерна способствует снижению количества налипов металла при глубине шлифования 1,5–2 мм. Установлено, что увеличение глубины шлифования от 1,5 до 2 мм приводит к росту насыщения обрабатываемой поверхности посторонними объектами. Экспериментально подтвержден факт шаржирования поверхности сплава Ti6Al4V продуктами износа шлифовального круга из карбида кремния при глубинном шлифовании.

Ключевые слова: сплав Ti6Al4V, круг из карбида кремния, сканирующий электронно-ионный микроскоп, характеристика шлифовального круга, влияние глубины шлифования, анализ состояния поверхности

© Носенко В.А., Кременецкий Л.Л., Кленцова И.В., 2026

Для цитирования

Носенко В.А., Кременецкий Л.Л., Кленцова И.В. Исследование обработанной поверхности титанового сплава при глубинном шлифовании в различных условиях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 127-137. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-127-137>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDY OF THE SURFACE CONDITION OF A TITANIUM ALLOY DURING CREEP-FEED GRINDING UNDER DIFFERENT PROCESSING CONDITIONS

Nosenko V.A., Kremenetsky L.L., Klentsova I.V.

Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia

Abstract. Creep-feed grinding is widely used in the manufacture of critical components made of heat-resistant aerospace materials; however, the process is accompanied by intensive adhesion-cohesion phenomena and considerable heat generation in the grinding zone. For titanium alloys possessing high adhesive affinity, the problems of grinding wheel loading and surface contamination by abrasive tool wear products are particularly important, since these phenomena may adversely affect the service performance of manufactured components. It is well known that the efficiency of creep-feed grinding of titanium alloys is determined by the selection of cutting conditions and grinding wheel characteristics. Nevertheless, the influence of these processing parameters on the intensity of adhesion-cohesion interactions and the condition of the machined surface topography remains insufficiently investigated. This paper presents the results of an investigation into the surface condition of the Ti6Al4V titanium alloy after creep-feed grinding. The experimental results were obtained using a scanning electron and ion microscope. The investigations were carried out taking into account the stages of surface layer formation, the influence of grinding depth, and the characteristics of silicon carbide abrasive tool. It was established that the condition of the Ti6Al4V alloy is governed by the variations in the instantaneous cutting ability and changes along the length of the machined surface. During the stage of constant contact arc length, the maximum intensity of adhesive interaction and the transfer of adhered metal and crystalline particles onto the workpiece surface were observed. Throughout the exit stage, the intensity of these processes gradually decreased. The use of a grinding wheel with higher hardness and finer abrasive grain size was found to reduce the amount of adhered metal at grinding depths of 1.5-2.0 mm. An increase in grinding depth from 1.5 to 2.0 mm resulted in a higher concentration of foreign particles on the machined surface. The phenomenon of impregnation of the Ti6Al4V alloy surface by wear products originating from the silicon carbide grinding wheel during creep-feed grinding was experimentally confirmed.

Keywords: Ti6Al4V alloy, silicon carbide grinding wheel, scanning electron and ion microscope, grinding wheel characteristics, influence of grinding depth, surface condition analysis

For citation

Nosenko V.A., Kremenetsky L.L., Klentsova I.V. Study of the Surface Condition of a Titanium Alloy During Creep-Feed Grinding under Different Processing Conditions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 21, pp. 127-137. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-127-137>

Введение

Глубинное шлифование (ГШ) находит широкое применение при получении деталей из высокопрочных сталей, авиационных алюминиевых сплавов, а также жаропрочных конструкционных материалов на основе никеля или титана [1, 2]. С использованием современных методов контроля состояния металлических материалов ведутся исследования в вопросах формирования микротвердости и негативных последствий интенсивного тепловыделения в зоне контакта инструмента и заготовки при ГШ [3, 4]. Также ученые исследуют прочие механизмы формирования характеристик поверхностного слоя материалов – как шероховатости [3, 5, 6], так и остаточных напряжений [7]. В целях интенсификации процесса ГШ разрабатываются специализированные СОЖ [5, 6], а также высокопористый, высокоструктурный абразивный инструмент [8].

Значительный исследовательский интерес вызывает явление переноса материалов в процессе шлифования, в

особенности шаржирования поверхности деталей продуктами износа шлифовального круга [9, 10]. Эта проблема приобретает особую актуальность при обработке жаропрочных сплавов на основе титана, адгезионная способность которых крайне высока [11, 12]. Шаржированные в обработанную поверхность абразивные зерна образуют зоны локального напряжения, потенциально снижающие ресурс работы ответственных изделий, используемых в авиационной технике [13]. Возможности сканирующего электронного микроскопа доказывают, что процесс ГШ титановых сплавов сопряжен с интенсивным шаржированием обрабатываемого материала микрочастицами шлифовального круга [14, 15].

Ключевой вектор развития операций ГШ – подбор оптимальных режимов резания [6, 16, 17]. Эффективность обработки методом ГШ в значительной степени определяется скоростью шлифования. Ранее было доказано, что активность адгезионно-когезионных процессов и состояние микрорельефа обработанной поверхности зависит от скорости шлифования [15]. Глубина

шлифования – не менее важный параметр режима резания, определяющий процесс ГШ [18]. Тем не менее вопрос влияния глубины шлифования на морфологию поверхности жаропрочных титановых сплавов до сих пор остается малоизученным и в отечественной, и в мировой научной школе. Установлено, что от выбора оптимальных характеристик высокопористого, высокоструктурного абразивного инструмента зависит шероховатость поверхности при ГШ [19-21]. Следовательно, стоит предположить, что параметры шлифовального круга могут оказывать влияние и на процессы адгезии, когезии при ГШ.

Цель работы: исследование состояния шлифованной поверхности сплава Ti6Al4V при ГШ с учетом глубины шлифования и характеристик абразивного инструмента.

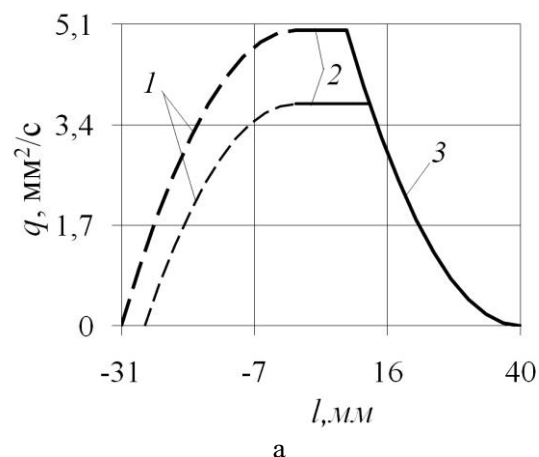
Материалы и методы исследования

Обработку методом ГШ осуществляли на специальном профилишлифовальном станке модели SLS 434 (производство ООО «СП Станковендт»). Обрабатываемый материал – сплав Ti6Al4V. Абразивный инструмент – шлифовальные круги из карбида кремния зеленого (производство ОАО «Волжский абразивный завод») с характеристиками 64CF80H12V, 64CF100I12V (далее круги 80H, 100I).

Режимы обработки методом ГШ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы обработки методом ГШ
Table 1. CFG grinding modes

Исходные данные	Характеристика	
	Режим №1	Режим №2
Глубина шлифования t	1,5 мм	2 мм
Скорость шлифования v	20 м/с	
Скорость продольной подачи v_s	150 мм/мин	
Подача правящего ролика S_p	1,2 мкм/об	



Порядок проведения анализа состояния обработанной поверхности изложен в ранее опубликованной статье [15]. Для анализа состояния обработанной поверхности использовали оборудование: цифровой микроскоп Levenhuk DTX TV, сканирующий электронно-ионный микроскоп FEI Versa 3D DualBeam.

Результаты исследования и их обсуждение

Методом ГШ инструментами из карбида кремния зеленого в заготовке вышлифовывали пазы. Размеры каждого паза: длина 40 мм, ширина 16 мм. Процесс обработки методом ГШ состоит из трех последовательных этапов врезания, постоянной длины дуги контакта (далее ПДДК) и выхода, продолжительность которых определяется глубиной шлифования, скоростью продольной подачи, длиной обрабатываемой поверхности и радиусом шлифовального круга [22]. Номинальная мгновенная режущая способность q на этапах ГШ, приведенная к 1 мм ширины обрабатываемой поверхности, определена по математическим моделям, изложенным в работе [22]. Ранее были установлены закономерности изменения q по длине шлифования: q постоянно растет на этапе врезания, достигает максимума к началу этапа ПДДК и стабилизируется, с началом этапа выхода начинает снижаться и достигает нулевого значения [23]. Графическое отображение изменения q по длине шлифования и времени шлифования показано на рис. 1. Этап врезания на графиках показан в отрицательной области оси абсцисс, так как формирование обработанной поверхности при ГШ начинается с переходом на этап ПДДК.

На этапе врезания q достигает максимума: при $t = 1,5$ мм до $q = 3,75$ мм²/с; при $t = 2$ мм до $q = 5$ мм²/с. Протяженность и временная продолжительность этапов ГШ показаны в табл. 2. Радиус шлифовальных кругов в проведенной серии испытаний равен около 240 мм, частота вращения шлифовальных кругов равна 13,27 об/с.

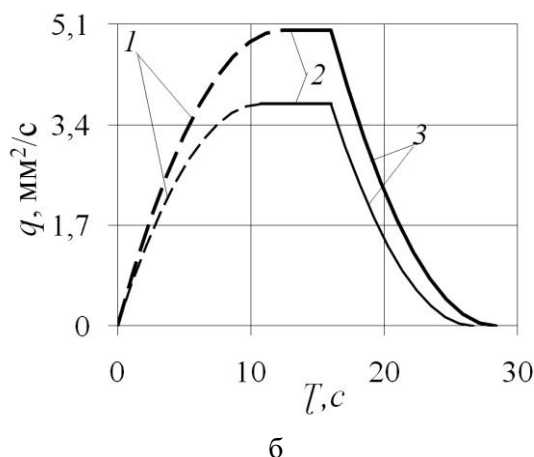


Рис. 1. Номинальная мгновенная режущая способность q : а – по длине шлифования; б – по времени шлифования; 1 – врезание; 2 – ПДДК; 3 – выход; – – $t = 1,5$ мм, — – $t = 2$ мм

Fig. 1. Instantaneous cutting capacity q : a is on the grinding length, б is on the grinding time; 1 is stage of incision, 2 is stage of constant length of arc, 3 is stage of exit; – – $t = 1,5$ мм, — – $t = 2$ мм

Таблица 2. Протяженность L и продолжительность τ этапов ГШ

Table 2. Grinding length L and grinding time τ at stages of CFG

Этап ГШ	$t = 1,5$ мм		$t = 2$ мм	
	L , мм	τ , с	L , мм	τ , с
Врезание	26,79	10,72	30,92	12,37
ПДДК	13,21	5,28	9,08	3,63
Выход	26,79	10,72	30,92	12,37

Таким образом, при $t = 1,5$ мм длина шлифования составляет 66,79 мм и продолжительность обработки равна 26,72 с, при $t = 2$ мм длина шлифования составляет 70,92 мм и продолжительность обработки равна 28,37 с. Данные о радиальном износе шлифовального круга h , определяемом подачей правящего ролика S_p и временной продолжительностью обработки τ , показаны в табл. 3.

Таблица 3. Радиальный износ шлифовального круга h

Этап ГШ	h , мкм	
	$t = 1,5$ мм	$t = 2$ мм
Этап ПДДК + этап выхода	127,39	127,39
Этап врезания + этап ПДДК + этап выхода	212,71	225,86

Первичный контроль состояния микрорельефа обработанной поверхности титанового сплава Ti6Al4V после шлифования кругом 80Н проводили с помощью цифрового микроскопа Levenhuk DTX TV. Установлено наличие следов работы зерен шлифовального круга (борозд и царапин), а также посторонних объектов (рис. 2). Часть объектов представляет собой налипы материала – частицы титанового сплава, ранее сцепленные с режущими кромками зерен шлифовального круга и затем перенесенные обратно на обрабатываемую поверхность. Иные объекты предположительно могут иметь кристаллическое строение. Дальнейший анализ состояния микрорельефа обработанной поверхности проводили с использованием растровой электронной микроскопии.

Электронные фотографии микрорельефа поверхности, полученной при $t = 1,5$ мм кругом 80Н, представлены ниже. Рис. 3, а, б – фотографии микрорельефа, сформированного в начале этапа ПДДК и в его конце; рис. 3, в-д – фотографии микрорельефа, сформированного на этапе выхода.

Фотографии обработанной поверхности, полученные с помощью электронно-ионного микроскопа, подтверждают адгезионно-когезионное взаимодействие между карбидом кремния и сплавом Ti6Al4V (см. рис. 3, а, б). На этапе ПДДК обработанная поверхность в значительной степени покрыта налипшим, размазанным материалом. На обработанной поверхности присутствуют и отдельные тела: как объекты, которые предварительно возможно определить, как налипы металла, так и объекты, предположительно, имеющие кристаллическое строение. За этап ПДДК морфология поверхности не претерпевает значимых изменений – структура поверхности остается практически однородной в течение данного этапа ГШ. С переходом на этап выхода

характер адгезионно-когезионного процесса изменяется: наблюдается уменьшение числа налипов, перенесенных с вершин абразивных зерен на поверхность титанового сплава и пластически деформированных по ней; возникают более отчетливые царапины, формируемые вершинами зерен шлифовального круга, очищенными от налипшего металла в результате работы правящего ролика (см. рис. 3, в). Улучшение структуры обработанной поверхности наблюдается и в середине, и в конце этапа выхода (см. рис. 3, г, д), при этом стоит отметить, что наличие некоторого количества посторонних объектов было зафиксировано даже на расстоянии 38 мм от края заготовки.

Установлено, что на этапе ПДДК сила резания максимальна [24], как максимальна и вероятность выкрашивания зерен с рабочей поверхности круга на данном этапе [25], а этап выхода характеризуется постепенным снижением составляющих силы резания. Закономерности изменения силы резания на этапах ГШ обусловлены изменениями q [24]. К началу этапа ПДДК q достигает максимума и остается неизменной до перехода на этап выхода. Скорость радиального износа шлифовального круга на этапе ПДДК практически равна скорости радиальной подачи правящего ролика или даже превышает ее, что объясняет крайне высокую интенсивность адгезионно-когезионного процесса. На этапе выхода, по мере снижения силы резания, скорость радиального износа круга снижается – одновременно с этим возрастает число зерен, подвергаемых обновлению правящим роликом. Таким образом, следствием роста эффективности правки роликом является не только крайне важное для ГШ титановых сплавов снижение температуры в зоне резания, но и улучшение микроструктуры обработанной поверхности.

Установлено, что с увеличением глубины шлифования от 1,5 до 2 мм интенсивность адгезионно-когезионного взаимодействия на этапе ПДДК возрастает – на обрабатываемую поверхность более активно налипают металл, далее пластически деформируемый в ходе обработки (см. рис. 3, а, б). Установлено, что обработке при $t = 2$ мм характерно образование более четких, глубоких следов резания, что обусловлено увеличением объема материала, удаляемого в единицу времени – эта закономерность сохраняется на протяжении этапа ПДДК. Изменения в состоянии поверхности, наблюдаемые с переходом между этапами в условиях $t = 1,5$ мм, также сохраняются в условиях $t = 2$ мм. С переходом на этап выхода при $t = 2$ мм обработанная поверхность также становится более чистой от налипов металла (см. рис. 3, в, 4, в), но имеет характерные для этапа ПДДК глубокие следы резания (см. рис. 4). Данные изменения структуры микрорельефа обусловлены как ростом q от 3,75 мм²/с при $t = 1,5$ мм до 5 мм²/с при $t = 2$ мм (на 33%), так и увеличением объемной режущей способности Q от 225 до 300 мм²/мин соответственно. Наличие объектов, внешний вид которых позволяет выдвинуть гипотезу об их кристаллическом строении, установлено на каждом участке исследуемой поверхности, полученной при $t = 2$ мм кругом 80Н.

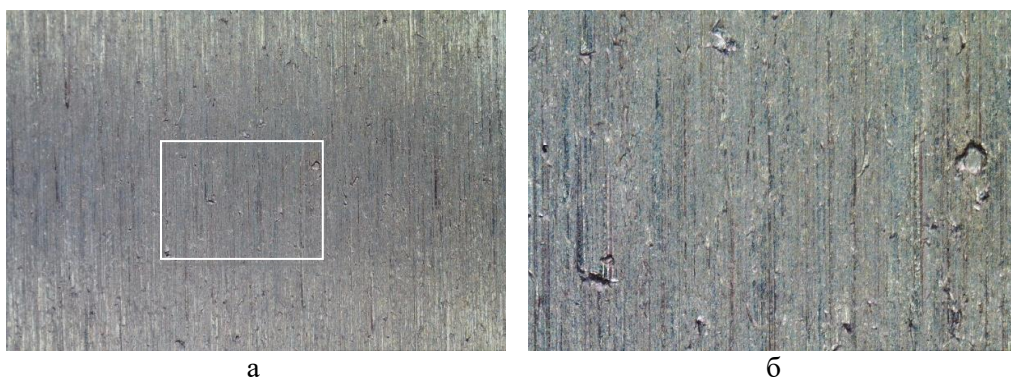


Рис. 2. Состояние микрорельефа поверхности при ГШ кругом 80Н, $t = 1,5$ мм, $l = 22$ мм: а – $\times 50$; б – $\times 200$
 Fig. 2. Surface topography after CFG by 80H grinding wheel, $t = 1,5$ mm, $l = 22$ mm: а is $\times 50$; б is $\times 200$

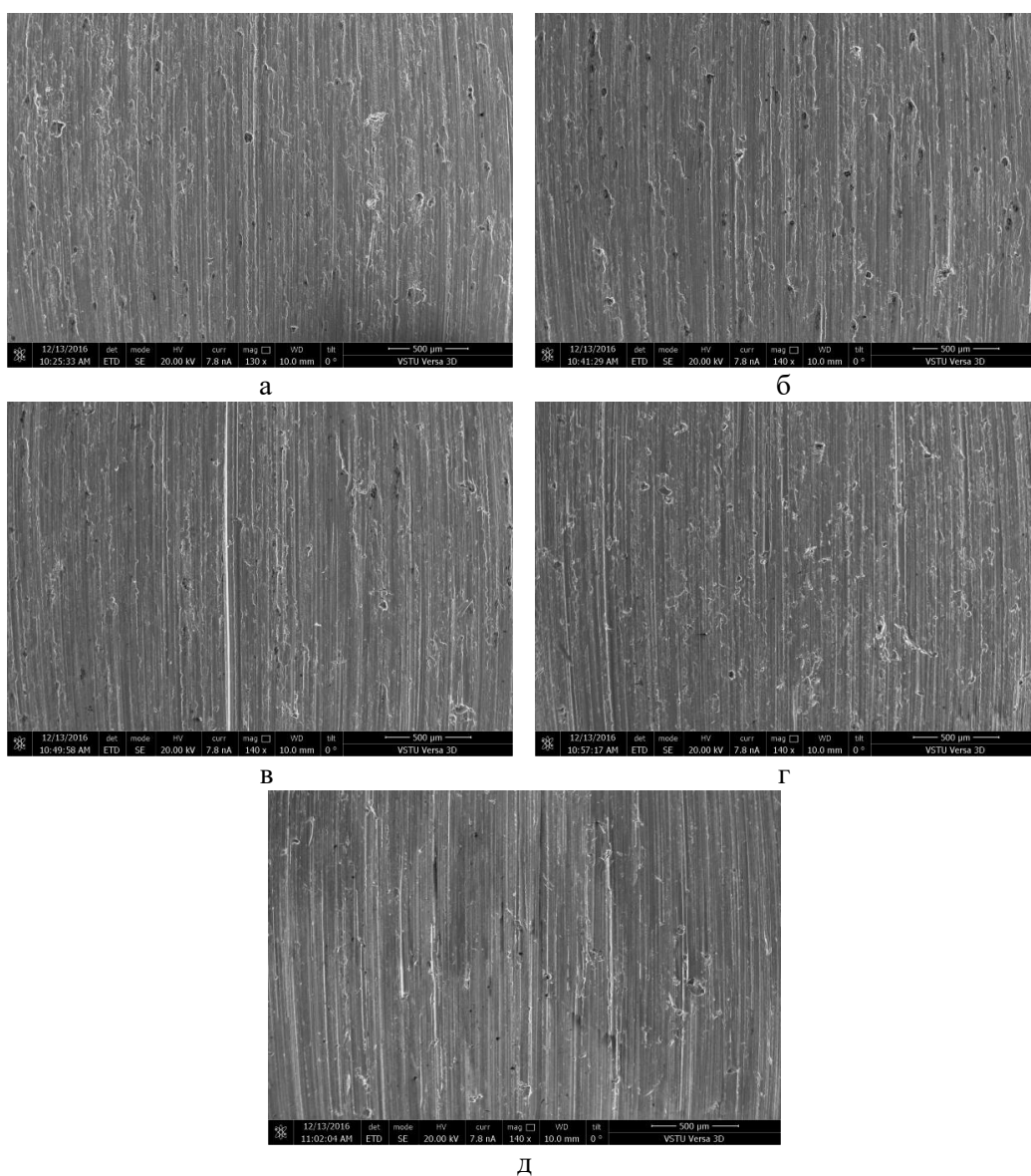


Рис. 3. Состояние микрорельефа поверхности при ГШ кругом 80Н, $t = 1,5$ мм: а – $l = 1$ мм; б – $l = 9$ мм; в – $l = 14$ мм; г – $l = 30$ мм; д – $l = 38$ мм

Fig. 3. Surface topography after CFG by 80H grinding wheel, $t = 1,5$ mm: а is $l = 1$ mm; б is $l = 9$ mm; в is $l = 14$ mm; г is $l = 30$ mm; д is $l = 38$ mm

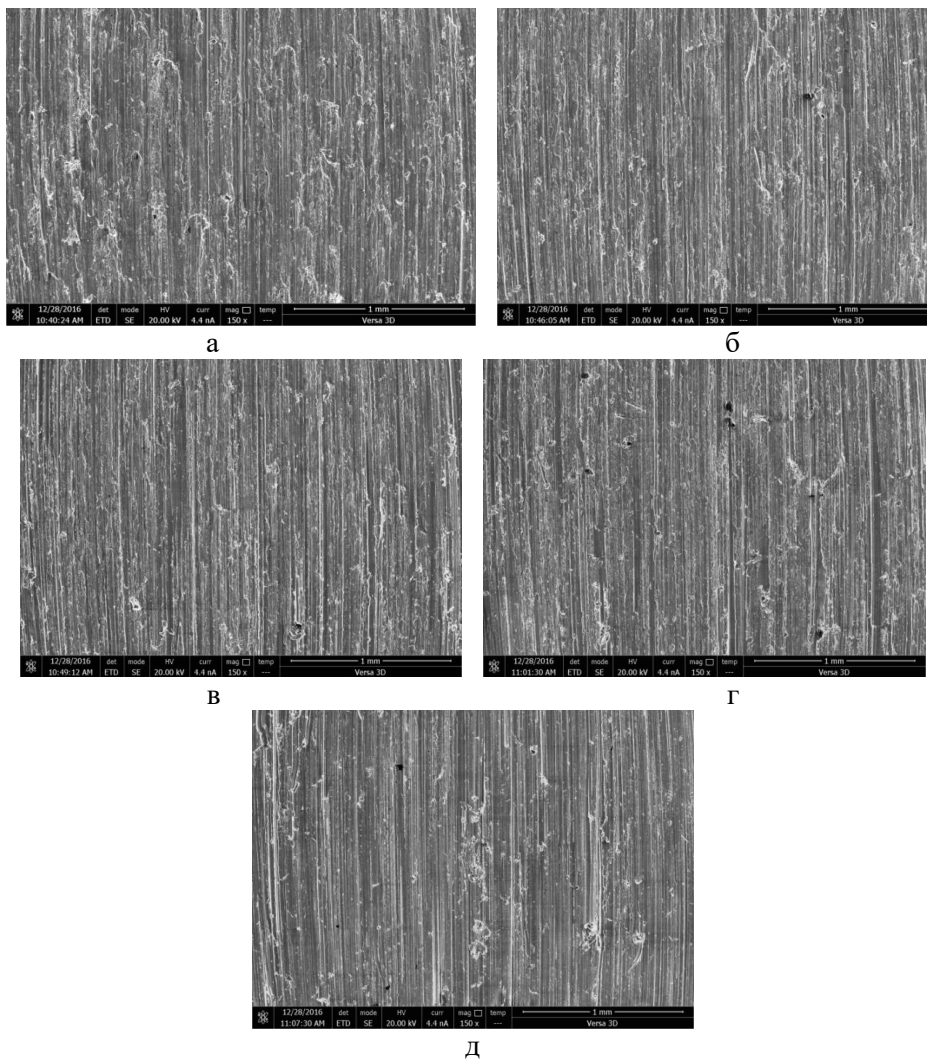


Рис. 4. Состояние микрорельефа поверхности при ГШ кругом 80Н, $t = 2$ мм: а – $l = 1$ мм; б – $l = 9$ мм; в – $l = 14$ мм; г – $l = 30$ мм; д – $l = 38$ мм

Fig. 4. Surface topography after CFG by 80H grinding wheel, $t = 2$ mm: а is $l = 1$ mm; б is $l = 9$ mm; в is $l = 14$ mm; г is $l = 30$ mm; д is $l = 38$ mm

Анализ обработанной поверхности, полученной кругом 100I при $t = 1,5$ мм, подтверждает зависимость состояния микрорельефа на этапах ГШ от закономерностей изменения q по длине шлифования. Участок поверхности заготовки, начинающийся от ее переднего края и заканчивающийся на расстоянии примерно 13 мм имеет структуру (рис. 5, а, б), в значительной степени идентичную ранее описанным в работе структурам, сформированным на этапе ПДДК. С началом снижения q от стабильно максимального значения до нуля обработанная поверхность постепенно становится более чистой от налипов металла и, вероятно, кристаллических тел – продуктов износа круга (рис. 5, в-д). Очевидно, что фактор выбора характеристик абразивного инструмента оказывает существенное влияние на состояние микрорельефа обработанной поверхности Ti6Al4V. Закономерности формирования этого микрорельефа на различных этапах ГШ при этом зависят в большей сте-

пени от изменения q по длине шлифования, нежели от твердости и зернистости инструмента.

Увеличение глубины шлифования на 33% (с 1,5 до 2 мм) при шлифовании кругом 100I влияет на микрорельеф обработанной поверхности в той же степени, как и увеличение t при работе круга 80Н. Взаимоперенос материалов между обрабатываемой заготовкой и режущим инструментом происходит на протяжении всего периода обработки, причем на участке ≤ 9 мм от края заготовки взаимодействие происходит наиболее активно (рис. 6, а, б). Тела предположительно кристаллического строения присутствуют на каждом участке исследованной поверхности (см. рис. 6). Количество данных объектов определяется радиальным износом шлифовального круга h , значение которого возрастает с увеличением глубины шлифования (см. табл. 3). Для поверхностей титанового сплава, формируемых методом маятникового шлифования, характерно шаржирование абразивных частиц в обрабатываемую поверхность [26]. Объемная

режущая способность Q процесса маятникового шлифования в десятки раз меньше Q процесса глубинного шлифования. Снижение количества внедренных абразивных частиц при маятниковом шлифовании способствует увеличению ударной вязкости и усталостной прочности титанового сплава [27]. Очевидно, что обеспечение качества обработки, формируемого в условиях маятникового шлифования, при ГШ практически невозможно, даже к завершению этапа выхода на поверхности Ti6Al4V установлено наличие значительного количества следов адгезии абразивного материала к обрабатываемому материалу.

Фактор характеристики шлифовального круга почти не оказывает влияния на формообразование поверхности при $t = 1,5$ мм в начале этапа ПДДК (см. рис. 3, а, 5, а). При $t = 2$ мм переход от круга 80Н к кругу 100I также не оказывает существенного влияния на структуру обработанной поверхности на участке ≤ 1 мм (см. рис. 4, а, б, а). Тем не менее к завершению этапа ПДДК работа круга 100I обеспечивает формирование более чистой от налипов металла поверхности, нежели работа круга 80Н. Структура поверхности на участке 14–30 мм

также характеризует влияние зернистости и твердости шлифовального круга – поверхность, формируемая при работе круга 100I, в большей степени представляет собой совокупность следов микрорезания, чем совокупность налипов металла. На расстоянии 38 мм от переднего края заготовки во всех рассматриваемых в работе условиях уже не происходит массового образования налипов металла (см. рис. 3, д, 4, д, 5, д, 6, д). Это можно объяснить приближающимся к нулевому значению показателем q : на данном участке поверхности при глубине шлифования 1,5 мм $q = 0,04$ мм²/с, при глубине шлифования 2 мм $q = 0,05$ мм²/с (см. рис. 1). Фактор номинальной мгновенной режущей способности на данном участке поверхности уже не оказывает значимого влияния на микрорельеф; определяющим состоянием микрорельефа фактором к концу этапа выхода является характеристика инструмента. Таким образом, переход от круга 80Н к кругу 100I обеспечивает улучшение микрорельефа обработанной поверхности, о чем свидетельствуют фотографии, полученные методом сканирующей электронной микроскопии.

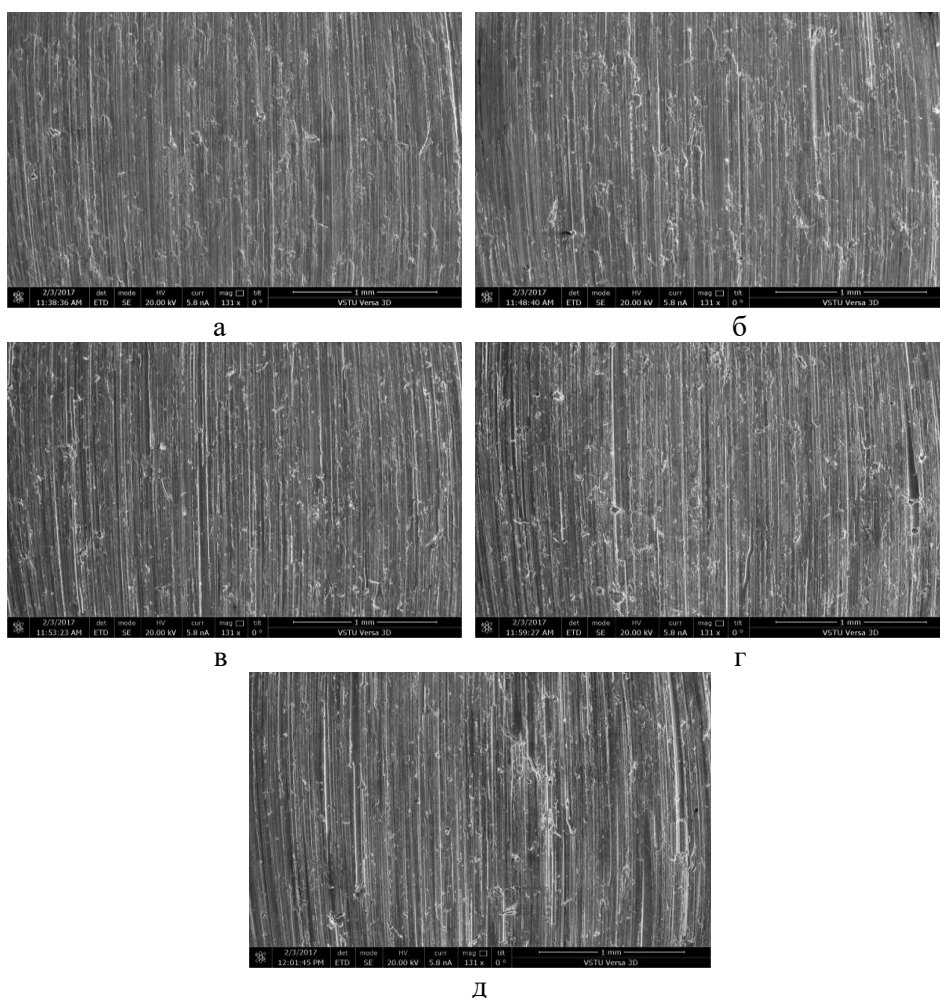


Рис. 5. Состояние микрорельефа поверхности при ГШ кругом 100I, $t = 1,5$ мм: а – $l = 1$ мм; б – $l = 9$ мм; в – $l = 14$ мм; г – $l = 30$ мм; д – $l = 38$ мм

Fig. 5. Surface topography after CFM by 100I grinding wheel, $t = 1,5$ mm: а is $l = 1$ mm; б is $l = 9$ mm; в is $l = 14$ mm; г is $l = 30$ mm; д is $l = 38$ mm

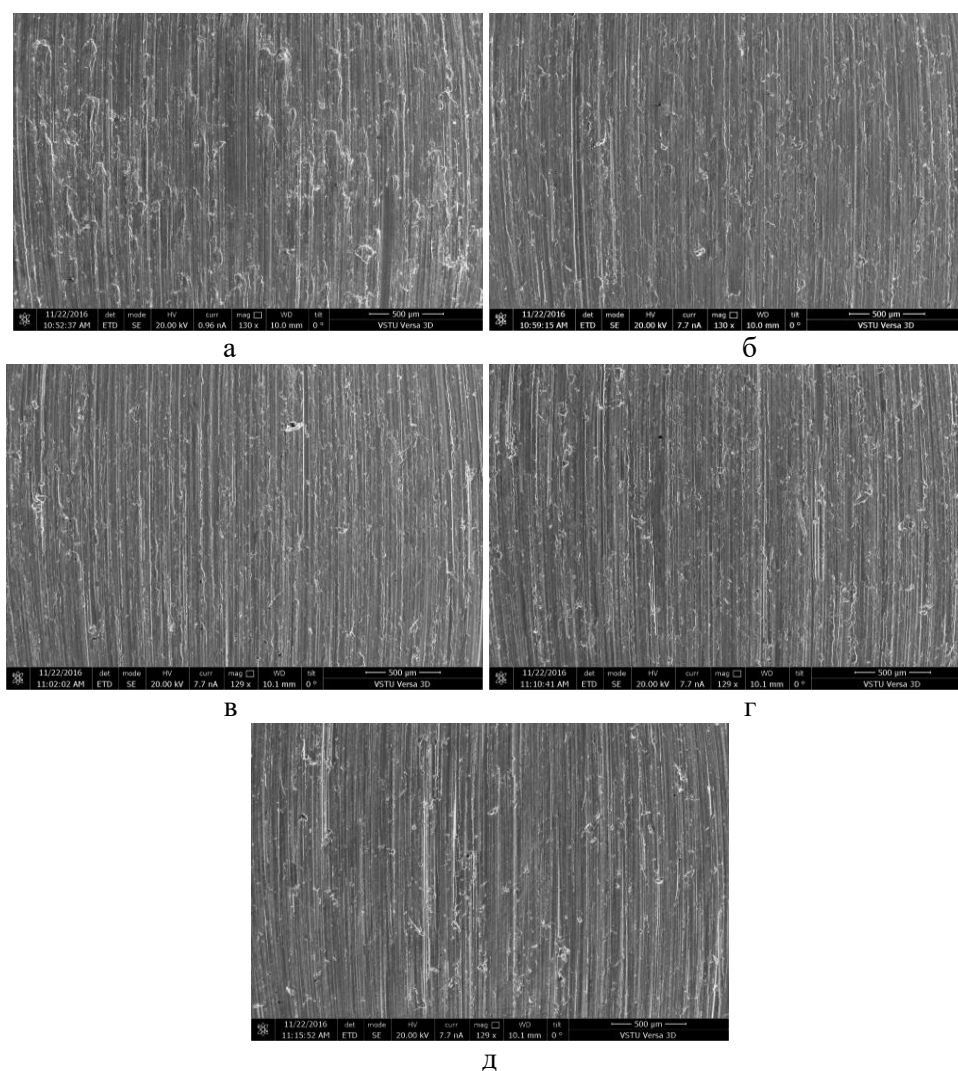


Рис. 6. Состояние микрорельефа поверхности при ГШ кругом 100I, $t = 2$ мм: а – $l = 1$ мм; б – $l = 9$ мм; в – $l = 14$ мм; г – $l = 30$ мм; д – $l = 38$ мм

Fig. 6. Surface topography after CFG by 100I grinding wheel, $t = 2$ mm: а is $l = 1$ mm; б is $l = 9$ mm; в is $l = 14$ mm; г is $l = 30$ mm; д is $l = 38$ mm

Визуальная оценка тел, наличие которых было зафиксировано на каждой электронной фотографии микрорельефа, позволяет выдвинуть предположение об их природе – эти тела являются либо отдельными металлическими налипками, либо абразивными частицами. Оценку содержания элементов в объектах, присутствующих на поверхности заготовки, проводили на электронно-ионном микроскопе методом точечного элементного анализа [15]. Получена электронная фотография поверхности, микрорельеф которой содержит посторонние включения: точка 1 – предположительно налип титанового сплава; точка 2 – предположительно кристалл карбида кремния; точка 3 – область визуально чистого участка поверхности (рис. 7, а). Результаты проведения точечного элементного анализа по выбранным точкам представлены на рис. 7, б.

Объект в левой части фотографии (см. рис. 7, а) в точке 1 имеет концентрацию углерода 3,11 мас.%,

концентрацию кремния 0,16 мас.%. Концентрация титана в точке 1 равна 79,95 мас.%.

В точке 2 концентрации углерода и кремния равны 17,76 и 80,29 мас.% соответственно, тогда как концентрация титана равна 1,25 мас.%. В точке 3 концентрации углерода и кремния равны 1,88 и 0,08 мас.% соответственно, а концентрация титана составляет 83,66 мас.%.

Элементный состав в точке 2 значительно отличается от составов, выявленных в точках 1 и 3. Процентные отношения составляющих сплава Ti6Al4V утверждены стандартом SAE AMS4928U-2017, согласно положениям стандарта содержание углерода и кремния не должно превышать 0,08 и 0,1 мас.% соответственно. Сравнение данных элементного анализа в точках 1 и 3 позволяет определить объект в левой части фотографии (см. рис. 7, а) как налип титанового сплава. Объект, выделенный на электронной фотографии точкой 2, – кристалл карбида кремния.

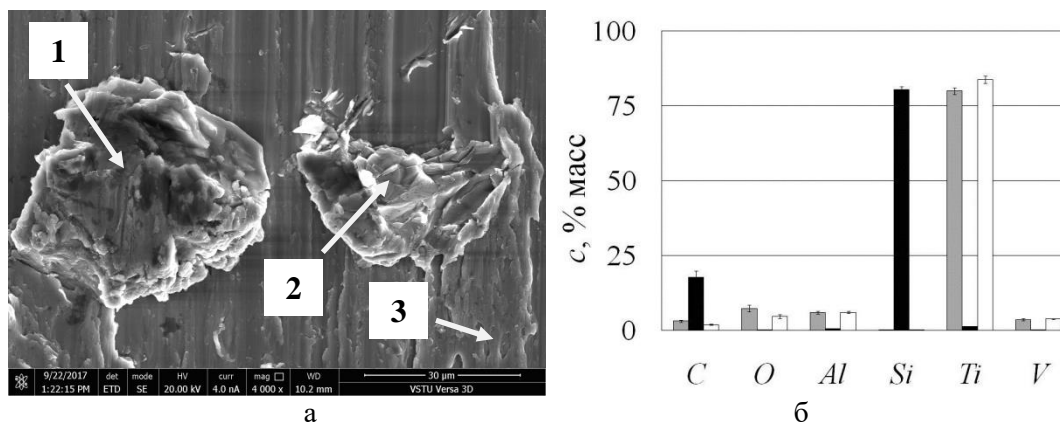


Рис. 7. Состояние микрорельефа поверхности при увеличении $\times 4000$ (а), результаты проведения элементного анализа (б): ■ — точка 1; ■ — точка 2; □ — точка 3

Fig. 7. Surface topography at $\times 4000$ magnification (a), results of spot elemental analysis (b): ■ is spot 1; ■ is spot 2; □ is spot 3

Заключение

Микрорельеф обработанной поверхности сплава Ti6Al4V изменяется по длине заготовки, его состояние зависит от этапа ГШ и закономерностей изменения мгновенной режущей способности q . Установлено, что взаимоперенос материалов абразивного инструмента и заготовки с наибольшей интенсивностью происходит на этапе ПДДК. С завершением этапа ПДДК и началом этапа выхода наблюдается существенное снижение интенсивности адгезионного взаимодействия между инструментом и обрабатываемым титановым сплавом. Далее на протяжении этапа выхода интенсивность адгезионного взаимодействия также продолжает снижаться.

Переход от круга 80Н к кругу 100I обеспечивает улучшение микрорельефа обработанной поверхности (снижение количества налипов металла) в конце этапа ПДДК и на этапе выхода при глубине шлифования 1,5–2 мм. Увеличение глубины шлифования с 1,5 до 2 мм приводит к росту интенсивности насыщения обрабатываемого сплава Ti6Al4V продуктами износа шлифовальных кругов различных характеристик. С использованием электронно-ионного микроскопа доказано, что в процессе ГШ сплава Ti6Al4V кругами из карбида кремния происходит шаржирование обрабатываемой поверхности кристаллами карбида кремния.

Список источников

1. Kishore K., Sinha M.K., Singh A. A comprehensive review on the grinding process: Advancements, applications and challenges // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022, vol. 236, is. 22, pp. 10923-10952.
2. Старков В.К. Эффективность инструмента из кубического нитрида бора при профильном глубинном шлифовании деталей из жаропрочных никелевых сплавов // *Вестник машиностроения*. 2023. № 6. С. 520-528.
3. Effect of combined grinding–burnishing process on surface integrity, tribological, and corrosion performance of laser-

clad stellite 21 alloys / M. Uddin, R. Santifoller, C. Hall, T. Schlaefer // *Advanced Engineering Materials*. 2022, vol. 25, is. 8, 202201332.

4. Song Y., Shi K., He Z. Investigation of grindability and surface integrity in creep feed grinding of GH738 alloy using different grinding wheels // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022, vol. 123, is. 3, pp. 4153-4169.
5. Inverse approach to derive the distribution of convection heat transfer coefficient of grinding fluid within grinding zone for deep grinding of nickel based super alloy / T. Jin, X. Ma, H. Hu, M. Qu, Z. Shang // *Journal of Mechanical Engineering*. 2022, vol. 58, is. 15, pp. 55-62.
6. Surface integrity evolution during creep feed profile grinding of γ -TiAl blade tenon / T. Chen, X. Wang, B. Zhao, W. Ding, J. Xu // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024, vol. 37, is. 8, pp. 496-512.
7. On the residual stresses of turbine blade root of γ -TiAl intermetallic alloys induced by non-steady-state creep feed profile grinding / T. Chen, Q. Miao, M. Xiong, X. Xi, B. Zhao, C. Pu, W. Ding // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, vol. 82, is. 2, pp. 800-817.
8. Jackson M.J., Ruxton V. Creep-feed grinding wheel development for safely grinding aerospace alloys // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021, vol. 30, is. 4, pp. 2220-2228.
9. Comparative investigation on wear behavior of brown alumina and microcrystalline alumina abrasive wheels during creep feed grinding of different nickel-based superalloys / M. Qing, D. Wenfeng, G. Yulong, X. Jiahua // *Wear*. 2019, vol. 426, pp. 1624-1634.
10. Advances in sustainable grinding of different types of the titanium biomaterials for medical applications: A review / K. Ronoh, F. Mwema, S. Dabees, D. Sobola // *Biomedical Engineering Advances*. 2022, vol. 4, 100047.
11. Surface grinding of Ti-6Al-4V alloy with SiC abrasive wheel at various cutting conditions / M.A. Vitor, D.S. Rosemar, M. Alisson, G. Rogério, D. Anselmo, O. Rodolfo // *Procedia Manufacturing*. 2017, vol. 10, pp. 590-600.
12. Rakurty S., Manigandan K., Bowser B. Grinding EB-PBF based additive manufactured Ti6Al4V: a surface integrity study // *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2023, vol. 7, November, pp. 1-9.

13. Планковский С.И., Головин И.И., Сиренко Ф.Ф. Анализ существующих методов очистки поверхности лопаток турбин в газотурбинных двигателях // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2013. № 6. С. 8-14.
14. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A. The effect of the operating speed and wheel characteristics on the surface quality at creep-feed grinding titanium alloys // *Solid State Phenomena*. 2018, vol. 284, pp. 369-374.
15. Влияние скорости глубинного шлифования на морфологию и химический состав поверхности титанового сплава / С.В. Носенко, В.А. Носенко, А.А. Коряжкин и др. // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2018. № 3. С. 62-72.
16. Babu V., Setti D. Grindability of additively manufactured Inconel 718 // *Journal of Manufacturing Processes*. 2024, vol. 112, pp. 238-247.
17. Exploring new parameters to advance surface roughness prediction in grinding processes for the enhancement of automated machining / M. Hadad, S. Attarsharghi, M.D. Abyaneh, P. Narimani // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024, vol. 8, is. 1, 41.
18. Yin Y., Chen M. Analysis of grindability and surface integrity in creep-feed grinding of high-strength steels // *Materials*. 2024, vol. 17, is. 8, 1784.
19. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
20. Barmouz M., Azarhoushang B. Grinding performance evaluation of additively manufactured vitrified bond grinding wheel: tool wear, grinding force, surface roughness, and surface topography analysis // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2024, vol. 12, pp. 1385-1400.
21. Research progress of abrasive groups ordered grinding wheels / Y. Guo, B. Chen, Z. Liu, S. Sun. // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2025, vol. 38, 53.
22. Носенко С.В., Носенко В.А., Зотова С.А. Этапы глубинного шлифования / ВПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ВолГТУ». Волжский, 2021. 166 с.
23. Носенко В.А., Носенко С.В. Математические модели наработки и режущей способности для различных этапов плоского глубинного шлифования горизонтальных поверхностей кругом прямого профиля // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2010. № 4. С. 92-98.
24. Носенко В.А., Носенко С.В. Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с непрерывной правкой круга // *Вестник машиностроения*. 2010. № 11. С. 57-61.
25. Носенко В.А., Авилов А.В. Закономерности изменения силы плоского глубинного шлифования // *Справочник. Инженерный журнал*. 2009. № 7. С. 10-19.
26. Носенко В.А., Сердюков Н.Д., Фетисов А.В. Перенос материала абразивного инструмента на поверхность титанового сплава в различные периоды шлифования кругом из карбида кремния // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2022. № 1. С. 68-77.
27. Интенсивность шаржирования титанового сплава продуктами износа инструмента из карбида кремния при шлифовании / В.А. Носенко, Н.Д. Сердюков, С.П. Кузнецов и др. // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2025. № 1. С. 108-117.

References

1. Kishore K., Sinha M.K., Singh A.A comprehensive review on the grinding process: Advancements, applications and challenges. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022;236(22):10923-10952.
2. Starkov V.K. Efficiency of cubic boron nitride tools in profile creep-feed grinding of heat-resistant nickel alloy parts. *Vestnik mashinostroeniya* [Vestnik of Mechanical Engineering]. 2023;(6):520-528. (In Russ.)
3. 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;25(8):202201332.
4. Song Y., Shi K., He Z. Investigation of grindability and surface integrity in creep feed grinding of GH738 alloy using different grinding wheels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;123(3):4153-4169.
5. Jin T., Ma X., Hu H., Qu M., Shang Z. Inverse approach to derive the distribution of convection heat transfer coefficient of grinding fluid within grinding zone for deep grinding of nickel based super alloy. *Journal of Mechanical Engineering*. 2022;58(15):55-62.
6. Chen T., Wang X., Zhao B., Ding W., Xu J. Surface integrity evolution during creep feed profile grinding of γ -TiAl blade tenon. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024;37(8):496-512.
7. Chen T., Miao Q., Miong X., Xi X., Zhao B., Pu C., Ding W. On the residual stresses of turbine blade root of γ -TiAl intermetallic alloys induced by non-steady-state creep feed profile grinding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;82(2):800-817.
8. Jackson M.J., Ruxton V. Creep-feed grinding wheel development for safely grinding aerospace alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(4):2220-2228.
9. Qing M., Wenfeng D., Yulong G., Jihua X. Comparative investigation on wear behavior of brown alumina and microcrystalline alumina abrasive wheels during creep feed grinding of different nickel-based superalloys. *Wear*. 2019;426:1624-1634.
10. Ronoh K., Mwema F., Dabees S., Sobola D. Advances in sustainable grinding of different types of the titanium biomaterials for medical applications: A review. *Biomedical Engineering Advances*. 2022;4:100047.
11. Vitor M.A., Rosemar D.S., Alisson M., Rogério G., Anselmo D., Rodolfo O. Surface grinding of Ti-6Al-4V alloy with SiC abrasive wheel at various cutting conditions. *Procedia Manufacturing*. 2017;10:590-600.
12. Rakurty S., Manigandan K., Bowser B. Grinding EB-PBF based additive manufactured Ti6Al4V: a surface integrity study. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2023;7:1-9.
13. Plankovskii S.I., Golovin I.I., Sirenko F.F. Analysis of existing methods for cleaning turbine blade surfaces in gas turbine engines. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace Engineering and Technology]. 2013;(6):8-14. (In Russ.)
14. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A. The effect of the operating speed and wheel characteristics on the sur-

- face quality at creep-feed grinding titanium alloys. *Solid State Phenomena*. 2018;284:369-374.
15. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Koryazhkin A.A. et al. Influence of creep-feed grinding speed on the morphology and chemical composition of titanium alloy surface. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of higher educational institutions. Mechanical Engineering]. 2018;(3):62-72. (In Russ.)
 16. Babu V., Setti D. Grindability of additively manufactured Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024;112:238-247.
 17. Hadad M., Attarsharghi S., Abyaneh M.D., Narimani P. Exploring new parameters to advance surface roughness prediction in grinding processes for the enhancement of automated machining. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024;8(1):41.
 18. Yin Y., Chen M. Analysis of grindability and surface integrity in creep-feed grinding of high-strength steels. *Materials*. 2024;17(8):1784.
 19. Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Grinding with highly porous wheels]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 688 p. (In Russ.)
 20. Barmouz M., Azarhoushang B. Grinding performance evaluation of additively manufactured vitrified bond grinding wheel: tool wear, grinding force, surface roughness, and surface topography analysis. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2024;12:1385-1400.
 21. Guo Y., Chen B., Liu Z., Sun S. Research progress of abrasive groups ordered grinding wheels. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2025;38:53.
 22. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Zotova S.A. *Etapy glubinnogo shlifovaniya* [Stages of creep-feed grinding]. Volzhskii: Volga Polytechnic Institute (branch) VolgSTU Publishing House, 2021, 166 p. (In Russ.)
 23. Nosenko V.A., Nosenko S.V. Mathematical models of tool life and cutting ability for various stages of surface creep-feed grinding of horizontal surfaces with a straight-profile wheel. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of machinery manufacture and reliability]. 2010;(4):92-98. (In Russ.)
 24. Nosenko V.A., Nosenko S.V. Up- and down-creep-feed grinding of titanium alloy with continuous wheel dressing. *Vestnik mashinostroeniya* [Vestnik of Mechanical Engineering]. 2010;(11):57-61. (In Russ.)
 25. Nosenko V.A., Avilov A.V. Regularities of force variation in surface creep-feed grinding. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal]. 2009;(7):10-19. (In Russ.)
 26. Nosenko V.A., Serdyukov N.D., Fetisov A.V. Transfer of abrasive tool material onto the titanium alloy surface during various grinding stages using a silicon carbide wheel. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of machinery manufacture and reliability]. 2022;(1):68-77. (In Russ.)
 27. Nosenko V.A., Serdyukov N.D., Kuznetsov S.P. et al. Intensity of titanium alloy impregnation by wear products of a silicon carbide tool during grinding. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of machinery manufacture and reliability]. 2025;(1):108-117. (In Russ.)

Поступила 13.01.2026; принята к публикации 30.01.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 13/01/2025; revised 30/01/2026; published 30/06/2026

Носенко Владимир Андреевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств», Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Волжский, Россия.

Email: nosenko@volpi.ru. ORCID 0000-0002-5074-1099

Кременецкий Леонид Леонидович – старший преподаватель, Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Волжский, Россия.

Email: kreleonid@yandex.ru. ORCID 0000-0002-6973-5844

Кленцова Ирина Витальевна – магистрант, Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Волжский, Россия.

Email: ira.klentsova@bk.ru.

Vladimir A. Nosenko – DrSc (Eng.), Professor, Head of Department of Technology and Equipment of Machine Building Manufacturing,

Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia.

Email: nosenko@volpi.ru. ORCID 0000-0002-5074-1099

Leonid L. Kremenetsky – Senior lecturer,

Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia.

Email: kreleonid@yandex.ru. ORCID 0000-0002-6973-5844

Irina V. Klentsova – Master's Student,

Volzhsky Polytechnic Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Volzhsky, Russia.

Email: ira.klentsova@bk.ru.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 669
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-138-145



ЭВОЛЮЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СРЕДНЕЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ CoCrNbMnNi

Коновалов С.В.¹, Дробышев В.К.¹, Панченко И.А.¹, Воробьев С.В.¹, Yu J.²

¹Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

²Weihai Liyu Industrial Co., Ltd, China

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Разработка новых конструкционных материалов с оптимальным балансом прочности и пластичности является ключевой задачей современного материаловедения. Среднеэнтропийные сплавы системы Co-Cr-Ni представляют значительный интерес, однако их свойства могут быть повышены за счет микролегирования элементами, вызывающими значительные атомные искажения кристаллической решетки, такими как ниобий и марганец. Понимание влияния таких добавок на структуру и механическое поведение является актуальной научной задачей. **Цель работы.** Изучение возможностей управления механическими свойствами среднеэнтропийных сплавов системы Co-Cr-Ni путем контролируемого легирования малыми добавками ниобия и марганца (2–6 ат.%). **Используемые методы.** Четыре сплава системы Nb-Mn-Ni-Co-Cr были получены методом вакуумного литья с последующим переплавом для гомогенизации. Механические характеристики исследовались методами одноосного растяжения при комнатной температуре, микро- и наноиндентирования (согласно ISO 14577) для определения твердости и модуля упругости. Фрактографический анализ поверхностей излома проводился с использованием сканирующей электронной микроскопии. **Новизна.** Впервые систематически изучено влияние комбинированного легирования ниобием и марганцем на комплекс механических свойств среднеэнтропийных сплавов на основе Co-Cr-Ni. Установлены корреляции между элементным составом, твердостью, пределом прочности и характером разрушения. **Результат.** Установлено, что добавка ниобия приводит к твердорастворному упрочнению за счет атомных искажений решетки. Наибольшие значения микротвердости (140,7 HV), нанотвердости (2,29 ГПа) и модуля Юнга (156 ГПа) зафиксированы для состава Nb₂Mn₂Ni₃₀Co₄₀Cr₂₀. Максимальный предел прочности (641 МПа) при относительно низкой твердости продемонстрировал сплав Nb₂Mn₂Ni₃₀Co₄₀Cr₂₀, что указывает на достижение благоприятного сочетания прочности и пластичности. Фрактографический анализ подтвердил преимущественно вязкий характер разрушения. **Практическая значимость.** Полученные результаты демонстрируют, что контролируемое легирование ниобием и марганцем является эффективным инструментом для управления балансом прочность-пластичность в среднеэнтропийных сплавах, что открывает перспективы для создания новых конструкционных материалов с заданными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: среднеэнтропийный сплав системы Co-Cr-Ni-Mn-Nb, микроструктура, нанотвердость, одноосное растяжение

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-49-00015, <https://rscf.ru/project/23-49-00015/>.

© Коновалов С.В., Дробышев В.К., Панченко И.А., Воробьев С.В., Yu J., 2026

Для цитирования

Эволюция механических свойств среднеэнтропийных сплавов системы CoCrNbMnNi / Коновалов С.В., Дробышев В.К., Панченко И.А., Воробьев С.В., Yu J. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 138-145. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-138-145>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

EVOLUTION OF MECHANICAL PROPERTIES OF MEDIUM-ENTROPY ALLOYS OF THE COCRNBMNNI SYSTEM

Konovalov S.V.¹, Drobyshev V.K.¹, Panchenko I.A.¹, Vorobyov S.V.¹, Yu J.²

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

²Weihai Liyu Industrial Co., Ltd, China

Abstract. Problem Statement (Relevance). The development of new structural materials with an optimal balance of strength and ductility is one of the key challenges of modern materials science. Medium-entropy alloys of the Co-Cr-Ni system are of considerable interest; however, their properties can be further enhanced through microalloying with elements causing significant atomic lattice distortions, such as niobium and manganese. Understanding the influence of such additives on the structure and mechanical behavior is an important scientific task. **Objectives.** The research is aimed at investigating the possibility of controlling the mechanical properties of medium-entropy alloys of the Co-Cr-Ni system through controlled alloying with small additions of niobium and manganese (2–6 at.%). **Methods Applied.** Four alloys of the Nb-Mn-Ni-Co-Cr system have been obtained by vacuum casting followed by remelting for homogenization. Mechanical properties have been studied using uniaxial tensile testing at room temperature, as well as micro- and nanoindentation techniques (according to ISO 14577) to determine hardness and elastic modulus. Fractographic analysis of fracture surfaces has been carried out using scanning electron microscopy. **Originality.** For the first time, the effect of combined alloying with niobium and manganese on the complex mechanical properties of Co-Cr-Ni-based medium-entropy alloys has been systematically studied. Correlations between elemental composition, hardness, tensile strength, and fracture behavior have been established. **Result.** It has been found that the addition of niobium leads to solid-solution strengthening due to atomic lattice distortions. The highest values of microhardness (140.7 HV), nanohardness (2.29 GPa), and Young's modulus (156 GPa) have been obtained for the Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀ composition. The maximum ultimate tensile strength (641 MPa) at relatively low hardness has been demonstrated by the Nb₂Mn₂Ni₃₀Co₄₀Cr₂₆ alloy, indicating a favorable combination of strength and ductility. Fractographic analysis has confirmed a predominantly ductile fracture mechanism. **Practical Relevance.** The obtained results demonstrate that controlled alloying with niobium and manganese is an effective approach for tailoring the strength-ductility balance in medium-entropy alloys, opening prospects for the development of new structural materials with targeted performance characteristics.

Keywords: medium-entropy alloy of the Co-Cr-Ni-Mn-Nb system, microstructure, nanohardness, uniaxial tension

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-49-00015, <https://rscf.ru/project/23-49-00015/>.

For citation

Konovalov S.V., Drobyshev V.K., Panchenko I.A., Vorobyov S.V., Yu J. Evolution of Mechanical Properties of Medium-Entropy Alloys of the CoCrNbMnNi System. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 138-145. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-138-145>

Введение

В последние годы среднеэнтروпийные сплавы (СЭС) на основе системы Co-Cr-Ni привлекают значительное внимание благодаря их уникальному сочетанию высокой прочности, пластичности и устойчивости к коррозии, что делает их перспективными материалами для различных инженерных применений [1-3]. Одним из ключевых направлений исследований является модификация структуры и механических свойств этих сплавов путем введения легирующих элементов в небольших концентрациях [4-6]. Добавки таких элементов, как ниобий (Nb) и марганец (Mn), даже в малых количествах (до 6 ат.%) способны влиять на фазовый состав, размер зерна, механизмы упрочнения и, как следствие, на прочностно-пластические характеристики Co-Cr-Ni-сплавов. Введение легирующих элементов

может приводить к формированию дисперсных упрочняющих фаз, изменению характера границ зерен, а также к активации различных механизмов упрочнения, включая твердо-растворное, зернограничное и упрочнение за счет выделения вторичных фаз [7-9]. При этом важно отметить, что оптимальный эффект достигается при контролируемом содержании легирующих элементов, поскольку их избыток может привести к хрупкости или снижению пластичности [10-12]. В работе [13] исследуется добавление ниобия (14–18 мас. %) в сплав системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni, где показано, что ниобий способствует формированию твердого раствора на основе ГЦК-решетки, а также карбидов ниобия и марганца, что приводит к увеличению прочности и износостойкости, однако избыток ниобия вызывает неравномерное распределение фаз и снижение свойств. В следующем исследовании [14], посвященном сплавам Co-Cr-Fe-Ni с

различным содержанием Nb (до 0,74 атомных долей), установлено, что небольшие добавки ниобия приводят к образованию упрочняющих фаз (например, Laves-фазы и ϵ -фазы), что значительно повышает твёрдость и предел прочности при растяжении, однако при избытке ниобия наблюдается хрупкость из-за избытка интерметаллидных фаз.

Современные исследования подтверждают, что добавление легирующих элементов в сплавы на основе CoCrNi (или близких к ним систем) даже в небольших количествах может изменить механические свойства за счёт образования вторичных фаз, однако избыток процентного содержания легирующих элементов приводит к ухудшению пластичности и равномерности структуры. Для детального изучения изменения прочности, микротвёрдости, нанотвёрдости и модуля Юнга было выбрано четыре среднеэнтропийных сплава: 1) $Nb_2Mn_2Ni_{30}Co_{40}Cr_{26}$; 2) $Nb_2Mn_2Ni_{36}Co_{40}Cr_{20}$; 3) $Nb_2Mn_4Ni_{34}Co_{40}Cr_{20}$; 4) $Nb_2Mn_4Ni_{40}Co_{40}Cr_{14}$. А также для изучения влияния малых добавок Nb и Mn на механические свойства сплавов системы Co-Cr-Ni.

Материалы и методы исследования

Начальный этап работы заключался в отборе перспективных композиций для исследования. В результате была идентифицирована 31 перспективная композиция, соответствующая трем из четырех термодинамических критериев для образования однофазной структуры в равновесных условиях. Для детального изучения были выбраны четыре среднеэнтропийных сплава: 1) $Nb_2Mn_2Ni_{30}Co_{40}Cr_{26}$; 2) $Nb_2Mn_2Ni_{36}Co_{40}Cr_{20}$; 3) $Nb_2Mn_4Ni_{34}Co_{40}Cr_{20}$; 4) $Nb_2Mn_4Ni_{40}Co_{40}Cr_{14}$. Среди них композиция $Co_{40}Cr_{12}Nb_2Mn_6Ni_{40}$ продемонстрировала наибольший расчетный предел текучести, составляющий 321 МПа при комнатной температуре, что было обусловлено оптимальным содержанием марганца (6 ат. %), атомный объем которого ($12,6 \text{ \AA}^3$) превышает таковой у других элементов системы. Расчеты также свидетельствовали о высокой температурной стабильности данного сплава.

Слитки были изготовлены методом литья в вакуумной печи в форме усеченного конуса (диаметры оснований 50 и 5 мм, высота 15 мм). Синтез элементов проводили в медных водоохлаждаемых тиглях с использованием шихты из чистых металлов (Nb, Mn, Co, Ni, Cr). Для минимизации окисления атмосферу в камере дважды заменяли аргоном. Плавление осуществляли вольфрамовым электродом при параметрах тока 200–500 А и напряжения до 20 В. Протокол синтеза включал два вакуумных цикла: первый состоял из двукратной плавки с переворотом слитка, а второй — из четырехкратной. После начальных плавок для удаления образовавшегося черного нагара выполняли кратковременную продувку воздухом с последующей очисткой камеры и поверхностей слитков спиртом. Для обеспечения гомогенности расплава перед вторым циклом слиток устанавливали вертикально, а первую плавку в данном цикле проводили с полным перетеканием материала в горизонтальное положение. Охлаждение после каждой плавки длилось не менее 1 часа в атмосфере аргона.

Для проведения комплекса испытаний на растяжение, микро-, нанотвёрдости, модуля упругости из полученных слитков методом электроэрозивной резки (станок М7732) были изготовлены образцы. Механические испытания на одноосное растяжение проводили на образцах прямоугольного сечения с рабочей длиной 20 мм, шириной 9,8 мм и толщиной 3,2 мм. Испытания выполняли на универсальной разрывной машине SUBRAMAX PMBC – 50 – А – 1 – 024 в условиях комнатной температуры при постоянной скорости нагружения 0,5 мм/мин до момента разрушения.

Исследования нанотвёрдости и модуля Юнга, а также измерения микротвёрдости проводили на приборе «Наноскан-4D». Для этого готовились полированные шлифы размером 1×1 см. Нанотвёрдость и модуль упругости определяли в соответствии со стандартом ISO 14577 с использованием алмазной трехгранной пирамиды Берковича при нагрузке 100 мН. Для получения среднего значения на каждом образце выполняли 10 индентирований, расстояние между отпечатками (40 мкм) исключало взаимное влияние зон пластической деформации. Измерение микротвёрдости проводили на том же приборе, но с увеличенной нагрузкой на индентор 1 Н (100 г).

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты измерений микротвёрдости и модуля Юнга сплавов $Nb_2Mn_2Ni_{30}Co_{40}Cr_{26}$, $Nb_2Mn_2Ni_{36}Co_{40}Cr_{20}$, $Nb_2Mn_4Ni_{34}Co_{40}Cr_{20}$ и $Nb_2Mn_4Ni_{40}Co_{40}Cr_{14}$ (рис. 1, а) демонстрируют отчётливую зависимость механических свойств от химического состава. Наибольшие значения микротвёрдости и модуля Юнга наблюдаются для сплавов $Nb_2Mn_2Ni_{36}Co_{40}Cr_{20}$ и $Nb_2Mn_4Ni_{34}Co_{40}Cr_{20}$, тогда как для $Nb_2Mn_2Ni_{30}Co_{40}Cr_{26}$ отмечается их снижение. Все исследованные материалы характеризуются однофазной структурой с гранцентрированной кубической (ГЦК) решёткой, что указывает на отсутствие вторичных фаз и позволяет связать различия свойств с изменением степени твердорастворного упрочнения и локальных искажений кристаллической решётки. Подобные закономерности хорошо согласуются с данными по средне- и высокоэнтропийным сплавам системы Co-Cr-Ni [15-17], где изменение химического состава при сохранении ГЦК-структуры приводит к значительному изменению механических свойств за счёт искажений решётки и вариаций плотности дефектов.

Ниобий, несмотря на низкую концентрацию, оказывает выраженное твердорастворное упрочнение, обусловленное атомной несообразностью и локальными искажениями решётки. Присутствие Nb, создающего сильные искажения в ГЦК-решётке, вероятно, определяет максимум микротвёрдости и модуля Юнга у сплавов $Nb_2Mn_2Ni_{36}Co_{40}Cr_{20}$ и $Nb_2Mn_4Ni_{34}Co_{40}Cr_{20}$.

В системах Co-Cr-Ni повышение содержания Mn стабилизирует ГЦК-решётку [18-20], однако при этом усиливает деформационное упрочнение, связанное с дислокационным и двойниковым механизмами. В исследуемых сплавах увеличение доли Mn приводит к росту твёрдости и модуля упругости. Различия между микротвёрдостью и модулем Юнга могут быть

связаны с неоднородностью распределения Nb и Mn. Микротвёрдость отражает сопротивление пластической деформации, тогда как модуль Юнга зависит от характера межатомных связей и упругих искажений решётки. Незначительное снижение модуля может указывать на повышенную плотность дефектов или наличие микропор.

Измерения наномеханических свойств сплавов системы NbMnNiCoCr (рис. 1, б) показали, что изменение содержания Mn, Ni и Cr оказывает влияние на нанотвёрдость и модуль Юнга. Как видно из графика, нанотвёрдость сплавов изменяется в диапазоне 2,04–2,29 ГПа, достигая максимума у состава Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀, в то время как модуль Юнга варьируется от 61 до 156 ГПа. Сравнение с результатами микротвёрдости (HV) показывает схожие тенденции. Значения микротвёрдости изменяются от 76,6 до 140,7 HV, и максимум также наблюдается у сплава Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀, что подтверждает влияние твердо-растворного упрочнения как основного механизма повышения прочности в данной системе. Различия между нанотвёрдостью и микротвёрдостью связаны с размером отпечатка: при наноиндентировании измеряется локальное сопротивление деформации вблизи поверхности, тогда как микротвёрдость определяет усреднённый отклик макроскопического объёма, включая влияние границ зёрен и возможных микродефектов.

При сопоставлении с результатами испытаний на растяжение (рис. 2) наблюдается, что тенденции изменения нанотвёрдости и модуля Юнга частично коррелируют с поведением предела прочности. Наибольший предел прочности (641 МПа) зафиксирован у сплава Nb₂Mn₂Ni₃₀Co₄₀Cr₂₆, обладающего сравнительно низкой микротвёрдостью и нанотвёрдостью. Это может быть связано с высокой пластичностью и равномерной деформацией без раннего локализованного разрушения. Напротив, сплав Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀ демонстрирует высокие значения H и HV, но меньший предел прочности 533 МПа, что может указывать на локализацию деформации и ограниченную способность к упрочнению при растяжении. Между наномеханическими свойствами и пределом прочности прослеживается обратная зависимость, отражающая компромисс между твёрдостью и пластичностью материала.

Для углубленного понимания механизмов, обусловивших такой компромисс свойств, был выбран сплав Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀, поскольку его сочетание повышенной микро- и нанотвёрдости со сравнительно низкой прочностью на растяжение предполагает нетривиальный характер разрушения. Анализ поверхности излома сплава Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀ после одноосного растяжения показал, что разрушение носит преимущественно вязкий характер (рис. 3).

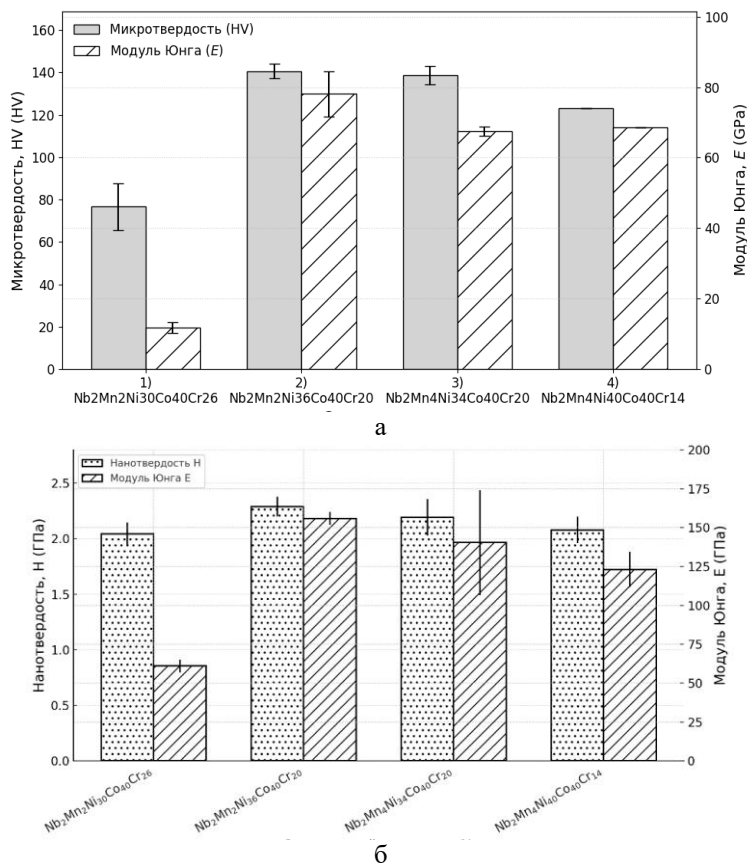


Рис. 1. Механические свойства спреднеэнтروпийных сплавов: а – микротвёрдость и модуль Юнга; б – нанотвёрдость и модуль Юнга

Fig. 1. Mechanical properties of medium-entropy alloys: а is microhardness and Young's modulus б is nanohardness and Young's modulus

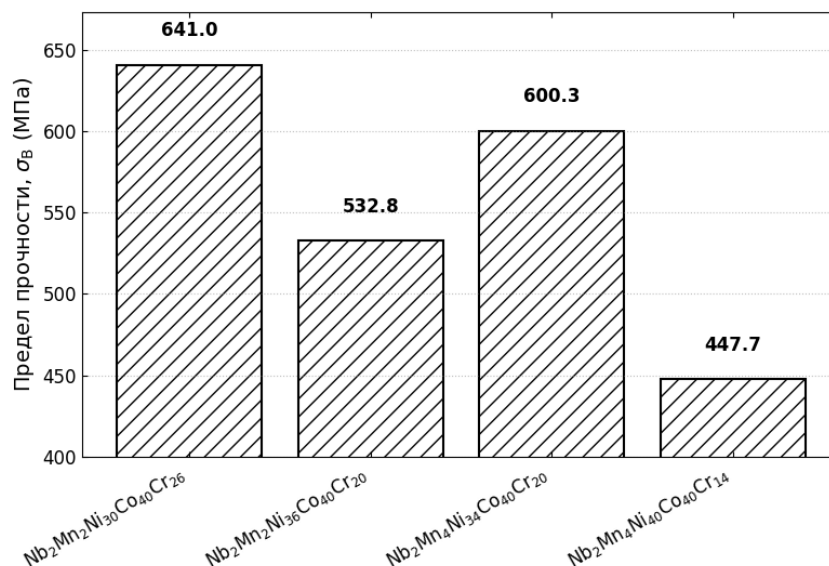


Рис. 2. Результаты растяжения сплавов системы NbMnNiCoCr
 Fig. 2. Tensile test results of NbMnNiCoCr system alloys

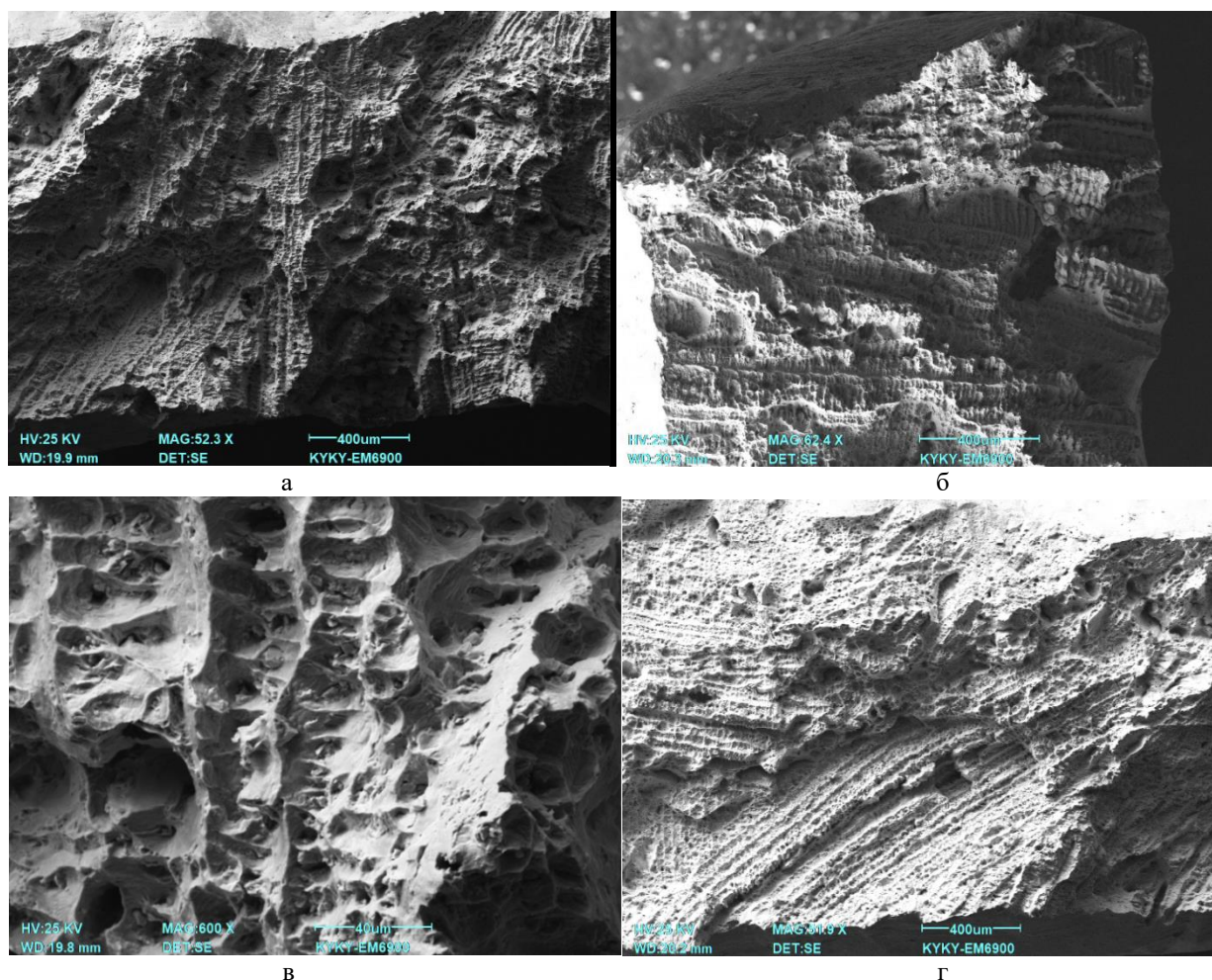


Рис. 3. Растяжение и исследование излома сплава Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀: а-г – поверхность излома, содержащая микропоры и ямки разрушения
 Fig. 3. Tensile testing and fracture study of the Nb₂Mn₂Ni₃₆Co₄₀Cr₂₀ alloy: а-г are fracture surface containing micropores and dimples

Макроскопический анализ демонстрирует неоднородную, волокнистую поверхность, что является классическим признаком пластичности. Однако наряду с этим присутствуют признаки квазихрупкого/сдвигового разрушения в виде выраженных параллельных гребнеобразных узоров, исходящих от концентраторов напряжений. Это свидетельствует о смешанном режиме разрушения, при котором трещина распространялась не только путем слияния микропор, но и через зоны локализованного сдвига. Микроскопический анализ подтверждает доминирование вязкого механизма через наличие классического ямочного рельефа. Большинство ямок имеют вытянутую эллипсоидную форму, ориентированную по направлению максимальных касательных напряжений, что указывает на активное участие сдвиговых деформаций. В то же время более изометричные ямки в центральной части ассоциируются с нормальными отрывными напряжениями. Типичный диаметр ямок составляет 5–10 мкм, а включения, служащие очагами их зарождения, имеют размер менее 2 мкм (см. таблицу). Таким образом, излом характеризуется смешанным вязко-квазихрупким режимом, инициированным у концентраторов напряжений и распространяющимся путем слияния микропор.

Таблица. Сводная таблица оценочного количества и размера микроструктурных особенностей
Table. Summary table of estimated number and size of microstructural features

Характеристика	Доля от общего количества (N)	Размер, мкм	Визуальная оценка
Ямки/ углубления	78%	5–10	Эллипсоидной формы, ориентированные вдоль направления сдвига
Поры / Микропустоты	19%	10–20	Углубления, являющиеся центрами слияния микропор
Включения	3%	< 2	Небольшие частицы

Заключение

1. Установлено, что в сплавах системы Nb-Mn-Ni-Co-Cr добавление ниобия приводит к выраженному твердорастворному упрочнению за счёт атомных искажений кристаллической решётки. Наибольшие значения микротвёрдости и модуля Юнга зафиксированы для состава Nb₂Mn₂Ni₁₃₆Co₄₀Cr₂₀, что указывает на оптимальное сочетание степени искажения решётки. Снижение данных характеристик при дальнейшем изменении содержания Mn и Cr обусловлено ослаблением твердорастворного эффекта и возможной локальной неоднородностью распределения элементов. В целом легирование Nb и Mn позволяет эффективно регулировать уровень твёрдости.

2. Излом сплавов при одноосном растяжении характеризуется следующими ключевыми чертами. Высокоэнергетический вязкий излом, подтверждаемый обширным ямочным рельефом. Вязкий механизм, а также смешанный вязко-квазихрупкий/сдвиговый, где макроскопические линейные узоры указывают на направленное развитие трещины, возможно, через зоны локализованного сдвига. Разрушение зарождается в зонах концентраторов напряжений и распространяется путем активного слияния микропор, которые деформируются в направлении сдвига. Размер ямок составил 5–10 мкм, а более крупные поры/микропустоты имели размер 10–20 мкм. Включения, служащие очагами зарождения, имеют размер менее 2 мкм.

Список источников

- Yen, J., & Hsueh, C. (2025). Effects of Ti and Mo Additions on Microstructures and Mechanical Properties of CoCrNi Medium Entropy Alloys. *Materials Science and Engineering: A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147943>.
- Chen, P., Chen, P., You, J., & Hsueh, C. (2025). Exploring effects of molybdenum and titanium contents on microstructure and mechanical properties of CoCrNi medium entropy alloy films. *Surface and Coatings Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131587>.
- Chang, W., & Hsueh, C. (2023). Strengthening of CoCrNi medium entropy alloy with Ti additions. *Intermetallics*. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.108072>.
- Lee, D., Agustianingrum, M., Park, N., & Tsuji, N. (2019). Synergistic effect by Al addition in improving mechanical performance of CoCrNi medium-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.005>.
- Chang, R., Fang, W., Bai, X., Xia, C., Zhang, X., Yu, H., Liu, B., & Yin, F. (2019). Effects of tungsten additions on the microstructure and mechanical properties of CoCrNi medium entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.235>.
- Lin, Y., Lu, Y., & Hsueh, C. (2023). Strengthening of CoCrNi medium entropy alloy with gadolinium additions. *Vacuum*. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111969>.
- Malladi, S., Riabov, D., Guo, S., & Nyborg, L. (2024). Additive Manufacturing of Interstitial Nitrogen-Strengthened CoCrNi Medium Entropy Alloy. *Advanced Engineering Materials*, 26. <https://doi.org/10.1002/adem.202401182>.
- Bi, X., Li, R., Yuan, Z., Cheng, J., Guan, D., & Zhang, P. (2024). Laser-directed energy deposition of a high performance additively manufactured (CoCrNi)₉₄(TiAl)₆ medium-entropy alloy with a novel core-shell structured strengthening phase. *Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.103971>.
- Chung, S., Lee, T., Jeong, W., Kong, B., & Ryu, H. (2023). Additive Manufacturing of Oxide Dispersion-Strengthened CoCrNi Medium-Entropy Alloy by in situ Oxide Synthesis. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171340>.
- Lin, Y., & Hsueh, C. (2024). Mitigation of strength-ductility trade-off of CoCrNi medium entropy alloys with heterogeneous structure by controlled Gd addition and an-

- nealing. *Materials Science and Engineering: A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146630>.
- An, N., Sun, Y., Gao, L., Wu, Y., Xue, J., Li, Z., & Hui, X. (2022). Long-term structural stability and excellent mechanical properties of CoCrNi system medium entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165206>.
 - Guo, L., Lu, Y., & Hsueh, C. (2023). Effects of Erbium Addition on Microstructure and Mechanical Properties of CoCrNi Medium Entropy Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08317-2>.
 - Kvon, S., Issagulov, A., Kulikov, V., & Arinova, S. (2024). Niobium's Effect on the Properties of a Quasi-High-Entropy Alloy of the CoCrFeMnNi System. *Metals*. <https://doi.org/10.3390/met14050564>.
 - Sunkari, U., Reddy, S., Athira, K., Chatterjee, S., & Bhattacharjee, P. (2020). Effect of niobium alloying on the microstructure, phase stability and mechanical properties of CoCrFeNi₂.1Nb_x high entropy alloys: Experimentation and thermodynamic modeling. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 793, 139897. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139897>.
 - Konovalov S.V., Drobyshev V. K., Panchenko I.A., Li H. Structure and mechanical properties of high-entropy alloys of the CoCrZrMnNi system with different Zr and Mn contents produced by vacuum-induction melting // *Frontier Materials & Technologies*. 2025, vol. 1, pp. 21-34. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2025-1-71-2>
 - Hua, D., Zhou, Q., Shi, Y., Li, S., Hua, K., Wang, H., Li, S., & Liu, W. (2023). Revealing the deformation mechanisms of <110> symmetric tilt grain boundaries in CoCrNi medium-entropy alloy. *International Journal of Plasticity*. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2023.103832>.
 - Wang, R., Hu, L., Geng, P., Zhang, W., & Du, C. (2025). Deformation and strengthening mechanism of non-equiatomic CoCrNi medium entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147864>.
 - Panchenko I. A., Drobyshev V. K., Konovalov S., Bessonov D. A. Structural Change in Co–Cr–Fe–Mn–Ni Alloys upon Variation in Mn and Fe Concentrations // *Technical Physics Letters*. 2024. <https://doi.org/10.1134/S1063785024700391>
 - He, J., Wu, N., Wang, C., Wu, Z., Li, Y., & Luo, F. (2023). Multi-stage strain-hardening and nano-twinning strengthening Co₄₀Cr₂₂Ni₁₅Fe₁₄Mo₄Si₃Mn₂ multi-principal element alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.216>.
 - Drobyshev V.K., Konovalov S.V., Panchenko I.A. Microstructural and fractographic analysis of non-equiatomic alloy of Co-Cr-Fe-Mn-Ni system // *Non-Ferrous Metals*. 2024, no. 2, pp. 63-68. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.02.10>
 - mechanical properties of CoCrNi medium entropy alloy films. *Surface and Coatings Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131587>.
 - Chang W., Hsueh C. Strengthening of CoCrNi medium entropy alloy with Ti additions. *Intermetallics*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.108072>.
 - Lee D., Agustianingrum M., Park N., Tsuji N. Synergistic effect by Al addition in improving mechanical performance of CoCrNi medium-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.005>.
 - Chang R., Fang W., Bai X., Xia, C., Zhang X., Yu H., Liu B., Yin F. Effects of tungsten additions on the microstructure and mechanical properties of CoCrNi medium entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.03.235>.
 - Lin Y., Lu Y., Hsueh C. Strengthening of CoCrNi medium entropy alloy with gadolinium additions. *Vacuum*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111969>.
 - Malladi S., Riabov D., Guo S., Nyborg L. Additive Manufacturing of Interstitial Nitrogen-Strengthened CoCrNi Medium Entropy Alloy. *Advanced Engineering Materials*. 2024. 26. <https://doi.org/10.1002/adem.202401182>.
 - Bi X., Li R., Yuan Z., Cheng J., Guan D., Zhang, P. Laser-directed energy deposition of a high performance additively manufactured (CoCrNi)₉₄(TiAl)₆ medium-entropy alloy with a novel core-shell structured strengthening phase. *Additive Manufacturing*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.103971>.
 - Chung S., Lee T., Jeong W., Kong B., Ryu H. Additive Manufacturing of Oxide Dispersion-Strengthened CoCrNi Medium-Entropy Alloy by in situ Oxide Synthesis. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171340>.
 - Lin Y., Hsueh C. Mitigation of strength-ductility trade-off of CoCrNi medium entropy alloys with heterogenous structure by controlled Gd addition and annealing. *Materials Science and Engineering: A*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146630>.
 - An N., Sun Y., Gao L., Wu Y., Xue J., Li Z., Hui X. Long-term structural stability and excellent mechanical properties of CoCrNi system medium entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165206>.
 - Guo L., Lu Y., Hsueh C. Effects of Erbium Addition on Microstructure and Mechanical Properties of CoCrNi Medium Entropy Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08317-2>.
 - Kvon S., Issagulov A., Kulikov V., Arinova S. Niobium's Effect on the Properties of a Quasi-High-Entropy Alloy of the CoCrFeMnNi System. *Metals*. 2024. <https://doi.org/10.3390/met14050564>.
 - Sunkari U., Reddy S., Athira K., Chatterjee S., Bhattacharjee P. Effect of niobium alloying on the microstructure, phase stability and mechanical properties of CoCrFeNi₂.1Nb_x high entropy alloys: Experimentation and thermodynamic modeling. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2020. 793, 139897. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139897>.
 - Konovalov S.V., Drobyshev V.K., Panchenko I.A., Li H. Structure and mechanical properties of high-entropy alloys

References

- Yen J., & Hsueh C. Effects of Ti and Mo Additions on Microstructures and Mechanical Properties of CoCrNi Medium Entropy Alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147943>.
- Chen P., Chen P., You J., Hsueh C. Exploring effects of molybdenum and titanium contents on microstructure and

- of the CoCrZrMnNi system with different Zr and Mn contents produced by vacuum-induction melting. *Frontier Materials and Technologies*. 2025;1:21-34. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2025-1-71-2>
16. Hua D., Zhou Q., Shi Y., Li S., Hua K., Wang H., Li S., Liu W. Revealing the deformation mechanisms of <110> symmetric tilt grain boundaries in CoCrNi medium-entropy alloy. *International Journal of Plasticity*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2023.103832>.
 17. Wang R., Hu L., Geng P., Zhang W., Du C. Deformation and strengthening mechanism of non-equiatom CoCrNi medium entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.147864>.
 18. Panchenko I. A., Drobyshev V. K., Kononov S., Besonov D. A. Structural Change in Co–Cr–Fe–Mn–Ni Alloys upon Variation in Mn and Fe Concentrations. *Technical Physics Letters*. 2024. <https://doi.org/10.1134/S1063785024700391>
 19. He J., Wu N., Wang C., Wu Z., Li Y., Luo F. Multi-stage strain-hardening and nano-twinning strengthening Co₄₀Cr₂₂Ni₁₅Fe₁₄Mo₄Si₃Mn₂ multi-principal element alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.12.216>.
 20. Drobyshev V.K., Kononov S.V., Panchenko I.A. Microstructural and fractographic analysis of non-equiatom alloy of Co–Cr–Fe–Mn–Ni system. *Non-Ferrous Metals*. 2024;(2): 63-68. <https://doi.org/10.17580/nfm.2024.02.10>

Поступила 28.10.2025; принята к публикации 29.01.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 28/10/2025; revised 29/01/2026; published 30/06/2026

Коновалов Сергей Валерьевич – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: kononov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Дробышев Владислав Константинович – аспирант кафедры обработки металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: drobyshv_v.k@mail.ru. ORCID 0000-0002-1532-9226

Панченко Ирина Алексеевна – кандидат технических наук, заведующий научной лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: i.r.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Воробьев Сергей Владимирович – доктор технических наук, главный научный сотрудник управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: sparrow1981@mail.ru. ORCID 0000-0003-3957-0249

Yu J – старший инженер,
Weihai Liyu Industrial Co., Ltd, China.
ORCID 0009-0006-0004-6254

Sergey V. Kononov – DrSc (Eng.), Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: kononov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Vladislav K. Drobyshev – Postgraduate Student of the Department of Metalworking by Pressure and Materials Science of Evraz West Siberian Metallurgical Plant, Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: drobyshv_v.k@mail.ru. ORCID 0000-0002-1532-9226

Irina A. Panchenko – PhD (Eng.), Head of the Scientific Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: i.r.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Sergey V. Vorobyov – DrSc (Eng.), Chief Researcher of the Scientific Research Department, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: sparrow1981@mail.ru. ORCID 0000-0003-3957-0249

Yu J – Senior Engineer,
Weihai Liyu Industrial Co., Ltd, China.
ORCID 0009-0006-0004-6254



К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Галкин В.В.¹, Баженов Е.О.¹, Гаврилов Г.Н.¹, Вашурин А.В.², Черепенькин Д.В.³

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

²НАЗ «Сокол» – филиал АО «Российская самолетостроительная компания „МиГ”», Нижний Новгород, Россия

³АО «ГАЗ», Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Актуальность работы. В машиностроении значительная доля металлических изделий изготавливается методами горячего деформирования, при котором протекают процессы рекристаллизации, влияющие на структурные изменения и механические свойства материала. Аналитический обзор способов построения диаграмм рекристаллизации показал, что использование испытания на осадку является общепринятым способом их построения и имеет ряд нерешенных вопросов: большая трудоемкость построения диаграмм и неточность построения начального участка диаграмм; ограниченная информация о характере разнородности структуры; отсутствие возможности применения диаграмм в производственном процессе, характеризующемся сложным напряженным состоянием. **Цель работы.** Разработка способа построения диаграмм рекристаллизации, обеспечивающего решение вопросов по уменьшению числа испытаний при каждой температуре, возможности оценки разнородности структуры и применения построенных зависимостей рекристаллизации в производственном процессе. Основным направлением их решения явилось применение математических методов и технологий численного моделирования процессов деформирования твердого тела. **Научная новизна.** Для построения диаграмм рекристаллизации разработана имитационная модель осадки цилиндрических образцов, в которой для степеней обжатия 10 и 50% проведена оценка интенсивности деформации на всей поверхности продольных сечений осажённых образцов, в соответствии с координатной сеткой размером 2,0×2,0 мм. Это позволило выделить исследуемые зоны для металлографического анализа по определению среднего размера зерна и его разнородности. Разработанный метод расширил возможности для определения механизмов рекристаллизации в зависимости от температуры и степени деформации. **Результаты.** Апробация разработанного способа проведения при построении зависимости рекристаллизации II рода аустенитной стали X18H10T. Построенные зависимости рекристаллизации, с учетом данных разнородности, расширили возможности оценки механизмов рекристаллизации в интервале температур 1050–1150°C и степени деформации в показателе интенсивности до значения $\varepsilon_1 = 0,75$. **Практическая значимость.** Разработанный способ позволяет одновременно проводить построения диаграмм рекристаллизации III рода, а также проводить построения зависимостей рекристаллизации в зависимости от показателя накопленной (итоговой) деформации.

Ключевые слова: рекристаллизация металлических материалов, интенсивность деформации, величина зерна, зависимости рекристаллизации

© Галкин В.В., Баженов Е.О., Гаврилов Г.Н., Вашурин А.В., Черепенькин Д.В., 2026

Для цитирования

К вопросу построения зависимостей рекристаллизации металлических материалов / Галкин В.В., Баженов Е.О., Гаврилов Г.Н., Вашурин А.В., Черепенькин Д.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 146-155. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-146-155>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ON THE CONSTRUCTION OF RECRYSTALLIZATION DEPENDENCIES FOR METALLIC MATERIALS

Galkin V.V.¹, Bazhenov E.O.¹, Gavrillov G.N.¹, Vashurin A.V.², Cherepenkin D.V.³

¹Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

²Sokol Aircraft Plant, branch of JSC Russian Aircraft Corporation "MiG", Nizhny Novgorod, Russia

³JSC GAZ, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). In mechanical engineering, a significant proportion of metallic products are manufactured by hot deformation processes, during which recrystallization occurs, affecting structural transformations and the mechanical properties of the material. An analytical review of recrystallization diagram construction methods showed that compression testing is the conventional approach; however, it has several unresolved issues, including high labor intensity, insufficient accuracy in determining the initial section of the diagrams, limited information on grain-size heterogeneity, and the inability to directly apply the diagrams to industrial processes characterized by complex stress states. **Objectives.** The research is aimed at development of a method for constructing recrystallization diagrams that reduces the number of tests required at each temperature, enables the assessment of grain-size heterogeneity, and allows the obtained recrystallization dependencies to be applied to industrial deformation processes. The main approach to solving these issues involved the application of mathematical methods and numerical simulation technologies for solid-body deformation processes. **Originality.** A simulation model of cylindrical specimen compression was developed for constructing recrystallization diagrams. The model was used to evaluate the strain intensity over the entire surface of longitudinal sections of compressed specimens at reductions of 10 and 50%, according to a coordinate grid with a spacing of 2.0×2.0 mm. This approach made it possible to identify specific zones for metallographic analysis aimed at determining the average grain size and grain-size heterogeneity. The proposed method expanded the possibilities for identifying recrystallization mechanisms depending on temperature and strain degree. **Result.** The developed method was validated through the construction of type II recrystallization dependencies for X18H10T austenitic steel. The obtained recrystallization dependencies, supplemented by grain-size heterogeneity data, provided enhanced capabilities for evaluating recrystallization mechanisms within the temperature range of 1050-1150°C and for strain intensity values up to $\varepsilon_i = 0,75$. **Practical Relevance.** The proposed method makes it possible to simultaneously construct Type III recrystallization diagrams and to establish recrystallization dependencies as a function of accumulated (total) strain.

Keywords: recrystallization of metallic materials, strain intensity, grain size, recrystallization dependencies

For citation

Galkin V.V., Bazhenov E.O., Gavrillov G.N., Vashurin A.V., Cherepenkin D.V. On the Construction of Recrystallization Dependencies for Metallic Materials. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 146-155. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-146-155>

Введение

В машиностроении большое количество металлических изделий изготавливаются технологиями горячего деформирования, при котором в материале протекает процесс рекристаллизации, характеризующийся полной или частичной заменой деформированных зерен. Процесс рекристаллизации зависит от условий пластического деформирования: температуры, степени, скорости и механической схемы деформации.

Для оценки процесса рекристаллизации используются трехмерные диаграммы в координатах «средний диаметр (площадь) зерна – фактическая степень деформации – температура деформирования (температура отжига)». Структурным параметром, характеризующим процесс рекристаллизации, является средний диаметр (площадь) зерна, который влияет на изменение механических свойств деформированного материала. В качестве двух основных влияющих фак-

торов выбраны температура и степень деформации. В промышленном производстве применяются диаграммы рекристаллизации трех родов. Диаграммы I рода используются для оценки процесса рекристаллизации при отжиге деформированных металлов. Для оценки первичной рекристаллизации в процессе пластической деформации применяются диаграммы II рода. Для оценки процесса рекристаллизации в условиях последующих видов рекристаллизации Д.И. Бережковским [1] предложено построение диаграмм III рода, в которых размер зерна деформированного материала определяется после отжига продолжительностью 1 и 3 часа.

Первые построения диаграмм рекристаллизации в координатах «величина зерна – степень обжатия – температура» и установление закономерной связи между степенями обжатия и величиной зерна относятся к работам Ганеманна и Люкке в 1925 году [2]. Изучение процесса рекристаллизации проводилось на

углеродистых сталях с содержанием 0,06 и 0,49%С. Цилиндрические образцы осаживались под копром на плоскопараллельных бойках в интервале температур 700–1200°C со степенью обжатия до 60%. Величина зерна определялась по месту пересечения диагоналей продольного сечения осаженного образца (метод пересечений Гейна) и соотносилась с относительной деформацией образца по высоте. Описанный метод до настоящего времени является общепринятым, однако имеет ряд нерешенных вопросов:

- большая трудоемкость построения диаграмм и неточность построения начального участка диаграмм до значения пороговой деформации;

- ограниченная информация о характере разнотерности деформируемой структуры;

- отсутствие возможности применения диаграмм рекристаллизации в производственном процессе, характеризующемся сложным напряженным состоянием.

В последующие годы были разработаны новые методы построения диаграмм рекристаллизации, в которых был сохранен вид испытания – обжатие цилиндрических заготовок по высоте. Усовершенствование методов касалось повышения точности оценки степени деформации материала в объеме осаженных заготовок в сопоставлении с размером рекристаллизованного зерна. Из разработанных методов можно выделить метод Е. Зибеля и А. Помпа [3], включивший осадку образцов с применением конических опор с целью ослабления контактного трения. Данный метод не получил развития из-за значительной неравномерности деформированного состояния в образце при степенях обжатия свыше 50%.

Метод обжатия образцов плоскопараллельными бойками был усовершенствован Иг.М. Павловым [4]. Диаграммы строились по размерам зерен, расположенных по вертикальной оси продольного сечения осаженного образца в соответствии с относительной степенью деформации, которая определялась методом ввинченных шурупов. Построенные диаграммы имели неточность, обусловленную тем, что ввинченный шуруп не имеет постоянного соприкосновения с металлом осаживаемого образца.

Следует отметить метод, предложенный Н.И. Корнеевым [5], в котором на четвертой части продольного сечения осаженного образца по всей площади выявлялась максимальная величина зерна, которая соотносилась со степенью его обжатия. В дальнейшем для обеспечения равномерности деформации осаживаемых образцов в последних выполнялись торцевые выточки, заполняемые твердой смазкой, в частности жидким стеклом.

Однако вышеразработанные методы не решили обозначенные вопросы, что было отмечено в работах многих ученых. В трудах С.С. Горелика по рекристаллизации [6] отмечено, что диаграммы рекристаллизации в их общепринятом виде дают ограниченную информацию о характере рекристаллизованной структуры и не отражают существенные ее особенно-

сти, в частности характер разнотерности. В работах Бернштейна М.Л. [7] затрагивались вопросы неоднородности схем напряжений в обрабатываемых материалах при штамповке или прокатке, что приводило к неоднозначному протеканию процессов рекристаллизации в разных зонах одной и той же поковки (поверхность, центр, зона сдвига). Проблемой является невозможность отражения сложного характера рекристаллизованной структуры в рамках одной диаграммы. В книге А.Н. Орлова, В.Н. Перевезенцева, В.В. Рыбина о границах зерен [8] указано, что для исследования формируемой неоднородной разнотерной структуры и определения температурно-временных интервалов первичной и собирательной рекристаллизации требуется использование существенно большего числа областей металлографического шлифа. Также во всех работах отмечена недостаточная возможность решения вопросов производства с применением диаграмм рекристаллизации существующего вида.

Начало нашего тысячелетия охарактеризовалось развитием цифровой информатики и программирования, в частности разработкой современных математических методов и компьютерных технологий численного моделирования физико-механических процессов деформирования твердого тела. Большое количество работ проведено по моделированию деформации и эволюции микроструктур при рекристаллизации [9, 10]. Результатом математического моделирования является разработка имитационных моделей технологических процессов, реализация которых позволяет сократить дорогостоящие лабораторные и производственные испытания [11-13]. В обработке материалов давлением математическое моделирование технологических процессов с применением программ, основанных на методе конечных элементов, увеличило число аналитических методов, определяющих напряженно-деформированное состояние материала [14, 15]. Это определило возможность разработки имитационной модели осадки цилиндрических образцов под плоскими плитами как вида испытания и применения специализированных программ определения размера зерна при построении зависимостей рекристаллизации, что и явилось основным содержанием разработанного способа [16].

Материалы и методы исследования

Разработанный способ построения зависимостей рекристаллизации отличается от существующих тем, что замеры зерна проводятся на поверхности продольного сечения осаженных образцов в центрах ячеек нанесенной координатной сетки размером 2,0×2,0 мм и сопоставляются со степенью деформации в показателе интенсивности, определенной методом математического моделирования. Способ основан на следующих положениях:

- использование неравномерности деформации материала при осадке под плоскими плитами, которая

позволяет на продольных сечениях двух осажённых образцов с относительными деформациями 10 и 50% получить набор значений фактических деформации, заменяющих степени обжатия: 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 и 80%;

– применение математического моделирования процесса осадки под плоскими плитами со степенями обжатия 10 и 50% для определения степени деформации в показателе интенсивности в центрах ячеек координатной сетки размером $\sim 2,0 \times 2,0$ мм на продольных сечениях осажённых образцов и последующего выбора ячеек в порядке плавного возрастания степени деформации для металлографического анализа;

– построения зависимостей рекристаллизации путем сопоставления значений интенсивности деформации и размера среднего диаметра (площади) зерна, определяемых металлографическим методом в выбранных ячейках координатной сетки на шлифах продольных сечений осажённых образцов с применением компьютерных программ измерения.

В разработанном способе диаметры образцов d_0 выбраны в интервале 45–50 мм с относительной длиной $l_0 = h_0/d_0$ в пределах 1,4–2,2, что определяет их устойчивость при осадке. Для испытаний выбраны два основных типоразмера: $d_0 = 45$ мм, $h_0 = 90$ мм, $l_0 = 2,0$; $d_0 = 50$ мм, $h_0 = 70$ мм, $l_0 = 1,4$. Относительная длина образца влияет на максимальную неравномерность деформации в осажённом образце и показатели ее интенсивности.

В данной статье приведено построение диаграмм рекристаллизации II рода стали аустенитного класса X18N10T при следующих условиях испытания:

– вид материала и размеры заготовок: горячекатаный прокат, цилиндрические образцы с плоскими торцами ($d_0 = 50$ мм, $h_0 = 70$ мм, $l_0 = 1,4$) и круговой механической обточкой;

– условия нагрева заготовок: камерная электрическая печь с отклонениями по температуре $\pm 10^\circ\text{C}$; температуры нагрева: 900, 1000, 1050, 1100, 1150 $^\circ\text{C}$; скорость нагрева 3 мм/мин;

– вид испытаний: осадка на механическом прессе со степенями обжатия 10 и 50% при каждой температуре образцов.

В разработанном способе математическое моделирование процессов деформирования выполняется с применением программ, основанных на методе конечных элементов. В данном исследовании для моделирования осадки со степенью обжатия 10 и 50% использован программный комплекс DEFORM-3D и твердотельные модели инструмента (плоских бойков) и цилиндрического образца, разработанные в программном пакете SolidWorks 2007 (рис. 1, а).

Достоверность математического моделирования операции осадки было подтверждено сопоставлением данных моделирования и размеров осажённых образцов со степенями деформации: $\varepsilon_h^1 = 10\%$ (высота $h_1 = 63$ мм, диаметр торца $d_t^1 = 25$ мм, максимальный диаметр $d_{\max}^1 = 52$ мм), $\varepsilon_h^2 = 50\%$ (высота $h_2 = 35$ мм, диаметр торца $d_t^2 = 46$ мм, максимальный диаметр $d_{\max}^2 = 48$ мм). Несовпадение размеров по диаметру торцов образцов составило 0,2 мм, по максимальному диаметру – 0,15 мм.

Значения интенсивности деформации ε_i в продольных сечениях осажённых образцов при степенях осадки 10 и 50% в соответствии с координатной сеткой с ячейкой $\sim 2,0 \times 2,0$ мм (рис. 1, б, в) приведены в табл. 1 и 2, на основании которых построены поля деформаций материала (рис. 2).

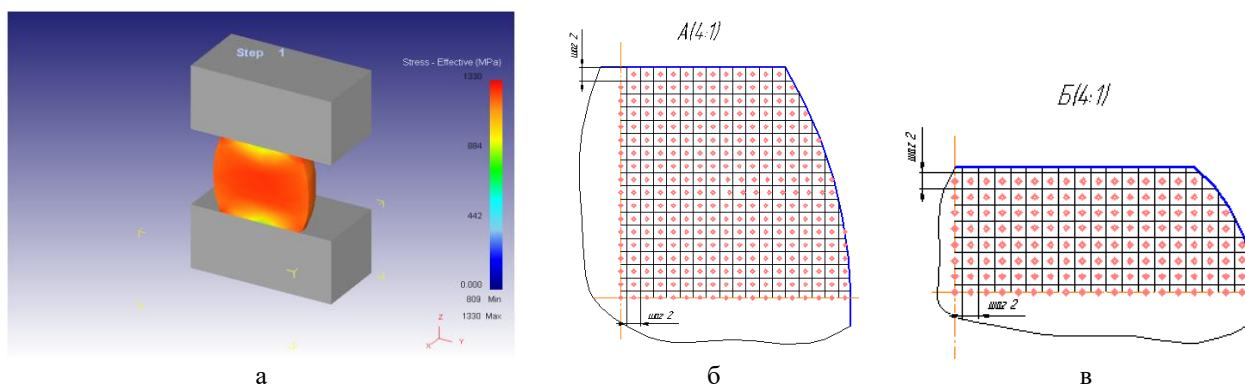


Рис. 1. 3D-модель математического моделирования операции осадки (а) и координатная сетка с ячейкой размером $2,0 \times 2,0$ мм на 1/4 части продольного сечения образцов, осажённых со степенью деформации 10 и 50% (б, в)

Fig.1. 3D model of the compression process simulation (а) and coordinate grid with a cell size of 2.0×2.0 mm on 1/4 of the longitudinal section of specimens compressed to deformation degrees of 10 and 50% (б, в)

Таблица 1. Значения интенсивности деформации ϵ_i в продольном сечении осажённого образца из стали X18H10T с относительной степенью деформации $\epsilon_h^1 = 10\%$

Table 1. Strain intensity values ϵ_i in the longitudinal section of an X18H10T steel specimen compressed to a relative deformation degree of $\epsilon_h^1 = 10\%$

Номер ряда по высоте образца	Номер ячейки по горизонтали от края до продольной оси образца							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	Интенсивность деформации ϵ_i							
1 (верх)	0,233	0,084	0,042	0,019	0,013	0,011	0,007	0,007
2	0,109	0,104	0,083	0,063	0,041	0,026	0,019	0,019
3	0,104	0,111	0,109	0,099	0,084	0,068	0,058	0,053
4	0,111	0,119	0,125	0,129	0,123	0,121	0,114	0,115
5	0,122	0,133	0,14	0,148	0,156	0,162	0,164	0,164
6	0,132	0,143	0,152	0,163	0,173	0,18	0,186	0,187
7	0,143	0,152	0,159	0,169	0,178	0,184	0,188	0,189
8	0,15	0,156	0,162	0,169	0,175	0,179	0,182	0,182
9	0,156	0,159	0,162	0,166	0,169	0,171	0,173	0,173
10	0,16	0,16	0,16	0,162	0,163	0,164	0,164	0,164
11	0,161	0,16	0,16	0,159	0,159	0,16	0,16	0,16

Таблица 2. Распределение интенсивности деформации ϵ_i в продольном сечении осажённого образца из стали X18H10T с относительной степенью деформации $\epsilon_h^1 = 50\%$

Table 2. Distribution of strain intensity ϵ_i in the longitudinal section of an X18H10T steel specimen compressed to a relative deformation degree of $\epsilon_h^1 = 50\%$

Номер ряда по высоте образца	Номер ячейки по горизонтали от края до продольной оси образца									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Интенсивность деформации ϵ_i									
1(верх)		0,791	0,548	0,367	0,227	0,157	0,109	0,072	0,049	0,043
2		0,512	0,462	0,386	0,298	0,236	0,180	0,151	0,153	0,142
3	0,458	0,479	0,492	0,462	0,418	0,386	0,352	0,323	0,294	0,294
4	0,484	0,525	0,532	0,536	0,528	0,524	0,513	0,468	0,465	0,426
5	0,499	0,525	0,557	0,586	0,605	0,602	0,603	0,598	0,596	0,607
6	0,514	0,533	0,590	0,615	0,639	0,665	0,692	0,699	0,706	0,709
7	0,530	0,570	0,622	0,663	0,686	0,703	0,718	0,732	0,736	0,736
8 (середина)	0,566	0,610	0,640	0,662	0,679	0,695	0,714	0,728	0,731	0,732

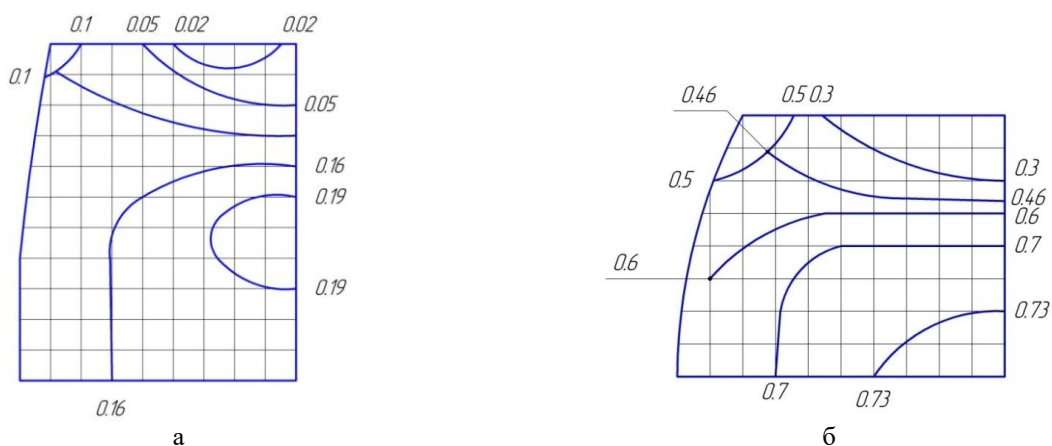


Рис. 2. Поля деформаций в 1/4 части продольного сечения осажённых образцов со степенью деформации ϵ_h : а – 10%; б – 50% (цифры – интенсивность деформации ϵ_i)

Fig. 2. Strain fields in 1/4 of the longitudinal section of specimens compressed to deformation degrees ϵ_h of: а is 10%; б is 50% (numbers indicate strain intensity values ϵ_i)

Для металлографического анализа на основании анализа распределения интенсивности деформации и ее значений в продольных сечениях осаженных образцов со степенями 10 и 50% (табл. 3, 4) выбраны ячейки вертикальных рядов (зоны), соприкасающиеся с продольной осью осаженных образцов. Значения интенсивности деформации в смежных ячейках шлифа позволяют плавно оценить интенсивность развития процесса рекристаллизации и ее механизмы, а также дать объективную оценку степени разнотекстурности микроструктуры, в том числе до значения пороговой деформации.

В соответствии с расположением выбранных зон под шлифы были вырезаны вертикальные участки из половинок осаженных заготовок (рис. 3).

Сравнение значений интенсивности деформации в вертикальных рядах осаженных образцов со степенью деформации 10 и 50% показало, что для построения зависимостей рекристаллизации рационально использовать результаты, полученные при 50%-м обжатии. Значения, полученные при осадке 10%, уточняют построение зависимости рекристаллизации

до значений пороговой деформации.

Металлографический анализ включил оценку среднего размера зерна по ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна» с использованием комплекса программно-аппаратного анализа микроструктуры поверхности Thixomet (регистрационный № 48386). Программа обеспечивает мониторинг микроструктуры цифровых фотографий с увеличением до $\times 1000$, определение средней площади зерна, числа зерен на фотографии и их распределение по баллу зерна.

На рис. 4 приведена микроструктура недеформированного горячекатаного проката стали X18H10T и ее металлографическая обработка с применением программы.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты микроструктурного анализа стали осаженных заготовок после обжатия, одного и трех-часовых отжигов в ячейках вертикального ряда №8 (см. табл. 2) приведены в табл. 5.

Таблица 3. Значения интенсивности деформации ε_i в центральном вертикальном ряду осаженного образца из стали X18H10T с относительной степенью деформации $\varepsilon_h^1 = 10\%$

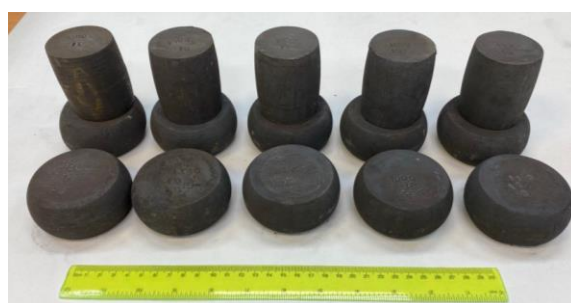
Table 3. Strain intensity values ε_i in the central vertical row of an X18H10T steel specimen compressed to a relative deformation degree of $\varepsilon_h^1 = 10\%$

Номер ячейки вертикального ряда №8 сверху вниз (см. табл. 1)										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Интенсивность деформации ε_i										
0,007	0,019	0,053	0,115	0,164	0,187	0,189	0,182	0,173	0,164	0,16

Таблица 4. Значения интенсивности деформации ε_i в центральном вертикальном ряду осаженного образца из стали X18H10T с относительной степенью деформации $\varepsilon_h^1 = 50\%$

Table 4. Strain intensity values ε_i in the central vertical row of an X18H10T steel specimen compressed to a relative deformation degree of $\varepsilon_h^1 = 50\%$

Номер ячейки вертикального ряда №8 сверху вниз (см. табл. 2)							
1	2	3	4	5	6	7	8
Интенсивность деформации ε_i							
0,043	0,142	0,294	0,426	0,607	0,709	0,736	0,732



а



б

Рис. 3. Фотографии осаженных образцов со степенями деформации 10 и 50% (а) и вырезанных вертикальных участков из половинок осаженных заготовок (б) под шлифы

Fig. 3. Photographs of specimens compressed to deformation degrees of 10 and 50% (a) and vertical sections cut from the halves of the compressed specimens for metallographic sample preparation (б)

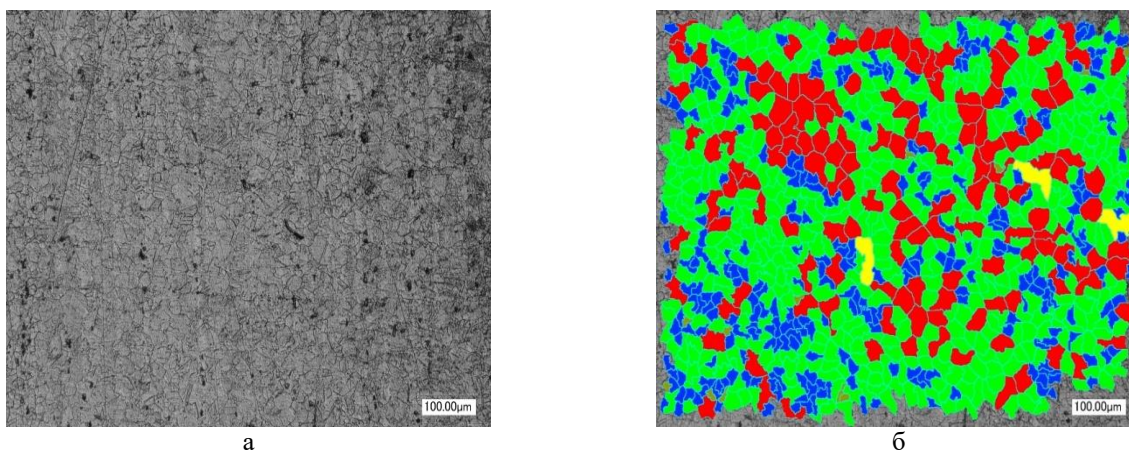


Рис. 4. Микроструктура горячекатаного проката стали X18H10T (а), картина разделения микроструктуры на зоны по баллу зерна (б)

Fig.4. Microstructure of hot-rolled X18H10T steel (a); microstructure zoning according to size number (б)

Таблица 5. Средняя площадь зерна, число зерен и их распределение по баллу зерна в зависимости от интенсивности деформации ϵ_i в продольном сечении осаженного образца из стали X18H10T со степенью обжатия $\epsilon_h^2 = 50\%$

Table 5. Average grain area, number of grains, and their distribution by grain size number as a function of strain intensity ϵ_i in the longitudinal section of an X18H10T steel specimen compressed to a reduction ratio of $\epsilon_h^2 = 50\%$

	Номер ячейки					
	2	3	4	5	6	7
	Интенсивность деформации ϵ_i					
	0,142	0,294	0,426	0,607	0,709	0,736
Испытание при 1050°C						
Средняя площадь зерна, мкм ²	511	810	883	808	648	855
Число зерен	516	478	428	486	446	404
Распределение по баллу зерна (% по сумме баллов)	G ₆ (2%) G ₇ (15%) G ₈ (44%) G ₉ (33%) G ₁₀ (5%)	G ₅ (3%) G ₆ (9%) G ₇ (32%) G ₈ (25%) G ₉ (21%) G ₁₀ (9%)	G ₆ (17%) G ₇ (28%) G ₈ (29%) G ₉ (18%) G ₁₀ (7%)	G ₆ (15%) G ₇ (23%) G ₈ (32%) G ₉ (19%)	G ₆ (7%) G ₇ (26%) G ₈ (36%) G ₉ (23%) G ₁₀ (7%)	G ₇ (24%) G ₈ (25%) G ₉ (27%) G ₁₀ (14%)
Испытание при 1100°C						
Средняя площадь зерна, мкм ²	20709	5305	2222	815	736	625
Число зерен	200	230	313	420	416	400
Распределение по баллу зерна (% по сумме баллов)	G ₂ (43%) G ₃ (21%) G ₄ (18%) G ₅ (7%) G ₆ (6%)	G ₃ (15%) G ₄ (18%) G ₅ (12%) G ₆ (20%) G ₇ (15%)	G ₄ (12%) G ₅ (11%) G ₆ (17%) G ₇ (22%) G ₈ (22%) G ₉ (11%)	G ₆ (16%) G ₇ (30%) G ₈ (27%) G ₉ (18%) G ₁₀ (8%)	G ₆ (13%) G ₇ (27%) G ₈ (28%) G ₉ (23%) G ₁₀ (8%)	G ₆ (10%) G ₇ (22%) G ₈ (27%) G ₉ (26%) G ₁₀ (15%)
Испытание при 1150°C						
Средняя площадь зерна, мкм ²	18484	17646	17930	13184	9377	7344
Число зерен	200	200	200	200	200	200
Распределение по баллу зерна (% по сумме баллов)	G ₁ (15%) G ₂ (6%) G ₃ (36%) G ₄ (25%) G ₅ (8%)	G ₂ (37%) G ₃ (21%) G ₄ (22%) G ₅ (15%)	G ₁ (13%) G ₂ (16%) G ₃ (31%) G ₄ (14%) G ₅ (13%)	G ₂ (21%) G ₃ (22%) G ₄ (26%) G ₅ (17%) G ₆ (7%)	G ₂ (9%) G ₃ (15%) G ₄ (27%) G ₅ (24%) G ₆ (15%)	G ₂ (6%) G ₃ (16%) G ₄ (24%) G ₅ (21%) G ₆ (15%) G ₆ (11%)

На основании сопоставления полученных значений средней площади зерна в исследуемых ячейках координатной сетки на шлифах продольных сечений осаженных образцов с величиной интенсивности деформации построены зависимости рекристаллизации П рода (рис. 5). Для построения начального участка зависимостей до величины интенсивности деформации $\varepsilon_i = 0,142$ использованы результаты микроструктурного анализа центральных вертикальных рядов осаженных образцов со степенью обжатия 10%.

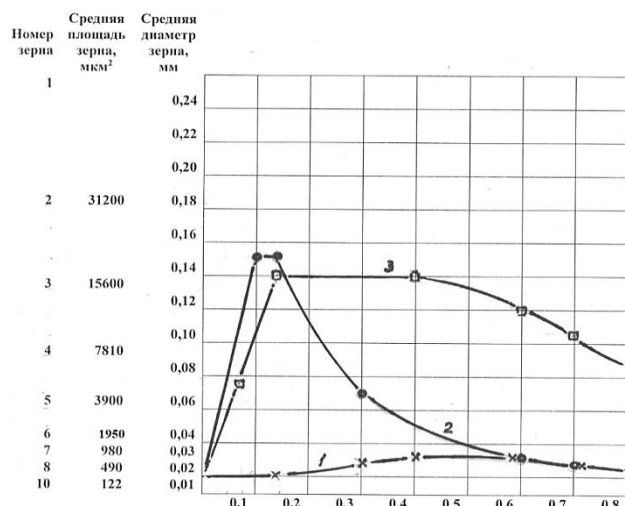


Рис. 5. Зависимости рекристаллизации аустенитной стали X18H10T при температурах 1050°C (кривая 1), 1100°C (кривая 2) и 1150°C (кривая 3)

Fig. 5. Recrystallization dependencies of X18H10T austenitic steel at temperatures of 1050°C (curve 1), 1100°C (curve 2), and 1150°C (curve 3)

Структурно-деформационный анализ зависимостей рекристаллизаций совместно с оценкой числа зерен и их распределения по баллу зерна, используя основные положения работ А.П. Гуляева [17], С.С. Горелика и других ученых [3, 4], позволяет сделать следующие выводы.

При температуре 1050°C при малой степени деформации $\varepsilon_i = 0,043$ первичная рекристаллизация практически не наблюдается, структура 6-го балла зерна наблюдается в объеме G_6 (2%). В интервале интенсивности деформации $\varepsilon_i = 0,294-0,426$ наблюдается увеличение площади зерна в полтора раза и появление в структуре 6-го балла зерна с объемом G_6 (17%). При дальнейшем увеличении степени деформации величина зерна уменьшается до размера зерна недеформированной структуры со средней площадью ~ 600 мкм², соответствующей 7-8-му баллу. Незначительное увеличение средней площади зерна ~ 850 мкм² с объемом 6-го балла зерна G_6 (11%) соответствует максимальной степени деформации $\varepsilon_i = 0,736$. При всех степенях деформации наблюдается появление и сохранение измельчения исходной структуры в процессе обжатия с баллом зерна G_9 (18–33%) и G_{10}

(5–14%), что означает отсутствие в указанных объемах процесса рекристаллизации.

При 1100°C при малой степени деформации $\varepsilon_i = 0,043$ первичная рекристаллизация структуры, как и при 1050°C, проявляется незначительно. В дальнейшем при интенсивности деформации $\varepsilon_i = 0,142$ структура характеризуется резким ростом размера зерна, средняя площадь которого составила 20700 мкм². При дальнейшем увеличении степени деформации происходит плавное уменьшение размера зерна до значения 700–600 мкм².

При температуре 1150°C картина процесса рекристаллизации совершенно изменилась. С начала деформации до степени деформации $\varepsilon_i = 0,426$ структура характеризуется значительным увеличением средней площади зерна в интервале 18450–17950 мкм². Структура содержит рекристаллизованные зерна размером от 1-го (250 мкм) до 5-го баллов (62 мкм). При дальнейшем повышении степени деформации $\varepsilon_i = 0,426$ средняя площадь зерна уменьшалась, и при максимальной степени деформации $\varepsilon_i = 0,736$ средняя площадь зерна составила значение ~ 7300 мкм² (4-й балл).

При анализе микроструктур образцов, обработанных в интервале температур 1050–1150°C, можно отметить, что наблюдается миграционный механизм роста зерен, при котором крупные зерна растут за счет «поедания» мелких зерен. При сравнении зависимостей рекристаллизации можно отметить, что при степени деформации 0,142 величина зерна при температуре 1100°C больше, чем при 1150°C, но при анализе разнотерности следует отметить наличие зерен размером G_6 (6%), которые при 1150°C отсутствуют. Данный факт указывает на актуальность оценки разнотерности при построении зависимостей рекристаллизации.

На основании анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- для стали аустенитного класса X18H10T процесс динамической рекристаллизации реализуется в интервале температур 1050–1150°C, интервал критических степеней имеет значения: для 1100°C – $\varepsilon_i = 0,1-0,14$; для 1150°C – $\varepsilon_i = 0,142-0,43$;
- зависимости рекристаллизации, построенные по значениям среднего диаметра (площади) зерна без учета разнотерности, не позволяют в полной мере оценить процесс рекристаллизации и реализующие их механизмы.

Закключение

Разработан ускоренный способ построения зависимостей рекристаллизации, основанный на математическом моделировании процесса осадки цилиндрических образцов в программном комплексе DEFORM-3D (МКЭ). Для степеней обжатия 10 и 50% проведена оценка интенсивности деформации по координатной сетке 2,0×2,0 мм на продольных сечениях. На основе полученных данных о деформированном состоянии выделены зоны с плавно нарастающей степенью деформации, в которых металлографиче-

ский анализ среднего размера зерна выполнен с помощью программного комплекса Thixomet. Метод позволяет сократить число испытаний, учитывать разнотернистость структуры и использовать построенные зависимости в производстве.

Разработанный метод расширил возможности для определения механизмов рекристаллизации в зависимости от температуры и степени деформации. Построенные зависимости рекристаллизации стали аустенитного класса X18H10T с учетом данных разнотернистости расширили возможности оценки механизмов рекристаллизации в интервале температур 1050–1150°C и степени деформации в показатели интенсивности до значения $\varepsilon_i = 0,75$.

Список источников

1. Бережковский Д.И. Новый тип диаграмм рекристаллизации и методика их построения // Заводская лаборатория. 1964. №12. С. 1482-1487.
2. Hanemann, Lucke // Stahl und Eisen. 1925, no. 5, s. 119.
3. Siebel und Pomp. Düsseldorf: Milt. Kais. Wilh. Inst. f. Eisenforsch, 1927. S. 157.
4. Павлов Иг.М. и др. // Металлург. 1936. С. 17-20.
5. Корнеев Н.И. Деформация металлов ковкой. М.: Оборонгиз, 1947. 244 с.
6. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: МИСиС, 2005. 432 с.
7. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. М.: Металлургия, 1983. 480 с.
8. Орлов А.Н., Перевезенцев В.Н., Рыбин В.В. Границы зерен в металлах. М.: Металлургия, 1980. 156 с.
9. Rezvani, A., Ebrahimi, R., & Bagherpour, E. Static Recrystallization Simulation of Interstitial Free-Steel by Coupling Multi-Phase-Field and Crystal Plasticity Model Considering Dislocation Density Distribution // Advanced Engineering Materials. 2025, 27(12), p. 14. DOI: 10.1002/adem.202500117.
10. Grain Growth in High-Entropy Alloys (HEAs): A Review / Zamani M. R., Mirzadeh H., Malekan M., et al. // High Entropy Alloys & Materials. 2022, 1(1), pp. 25-59.
11. 3D cellular automaton simulation of the dynamic recrystallization microstructure evolution for a nickel-based superalloy / Gong Y., Ding H., Wang Y., et al. // Iron Steel Vanadium Titanium. 2025, 46(2), pp. 151-158. DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.02.021
12. El-Meligy M., El-Bitar T., & Ebied S. Grain refinement tracing of dynamic and metadynamic recrystallization for a Penetrator Steel // Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials. 2024, 57(1), pp. 75-81. DOI: 10.22059/JUFGNSM.2023.365577.417
13. Modeling deformation, recovery, and recrystallization of tantalum using a higher order elasto-viscoplastic self-consistent model / Riyad I. A., Clausen B., Savage D. J., et al. // Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2025, p.105925. DOI:10.1016/j.jmps.2024.105925.
14. ГОСТ Р 57188-2016. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения.
15. ГОСТ Р 57700.10-2018. Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области.
16. Патент № 2817327 С1 РФ. Способ построения зависимостей рекристаллизации / Галкин В.В., Гаврилов Г.Н., Вашурин А.В., Баженов Е.О., Итальянцев Д.С., опубл. 15.04.2024, бюл. №11.
17. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

References

1. Berezhkovskiy D.I. A new type of recrystallization diagrams and a method for their construction. *Zavodskaya laboratoriya* [Factory Laboratory]. 1964;(12):1482-1487. (In Russ.)
2. Hanemann Lucke. *Stahl und Eisen*. 1925;(5):119.
3. Siebel und Pomp. Düsseldorf: Milt. Kais. Wilh. Inst. f. Eisenforsch, 1927. S. 157.
4. Pavlov Ig.M., et al. *Metallurg* [Metallurgist]. 1936:17-20. (In Russ.)
5. Korneev N.I. *Deformatsiya metallov kovkoi* [Metal deformation by forging]. Moscow: Oborongiz, 1947. 244 p. (In Russ.)
6. Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow: MISIS, 2005. 432 p. (In Russ.)
7. Bernshtein M.L., Zaimovskiy V.A., Kaputkina L.M. *Termomekhanicheskaya obrabotka stali* [Thermomechanical treatment of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 480 p. (In Russ.)
8. Orlov A.N., Perevezentsev V.N., Rybin V.V. *Granitsy zeren v metallakh* [Grain boundaries in metals]. Moscow: Metallurgiya, 1980. 156 p. (In Russ.)
9. Rezvani A., Ebrahimi R., Bagherpour E. Static recrystallization simulation of interstitial free-steel by coupling multi-phase-field and crystal plasticity model considering dislocation density distribution. *Advanced Engineering Materials*. 2025;27(12):14. doi:10.1002/adem.202500117.
10. Zamani M.R., Mirzadeh H., Malekan M., et al. Grain growth in high-entropy alloys (HEAs): A review. *High Entropy Alloys & Materials*. 2022;1(1):25-59.
11. Gong Y., Ding H., Wang Y., et al. 3D cellular automaton simulation of the dynamic recrystallization microstructure evolution for a nickel-based superalloy. *Iron Steel Vanadium Titanium*. 2025;46(2):151-158. DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.02.021.
12. El-Meligy M., El-Bitar T., Ebied S. Grain refinement tracing of dynamic and metadynamic recrystallization for a penetrator steel. *Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*. 2024;57(1):75-81. DOI: 10.22059/JUFGNSM.2023.365577.417.
13. Riyad I.A., Clausen B., Savage D.J., et al. Modeling deformation, recovery, and recrystallization of tantalum using a higher order elasto-viscoplastic self-consistent model. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2025:105925. DOI: 10.1016/j.jmps.2024.105925.
14. State standard GOST R 57188-2016. Numerical simulation of physical processes. Terms and definitions. (In Russ.)
15. State standard GOST R 57700.10-2018. Numerical simulation of physical processes. Determination of stress-strain state. Verification and validation of numerical models of complex structural elements in the elastic region. (In Russ.)

16. Galkin V.V., Gavrilov G.N., Vashurin A.V., Bazhenov E.O., Italyantsev D.S. *Sposob postroeniya zavisimostei rekristallizatsii* [Method for constructing recrystallization dependencies]. Patent RU, no. 2817327 C1, 2024.
17. Gulyaev A.P. *Metallovedenie* [Metallurgical Science]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 544 p. (In Russ.)

Поступила 13.02.2026; принята к публикации 20.04.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 13/02/2026; revised 20/04/2026; published 30/06/2026

Галкин Владимир Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроительные технологические комплексы», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: lumi1950@mail.ru. ORCID 0009-0007-6106-5253

Баженов Евгений Олегович – старший преподаватель кафедры «Машиностроительные технологические комплексы», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: bazhenov98evgenii@mail.ru. ORCID 0000-0003-0193-6065

Гаврилов Геннадий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: gavrilov1109@mail.ru. ORCID 0000-0002-8306-2965

Вашурин Алексей Вячеславович – заместитель начальника производства, начальник кузнечно-литейного цеха, НАЗ «Сокол» – филиал АО «Российская самолетостроительная компания „МиГ”», Нижний Новгород, Россия.
Email: vav5251@yandex.ru

Черепенькин Дмитрий Викторович – главный конструктор, начальник конструкторского отдела кузнечного производства, АО «ГАЗ», Нижний Новгород, Россия.
Email: cherepenkindv@gaz.ru.

Vladimir V. Galkin – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Machine-Building Technological Complexes, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: lumi1950@mail.ru. ORCID 0009-0007-6106-5253

Evgeny O. Bazhenov – Senior Lecturer of the Department of Machine-Building Technological Complexes, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: bazhenov98evgenii@mail.ru. ORCID 0000-0003-0193-6065

Gennady N. Gavrilov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: gavrilov1109@mail.ru. ORCID 0000-0002-8306-2965

Alexey V. Vashurin – Deputy Head of Production, Head of the Blacksmithing and Foundry Shop, Sokol Aircraft Plant, branch of JSC Russian Aircraft Corporation “MiG”, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: vav5251@yandex.ru

Dmitry V. Cherepenkin – Chief Designer, Head of the Design Department of Blacksmithing Production, JSC GAZ, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: cherepenkindv@gaz.ru.



ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКИ ЗАКАЛЕННОГО ЧУГУНА С ВЕРМИКУЛЯРНЫМ ГРАФИТОМ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Панов А.Г.¹, Гуртовой Д.А.², Шаехова И.Ф.³

¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

²ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Россия

³Набережно-Челнинский филиал Казанского федерального университета, Набережные Челны, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В современном двигателестроении преобладают легкие сплавы. В этой связи благодаря прогрессу в металлургии и новейшим технологиям обращает на себя внимание чугун, несмотря на традиционные представления о чугуне как о «тяжелом» материале с низкой удельной прочностью. Современные высокопрочные чугуны, включая чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ), демонстрируют уникальное сочетание механических и эксплуатационных свойств, делая их весьма перспективными для применения в ответственных деталях двигателей. Вопрос сохранения ценных свойств чугуна (низкая усадка, высокие демпфирующая способность, теплопроводность и др.) при одновременном достижении высоких удельных прочностных характеристик, сопоставимых с легкими сплавами, остается актуальной задачей. **Цель работы.** Продемонстрировать потенциал изотермически закаленного чугуна с вермикулярным графитом (ИЗЧВГ) для создания двигателей нового поколения, отвечающих требованиям по эффективности, надежности и экологичности, и рассмотреть перспективы применения ИЗЧВГ в двигателестроении на основе результатов исследования влияния современных технологий термической обработки на структуру и свойства ИЗЧВГ, а также оценку их влияния на эксплуатационные характеристики деталей двигателей, работающих в условиях высоких температур и циклических нагрузок. **Используемые методы.** В статье анализируются результаты исследований, полученные с использованием современных методов модифицирования чугунных расплавов с целью формирования вермикулярной формы графита в отливках. Рассматриваются технологические аспекты производства ЧВГ, включая состав шихты, режимы модифицирования расплава и термовременные условия его затвердевания и охлаждения. Исследуются теплофизические и механические характеристики, а также процессы структурообразования при изотермической закалке, включая влияние легирования. Для определения оптимальных режимов термической обработки изучаются теплофизические свойства и прокаливаемость ЧВГ. **Новизна.** Исследование фокусируется на перспективном, но недостаточно изученном в отечественном информационном пространстве материале – изотермически закаленном чугуне с вермикулярным графитом. Впервые комплексно анализируются его структурные особенности во взаимосвязи с эксплуатационными свойствами применительно к двигателестроению. Особый акцент делается на оценке термической стойкости структур, полученных после изотермической закалки, что является ключевым аспектом для высокотемпературных применений. **Результат.** Успешное освоение промышленных технологий производства ЧВГ со стабильной вермикулярной структурой, а также исследования его уникального сочетания высоких прочностных характеристик, термоусталостной стойкости, размерной стабильности и демпфирующей способности подтверждают потенциал материала. Определение оптимальных режимов изотермической закалки и легирования позволяет получить ИЗЧВГ с удельными прочностными показателями, не уступающими литым алюминиевым сплавам, и более высокой термостойкостью. **Практическая значимость.** Внедрение ИЗЧВГ в автомобильной и авиационной промышленности позволяет расширить возможности конструирования двигателей, повысить их мощность, срок службы, снизить массу и улучшить экологические показатели. Успешное применение в отечественном автопроме (КАМАЗ, ГАЗ, ЯМЗ) и первые разработки для авиадвигателестроения (ООО «Феникс») подтверждают практическую ценность материала. Дальнейшие исследования, включая оценку термической стойкости, обогатят научные знания и расширят области применения ИЗЧВГ, способствуя развитию отечественного машиностроения.

Ключевые слова: чугун с вермикулярным графитом, иерархия свойств, изотермическая закалка, структурные превращения, термическая стойкость

© Панов А.Г., Гуртовой Д.А., Шаехова И.Ф., 2026

Для цитирования

Панов А.Г., Гуртовой Д.А., Шаехова И.Ф. Перспективы развития изотермически закаленного чугуна с вермикулярным графитом для двигателестроения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 156-164. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-156-164>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF AUSTEMPERED COMPACTED GRAPHITE IRON FOR ENGINE MANUFACTURING

Panov A.G.¹, Gurtovoy D.A.², Shaekhova I.F.³

¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

²PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia

³Naberezhnye Chelny Branch of Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Modern engine manufacturing is increasingly dominated by lightweight alloys. In this context, due to advances in metallurgy and modern processing technologies, cast iron has regained considerable attention despite its traditional perception as a “heavy” material with low specific strength. Modern high-strength cast irons, including compacted graphite iron (CGI), demonstrate a unique combination of mechanical and service properties, making them highly promising materials for critical engine components. Preserving the valuable properties of cast iron, such as low shrinkage, high damping capacity, thermal conductivity, and others, while simultaneously achieving high specific strength characteristics comparable to those of lightweight alloys remains an important challenge. **Objectives.** The aim of this work is to demonstrate the potential of austempered compacted graphite iron (ACGI) for the development of next-generation engines meeting the requirements of efficiency, reliability, and environmental sustainability, as well as to assess the prospects for its application in engine manufacturing based on investigations of their influence of modern heat-treatment technologies on the structure and properties of ACGI and their effect on the performance characteristics of engine components operating under elevated temperatures and cyclic loading conditions. **Methods Applied.** The paper analyzes research results obtained using modern methods of cast iron melt treatment aimed at forming compacted graphite morphology in castings. Technological aspects of CGI production are considered, including charge composition, melt treatment regimes, and thermal conditions of solidification and cooling. Thermophysical and mechanical characteristics, as well as microstructural evolution during austempering, including the effects of alloying, are investigated. The thermophysical properties and hardenability of CGI are studied to determine optimal heat-treatment conditions. **Originality.** The study focuses on austempered compacted graphite iron, a promising but still insufficiently investigated material in the domestic scientific literature. For the first time, its structural features are comprehensively analyzed in relation to its service properties in engine applications. Particular attention is paid to the thermal stability of structures formed during austempering, which is a key factor for high-temperature applications. **Result.** The successful development of industrial technologies for producing CGI with a stable compacted graphite structure, together with investigations of its unique combination of high strength, thermal fatigue resistance, dimensional stability, and damping capacity, confirms the material’s potential. The determination of optimal austempering and alloying conditions makes it possible to obtain ACGI with specific strength characteristics comparable to those of cast aluminum alloys and superior thermal resistance. **Practical Relevance.** The application of ACGI in the automotive and aerospace industries expands engine design possibilities, increases power output and service life, reduces weight, and improves environmental performance. Successful implementation in the Russian automotive industry (KAMAZ, GAZ, and YaMZ) and the first developments for aircraft engines by Phoenix LLC confirm the practical value of this material. Further investigations, including assessments of thermal stability, will enrich scientific knowledge and broaden the application areas of ACGI, contributing to the development of domestic mechanical engineering.

Keywords: compacted graphite iron, property hierarchy, austempering, structural transformations, thermal stability

For citation

Panov A.G., Gurtovoy D.A., Shaekhova I.F. Prospects for the Development of Austempered Compacted Graphite Iron for Engine Manufacturing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 156-164. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-156-164>

Постановка задачи работы

В современном двигателестроении доминируют металлические материалы, в частности алюминиевые, магниевые и титановые сплавы, а также специальные стали. Этот выбор обусловлен в первую очередь стремлением к достижению высоких удельных механических характеристик, что критически важно для обеспечения эффективности и надежности силовых установок.

В данном контексте упоминание чугуна может вызвать некоторую настороженность и скепсис, поскольку традиционно этот материал ассоциируется с «тяжестью» и низкой удельной прочностью, обусловленной присутствием в его структуре пластинчатого графита, ослабляющего металлическую матрицу. Однако подобное восприятие чугуна все больше устаревает в свете впечатляющего прогресса в области металлургии и материаловедения за последние сто лет.

Развитие легирования и методов управления структурой, в частности модифицирования расплавов и термической обработки, позволило существенно улучшить механические свойства чугунов. Современные высокопрочные чугуны с различными формами графита демонстрируют уникальный комплекс свойств, делающий их перспективными для применения в двигателестроении. На сегодняшний день удельная прочность некоторых марок чугуна достигает $230 \text{ кН}\cdot\text{м}/\text{кг}$, что превосходит аналогичные показатели многих литейных сплавов, деформируемых магниевых сплавов и приближается к характеристикам деформируемых алюминиевых сплавов. При этом чугуны, благодаря наличию графитных включений, обладают рядом выдающихся эксплуатационных и технологических преимуществ. К ним относятся высокая демпфирующая способность, теплопроводность, стойкость к деформациям при высоких температурах и нагрузках, сопротивление усталости, а также минимальная литейная усадка и высокая жидкотекучесть. Все эти факторы имеют первостепенное значение для деталей двигателей внутреннего сгорания, работающих в условиях циклических температурных и механических воздействий.

Революционный прогресс в области повышения механических свойств чугуна был ознаменован открытием в середине XX века, продемонстрировавшим способность углерода формировать структуру графита не только в виде пластинчатых включений, свойственных классическим чугунам, но и в виде компактных, сфероидизированных частиц, дискретно распределенных в металлической матрице. Изначально наиболее интенсивное развитие получила технология производства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ), позволяющая посредством легирования и применения традиционных методов термической обработки, таких как нормализация, существенно увеличить предел прочности материала – от 100-300 до 350-800 МПа.

Последующим этапом оптимизации прочностных характеристик стала разработка технологии изотермической закалки (ИЗ), позволяющей формировать бейнитную структуру и к настоящему времени достигать пределов прочности при растяжении до 1600 МПа для изотермически закаленного чугуна с шаровидным графитом (ИЗЧШГ) [1]. Вместе с тем трансформация графитной структуры от пластинчатой к шаровидной, сопровождающаяся повышением прочности, приводит к закономерному снижению ряда уникальных эксплуатационных свойств, присущих серым чугунам. В первую очередь речь идет о таких характеристиках, как низкая литейная усадка, высокая демпфирующая способность, жесткость и теплопроводность. Данные свойства обусловлены наличием взаимосвязанного разветвленного графитного каркаса, отсутствующего в структуре ВЧШГ. В этой связи перспективным направлением представляется разработка материалов, сочетающих в себе высокую прочность и сохранение

ряда специальных свойств, характерных для чугунов с пластинчатым графитом. Таким материалом является чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ), в структуре которого графит имеет форму, промежуточную между пластинчатой и шаровидной.

Концепция ЧВГ возникла практически одновременно с открытием возможности сфероидизации графита, однако его промышленное применение, в отличие от ЧШГ, происходит лишь в последние десятилетия. Несмотря на очевидный потенциал, длительное время создание промышленной технологии получения вермикулярной формы графита в чугунных отливках, обеспечивающей стабильность и воспроизводимость результатов в условиях массового производства, представляло значительную технологическую сложность. Решение данной проблемы было найдено относительно недавно [2, 3], благодаря совершенствованию методов диагностики, компьютеризации и автоматизации процесса модифицирования чугуна.

В настоящей статье рассматриваются перспективы управления структурой и применения изотермически закаленного чугуна с вермикулярным графитом (ИЗЧВГ) в двигателестроении. Особое внимание уделяется анализу структуры и свойств ИЗЧВГ, полученных с использованием современных технологий термической обработки, а также исследованию их влияния на эксплуатационные характеристики деталей двигателей, работающих в условиях высоких температур и циклических нагрузок. Цель исследования – оценить потенциал этого материала для работы в условиях растущих эксплуатационных температур двигателей внутреннего сгорания новых поколений.

Материалы и методы исследования

Работа является продолжением комплексных исследований, представленных в работах [4, 5].

В работе использованы аналитические и экспериментальные методы исследования. Произведён анализ отечественных литературных данных по свойствам и перспективе применения чугунов с вермикулярным графитом для двигателестроения.

Для оценки термической стойкости ИЗЧВГ в работе использовались образцы опытной детали «Гильза авиационного двигателя» из нелегированного ЧВГ рабочим диаметром 86 мм и толщинами стенок 4 и 9 мм, предоставленной компанией ООО «Феникс», г. Ярославль, и закалённой на нижний бейнит при температуре 290°C с изотермической выдержкой в течение 3 ч. Внешний вид гильзы до вырезки лабораторных образцов для оценки термической стойкости, а также исходная микроструктура ИЗЧВГ представлены на рис. 1.

Термическую стойкость ИЗЧВГ оценивали по влиянию теплового воздействия в области пиковых температур головок блоков цилиндров во время форсированного рабочего цикла газовых двигателей внутреннего сгорания на микроструктуру и твёрдость образцов с габаритными размерами $20\times 20\times 9$ мм, вырезанными из опытной детали «Гильза авиационного двигателя».



Рис. 1. Опытная деталь «Гильза авиационного двигателя» после изотермической закалки: а – внешний вид; б – микроструктура, $\times 190$, травлено 4% HNO_3
 Fig. 1. Experimental component “Aircraft engine cylinder liner” after austempering: a is general view; б is microstructure, $\times 190$, etched with 4% HNO_3

Микроструктуру после теплового воздействия исследовали с помощью светового микроскопа НЕОРНОТ 32, оснащённого цифровой системой получения и анализа изображений SIAMS 800. Твёрдость определяли методами Бринелля и Роквелла с помощью твердомеров ТШ-2М и ТР 5006 соответственно.

Полученные результаты и их обсуждение

В настоящее время отмечается устойчивая тенденция к расширению областей применения ЧВГ, в частности в автомобильной промышленности для изготовления блоков и головок блоков цилиндров двигателей внутреннего сгорания. В работе [3] детально освещены технологические аспекты производства ЧВГ, включая состав шихты, режимы модифицирования и литья, а также представлен анализ влияния данных параметров на структуру и свойства материала. В том числе показано, что оптимальный подбор химического состава базового расплава, состава и количества сфероидизирующих и графитизирующих модификаторов, использование экспресс-диагностики потенциала сфероидизации и графитизации базового расплава, а также контроль температурно-временных режимов литья позволяют получать микроструктуру с преобладанием вермикулярного графита и минимальным содержанием шаровидного и пластинчатого.

Именно благодаря успешному освоению промышленных технологий производства, обеспечивающих стабильное формирование вермикулярной структуры графита, а также благодаря уникальному сочетанию высоких прочностных характеристик, термоусталостной стойкости, размерной стабильности в условиях тепловых циклов, демпфирующей

способности и других эксплуатационных свойств, чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ; международные обозначения: CGI – Compacted Graphite Iron, GJV – Graphit spheroidal vermicular, VG – Vermicular Graphite, JV – Juwel Graphite, GGV – Graphit Gusseisen Vermicular, Vermicular Cast Iron) за рубежом начал активно внедряться даже в авиадвигателестроение [4, б]. Эта отрасль, известная своей консервативностью и строгим подходом к любым инновационным материалам, постепенно признает преимущества ЧВГ за счет его способности решать задачи, связанные с надежностью и долговечностью в экстремальных условиях эксплуатации [2, 4, 6-9]. Это дает основание говорить о том, что внедрение ЧВГ не только расширяет технологические возможности двигателестроения, но и способствует созданию более экономичных и экологических систем, соответствующих современным требованиям по снижению выбросов и повышению эффективности.

Тем не менее до настоящего времени объем и воспроизводимость данных о потребительских и вспомогательных свойствах ЧВГ, особенно в отечественном информационном пространстве, остаются крайне недостаточными. Эта ситуация является частным случаем фундаментальной проблемы материаловедения: субъективности прогнозирования потребительских свойств (как в эксплуатации, так и в технологических процессах) посредством регламентируемых вспомогательных свойств (рис. 2). Исторически до конца XX века, научное сообщество придерживалось мнения, что потребительские качества продукции определяются составом и структурой материала, а также его базовыми физическими и химическими свойствами, вне зависимости от влияния внешних факторов.



Рис. 2. Иерархия потребительских и вспомогательных свойств материалов
 Fig. 2. Hierarchy of consumer and auxiliary material properties

Сегодня же становится очевидным, что подобный подход, основанный лишь на трех низших уровнях иерархии вспомогательных свойств, не обеспечивает необходимой точности при прогнозировании потребительских характеристик. Актуализация требований к материалам диктует разработку новых, так называемых «специальных» свойств. Их формирование должно основываться на моделировании реальных условий эксплуатации и технологических процессов, что позволит перейти к более предсказательной и управляемой инженерии материалов.

Кроме того, в последние годы в России заметно возросло количество проектов по серийному освоению ЧВГ в автомобильной промышленности, прежде всего в производстве двигателей (с участием ПАО «КАМАЗ», ПАО «ГАЗ» и «ЯМЗ»). Это, в свою очередь, способствует росту интереса и компетенций отечественных специалистов в области материаловедения ЧВГ, а также стимулирует первые разработки для нужд авиадвигателестроения. Так, предприятие ООО «Феникс» (г. Тутаев) начало выпуск критически важных узлов для четырехцилиндрового оппозитного двигателя малой авиации (160 л.с.), разрабатываемого ООО «ДДА» (г. Уфа). В их число входят: головка блока цилиндра, коленчатый и распределительный валы, а также поршни и гильзы цилиндров [6]. Уже изготовленные из ЧВГ45, эти детали обладают удельной прочностью, сопоставимой с литыми алюминиевыми сплавами, что обусловлено отличными литейными

свойствами ЧВГ, позволяющими достигать минимальной толщины стенок отливок до 2 мм [6].

Для дальнейшего совершенствования характеристик двигателей, включая увеличение мощности, срока службы и снижение массы, проводятся комплексные исследования. Основным источником механических потерь в двигателе внутреннего сгорания является цилиндропоршневая группа [10]. В связи с этим к гильзам цилиндров предъявляются повышенные требования к сопротивлению абразивному и усталостному износу в условиях температур эксплуатации до 400°C и более [10, 11]. Ученые ЯГТУ в сотрудничестве с КФУ и ООО «Феникс» изучают влияние изотермической закалки на ЧВГ [5]. В рамках этих работ исследуются теплофизические свойства литых ЧВГ, структуры и процессы их структурообразования при нагреве и охлаждении с различными скоростями, а также механические и специальные характеристики ИЗЧВГ и влияние на них легирования, чтобы определить оптимальные режимы аустенитизации, закалки и изотермической выдержки.

Одной из ключевых и в настоящее время недостаточно освещенных областей в рамках изучения свойств изотермически закаленных чугунов в целом является оценка термической стойкости сформированных при закалке структур. Данный аспект изучен лишь фрагментарно применительно к чугунам с шаровидным графитом, и практически полностью отсутствует в исследовательской литературе, касающейся чугунов с вермикулярным графитом.

Ввиду существующего пробела в знаниях авторами были инициированы пионерские исследования, направленные на определение термической устойчивости образцов, изготовленных из ИЗЧВГ80. Этот материал, характеризующийся удельной прочностью на уровне 0,13 МПа/(кг/м³), был выбран не случайно. Из него были сформированы опытные образцы гильз цилиндров (иллюстрация на **рис. 1**), которые в дальнейшем подвергались воздействию условий, приближенных к критическим параметрам эксплуатации. Для проведения этих испытаний образцы подвергались продолжительному (24 ч) тепловому воздействию в лабораторных печах сопротивления. Температурный режим был установлен в диапазоне 400–500°C, что намеренно превышало пиковые значения эксплуатационных температур, характерных для гильз цилиндров в реальных условиях работы. Режимы фактического теплового воздействия представлены в **табл. 1**.

Микроструктуры после теплового воздействия представлены на **рис. 3**, результаты измерения твёрдости: все результаты измерений – в **табл. 2**, средние значения с интервалами погрешностей измерения – на **рис. 4**.

Таблица 1. Режимы теплового воздействия
Table 1. Heat treatment conditions

Температура выдержки под термическим воздействием, °С	
Уровень	Фактическая температура в печи (показания термометра)
400	390–405
450	444–458
500	492–508

Полученные результаты, несмотря на видимую деградацию упрочнённой закалкой структуры под воздействием высоких температур (что подтверждается данными на **рис. 3**), свидетельствуют о сохранении твёрдости чугуна на высоком уровне, достаточном для обеспечения требуемых рабочих характеристик (см. **табл. 2**, **рис. 4**), по крайней мере до температур эксплуатации порядка 400°C. Особенно это проявляется при оценке твёрдости, измеряемой методом Роквелла, которая характеризует непосредственно матрицу чугуна, её износостойкие качества. Это подчеркивает потенциал ЧВГ для применений, связанных с повышенными тепловыми нагрузками.

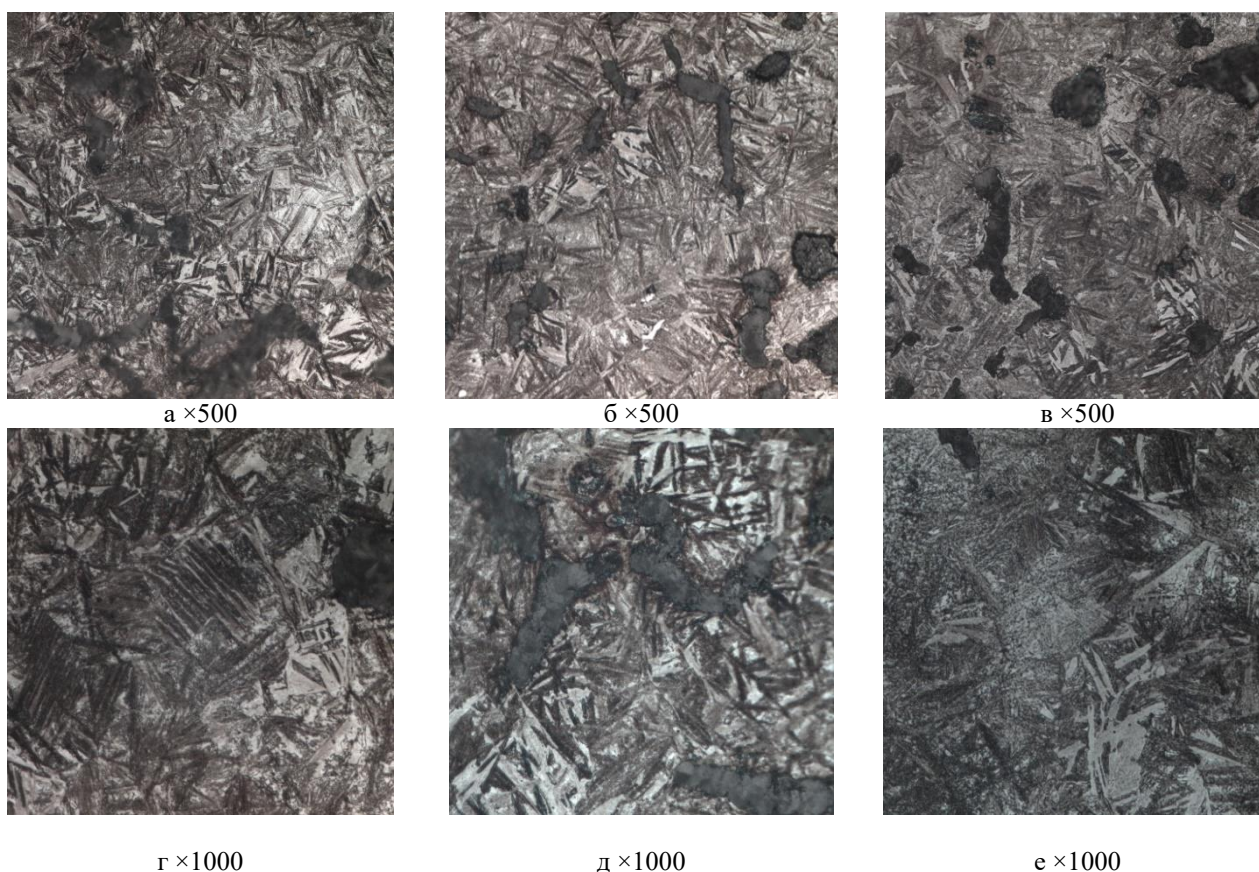


Рис. 3. Изменение микроструктуры ИЗЧВГ80 при термообработке: а, г – ТО 400°C; б, д – ТО 450°C; в, е – ТО 500°C

Fig. 3. Evolution of the microstructure of ACGI80 during heat treatment: а, г is HT at 400°C; б, д is HT at 450°C; в, е is HT at 500°C

Таблица 2. Ранжированные результаты измерения твёрдости
Table 2. Ranked results of hardness measurements

Номер результата измерения	Твёрдость, HB				Твёрдость, HRC			
	Исходный	400°C	450°C	500°C	Исходный	400°C	450°C	500°C
1	324	318	251	204	36,0	35,1	29,9	24,1
2	324	291	251	191	35,0	34,9	29,9	24,0
3	321	291	251	191	34,5	34,8	29,8	23,9
4	321	291	251	191	34,5	34,6	29,8	23,8
5	321	291	251	191	34,5	34,2	29,4	23,6
6	321	280	251	191	34,5	34,2	29,2	23,2
7	321	280	233	191	34,5	34,2	28,4	23,1
8	321	270	233	191	34,0	34,2	28,2	22,9
9	321	270	233	179	34,0	33,9	28,2	22,6
10	321	270	233	179	33,5	33,8	28,1	22,4
11	321	270	233	179	33,0	33,8	28,1	22,2
12	318	270	233	179	32,5	33,8	27,9	22,0
13	318	270	218	179	30,5	33,6	27,6	21,2
14	318	270	218	179	30,0	33,0	27,5	20,8
15	318	270	218	179	29,0	32,0	27,2	19,2
Среднее значение	320,6	280,1	237,2	186,3	33,3	34,0	28,6	22,6
Стандартное отклонение	1,9	14,0	13,0	7,8	2,0	0,8	1,0	1,4
Доверительный интервал	1,0	7,1	6,6	3,9	1,0	0,4	0,5	0,7
Погрешность	3,8	27,9	25,9	15,5	4,0	1,6	1,9	2,7

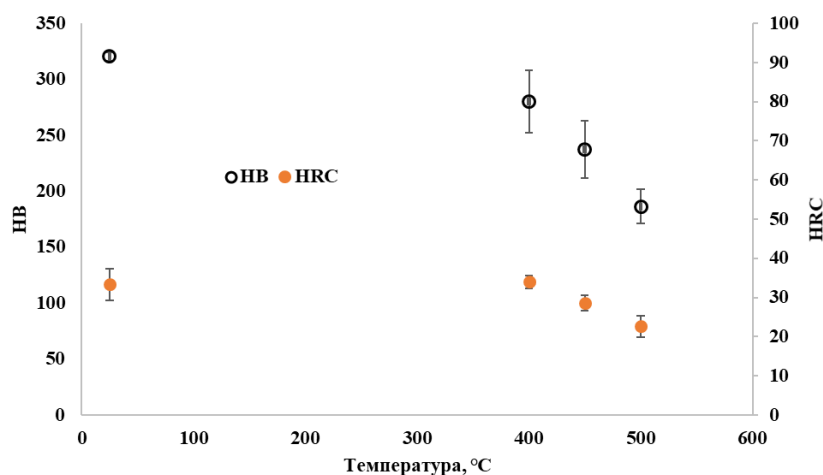


Рис. 4. Термическая устойчивость к сохранению твёрдости, определяемой методом Роквелла
Fig. 4. Thermal stability of hardness retention determined by the Rockwell method

Заключение

Таким образом, динамичное развитие эксплуатационных и технологических потребительских свойств чугуна, обусловленное уникальной природой углерода и многообразием его связей с легирующими и вспомогательными элементами, делает этот материал, в частности изотермически закаленный чугун с вермикулярным графитом, высокоперспективным для деталей двигателестроения. С одной стороны, он наследует высокие механические свойства, характерные для ЧШГ, с другой – обладает выдающимися литейными характеристиками, включая низкую склонность к усадке, высокую жидкотекучесть, от-

личную теплопроводность, превосходную демпфирующую способность и минимальную склонность к образованию деформаций (короблению), в том числе в условиях повышенных циклических термомеханических нагрузений, по крайней мере в области температур до порядка 400°C.

Тем не менее для дальнейшего расширения сфер применения ЧВГ в авиадвигателестроении требуется систематическое проведение статистически значимых исследований. Необходимо углубленное изучение взаимосвязи между потребительскими свойствами и вспомогательными характеристиками, что включает формализацию новых потребительских свойств и разработку передовых критериев и методов модели-

рования (математического и физического). Параллельно с этим критически важно накопление репрезентативной статистики по различным свойствам для образцов ЧВГ, полученных с использованием разнообразных составов и технологий. Особое внимание следует уделить исследованию циклической стойкости, в том числе в зависимости от температурного фактора, что позволит точнее прогнозировать долговечность и надежность деталей в условиях эксплуатации.

Список источников

1. Nofal A. A., Jekova L. Novel processing techniques and applications of austempered ductile iron // J. Univ. Chem. Technol. Metall., 2009, vol. 44, no. 3, pp. 213–228.
2. Dawson S. Compacted graphite iron – a material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads / 68th World Foundry Congress, 2008, pp. 93–99.
3. Технология стабильного получения вермикулярного графита в отливках массового производства / Доусон С., Панов А.Г., Гуртовой Д.А., Аникин С.А. // Литейное производство. 2018. №4. С. 7–12.
4. Разработка технологии получения аустенитно-бейнитных чугунов с вермикулярным графитом для деталей авиадвигателестроения / Панов А.Г., Шаехова И.Ф., Гимазетдинова Ч.А., Макарова М.А., Гладыш Е.Д. // Литейное производство. 2023. №12. С. 2–6.
5. Панов А.Г., Шаехова И.Ф., Гуртовой Д.А. Влияние изотермической выдержки на структуру и микротвердость закаленного на верхний бейнит чугуна с вермикулярным графитом // Литейное производство. 2021. №10. С. 2–8.
6. Галимов Р.М. Опыт разработки конструкций, технологий и производства ответственных отливок из чугуна с вермикулярным графитом // Наука и технологии модифицирования чугуна: тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции; Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережночелнинский институт; под ред. А.Г. Панова. Набережные Челны, 2022. С. 22.
7. Изосимов В.А., Суркин В.И., Изосимов А.В. Высокопрочный чугун с вермикулярным графитом - перспективный материал для изготовления поршней двигателя Д-180 // Литейный консилдум online: ресурс о литейном производстве. URL: <https://litkons.com/info/cast-iron/vysokoprochnyy-chugun-s-vermikulyarnym-grafitom/?ysclid=mlev5wp5i2332723526> (дата обращения 08.02.2026)
8. Закиров Э.С. Повышение стабильности структуры и свойств ответственных деталей машиностроения из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.17 - Материаловедение. Казань, 2023. 126 с.
9. Доусон С. Особенности структуры ЧВГ и свойства, определяющие перспективы его применения в машиностроении // Детали машиностроения из чугуна с вермикулярным графитом. Свойства. Технология. Контроль: тезисы докладов международной научно-технической конференции. Набережные Челны, 2017. С. 12-13.
10. Прохоров В.Ю., Шамарин Ю.А., Краснов Н.Д. Исследование процесса изнашивания гильз блоков цилиндров дизельных двигателей // Надежность и качество: труды Международного симпозиума. Пенза, 2017. Т. 2. С. 238-240.
11. Крутилин А.Н., Курбатов М.И., Курбатова М.И. Условия работы и основные требования, предъявляемые к материалу гильз блока цилиндров // Литьё и металлургия. 2005. №2-1 (34). С. 107-109.

References

1. Nofal A.A., Jekova L. Novel processing techniques and applications of austempered ductile iron. J. Univ. Chem. Technol. Metall. 2009;44(3):213-228.
2. Dawson S. Compacted graphite iron – a material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads. Proceedings of the 68th World Foundry Congress. 2008, pp. 93-99.
3. Dawson S., Panov A.G., Gurtovoy D.A., Anikin S.A. Technology of stable production of vermicular graphite in castings of mass production. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry production], 2018;(4):7-12. (In Russ.)
4. Panov A.G., Shaekhova I.F., Gimazetdinova Ch.A., Makarova M.A., Gladyshev E.D. Development of technology for producing austempered vermicular graphite cast irons for aircraft engine components. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry production]. 2023;(12):2-6. (In Russ.)
5. Panov A.G., Shaekhova I.F., Gurtovoy D.A. Effect of isothermal holding on the structure and microhardness of upper bainitic vermicular graphite cast iron. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry production]. 2021;(10):2-8. (In Russ.)
6. Galimov R.M. Experience in developing designs, technologies and production of critical castings made of vermicular graphite iron. *Nauka i tekhnologii modifitsirovaniya chuguna: tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Science and technologies of cast iron modification. Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference]. Naberezhnye Chelny, 2022, pp. 22. (In Russ.)
7. Izosimov V.A., Surkin V.I., Izosimov A.V. High-strength vermicular graphite cast iron as a promising material for manufacturing D-180 engine pistons. *Liteyny konsilium online: resurs o liteynom proizvodstve* [Foundry Council online: a resource about foundry production]. Available at: <https://litkons.com/info/cast-iron/vysokoprochnyy-chugun-s-vermikulyarnym-grafitom/> (Accessed on February 8, 2026).
8. Zakirov E.S. *Povyshenie stabilnosti struktury i svoystv otvetstvennykh detaley mashinostroeniya iz chuguna s sharovidnym i vermikulyarnym grafitom: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the stability of structure and properties of critical engineering components made of spheroidal and vermicular graphite cast iron. Ph.D. dissertation]. Kazan, 2023, 126 p.
9. Dawson S. features of vermicular graphite cast iron and properties determining its prospects in mechanical engineering. *Detali mashinostroeniya iz chuguna s vermikulyarnym grafitom. Svoystva. Tekhnologiya. Kontrol: tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Mechanical engineering components made of vermicular graphite cast iron. Properties. Technology. Control. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Naberezhnye Chelny, 2017, pp. 12-13. (In Russ.)

10. Prokhorov V.Yu., Shamarin Yu.A., Krasnov N.D. Investigation of the wear process of diesel engine cylinder liners. *Nadezhnost i kachestvo: trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality. Proceedings of the International Symposium]. Penza, 2017, vol. 2, pp. 238-240. (In Russ.)
11. Krutilin A.N., Kurbatov M.I., Kurbatova M.I. Operating conditions and basic requirements for cylinder liner materials. *Lityo i metallurgiya* [Casting and metallurgy]. 2005;(2-1(34)):107-109. (In Russ.)

Поступила 21.02.2026; принята к публикации 04.05.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 21/02/2026; revised 04/05/2026; published 30/06/2026

Панов Алексей Геннадьевич – доктор технических наук, профессор,
Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия.
Email: panov.ag@mail.ru. ORCID 0000-0002-3357-8824

Гуртовой Дмитрий Андреевич – кандидат технических наук, главный металлург,
ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Россия.
Email: gurtovoyda@mail.ru. ORCID 0000-0003-0450-6802

Шасхова Ирина Фаридовна – кандидат технических наук, доцент,
Набережночелнинский филиал Казанского федерального университета, Набережные Челны, Россия.
Email: irra1603@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3275-3037

Alexey G. Panov – DrSc (Eng.), Professor,
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia.
Email: panov.ag@mail.ru. ORCID 0000-0002-3357-8824

Dmitry A. Gurtovoy – PhD (Eng.), Chief Metallurgist,
PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: gurtovoyda@mail.ru. ORCID 0000-0003-0450-6802

Irina F. Shaekhova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Naberezhnye Chelny Branch of Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: irra1603@yandex.ru. ORCID 0000-0002-3275-3037

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 620.3
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-165-172



ИССЛЕДОВАНИЕ МОНОДОМЕННЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ YBCO С ВЫСОКИМИ КРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Теплоухов А.А.¹, Серопян Г.М.², Сычев С.А.², Федосов Д.В.², Семенюк Н.А.³, Скакун Д.В.¹

¹ Омский государственный технический университет, Омск, Россия

² Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, Омск, Россия

³ Нижневартковский государственный университет, Нижневартковск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Развитие современной техники и электроники вызывает необходимость совершенствования методов промышленного производства сверхпроводящих систем с высокими значениями сверхпроводящих параметров, такими как плотность тока $J_c \sim 90$ и температура перехода $T_c \sim 90$ К. В данной работе успешно изучен и протестирован процесс выращивания сверхпроводящих кристаллов, позволяющий получать монодоменные образцы YBCO различных размеров с заданными характеристиками (диаметром от 20 до 50 мм). Данный процесс представляет собой рост домена из перитектического расплава с использованием в качестве затравки монокристаллов $\text{Sm}_{1,8}\text{Ba}_{2,4}\text{Cu}_{3,4}\text{O}_{7-x}$, легированных оксидом магния (MgO). **Используемые методы.** Для выращивания сверхпроводящих монодоменов использовался метод роста из расплава с более тугоплавким затравочным кристаллом на поверхности образца. Образцы в виде таблеток были получены однонаправленным одноосевым прессованием из смеси порошков $\text{Y}_{1,8}$ и 1% CeO_2 . Партия образцов нагревалась до 1055 К, которая выше температуры перитектического распада $\text{Y}_{1,8}\text{Ba}_{2,4}\text{Cu}_{3,4}\text{O}_{7-x}$, но ниже температуры распада затравочного кристалла. Далее температура в печи опускалась до температуры зарождения домена из затравочного кристалла и постепенно снижалась со скоростью 0,2-0,3°C/ч. **Новизна.** Описана методика проведения измерения силы левитации. **Результат.** Получены зависимости приведенной массы монодоменных образцов YBCO (диаметром 30 мм) от времени насыщения кислородом. Методом РЭМ показано, что полученные рассматриваемым в работе методом сверхпроводники действительно являются монодоменными, о чем свидетельствует ступенчатая структура на поверхности. **Практическая значимость.** Исследование в области синтеза сверхпроводящих монодоменных керамик позволит повысить такие характеристики, как захваченное магнитное поле, и использовать ее в качестве сверхсильных магнитов.

Ключевые слова: монодоменные образцы YBCO, сила левитации, оптимальные режимы отжига керамик, перитектический расплав YBCO

© Теплоухов А. А., Серопян Г.М., Сычев С.А., Федосов Д.В., Семенюк Н.А., Скакун Д.В., 2026

Для цитирования

Исследование монодоменных сверхпроводящих керамических образцов YBCO с высокими критическими параметрами / Теплоухов А.А., Серопян Г.М., Сычев С.А., Федосов Д.В., Семенюк Н.А., Скакун Д.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 165-172. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-165-172>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDY OF SINGLE-DOMAIN YBCO SUPERCONDUCTING CERAMIC SAMPLES WITH HIGH CRITICAL PROPERTIES

Teploukhov A.A.¹, Seropyan G.M.², Sychev S.A.², Fedosov D.V.², Semenyuk N.A.¹, Skakun D.V.¹

¹ Omsk State Technical University, Omsk, Russia

² Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

³ Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The rapid development of modern engineering and electronics necessitates the improvement of industrial production methods for superconducting systems exhibiting high superconducting performance parameters, such as critical current density $J_c \sim 90$ and superconducting transition temperature ($T_c \sim 90$ K). In this work, the process of growing superconducting crystals has been successfully investigated and tested, enabling the production of YBCO single-domain samples of various sizes with specified characteristics (diameters ranging from 20 to 50 mm). The process involves domain growth from a peritectic melt using MgO-doped $\text{Sm}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_{7-x}$ single crystals as seed crystals. **Methods Applied.** Single-domain superconductors have been grown using the top-seeded melt growth technique with a seed crystal having a higher melting point than the superconducting material. Pellet-shaped samples have been fabricated by unidirectional uniaxial pressing of a powder mixture of $\text{Y}_{1.8}$ and 1% CeO_2 . The batch of samples has been heated to 1055 K, which is above the peritectic decomposition temperature of $\text{Y}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_{7-x}$ but below the decomposition temperature of the seed crystal. Subsequently, the furnace temperature has been lowered to the domain nucleation temperature, and then gradually decreased at a rate of 0.2-0.3 °C/h. **Originality.** A methodology for measuring the levitation force of superconducting samples is presented. **Result.** The dependence of the normalized mass of YBCO single-domain samples (30 mm in diameter) on oxygenation time has been obtained. Scanning electron microscopy (SEM) has demonstrated that the superconductors produced by the proposed method are indeed single-domain, as confirmed by the characteristic stepped surface morphology. **Practical Relevance.** Research on the synthesis of superconducting single-domain ceramics will make it possible to improve such characteristics as trapped magnetic field and enable their application as ultra-high-strength magnets.

Keywords: YBCO single-domain samples, levitation force, optimal ceramic annealing regimes, YBCO peritectic melt

For citation

Teploukhov A.A., Seropyan G.M., Sychev S.A., Fedosov D.V., Semenyuk N.A., Skakun D.V. Study of Single-Domain YBCO Superconducting Ceramic Samples with High Critical Properties. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 165-172. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-165-172>

Введение

Материалы на основе YBCO являются перспективными материалами с высокими критическими параметрами: критической плотностью тока $J_c \sim 90 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ и температурой перехода $T_c \sim 90$ К в сверхпроводящее состояние [1, 2]. Методика выращивания сверхпроводящих монокристаллов методом плавления спрессованной смеси порошков стала стандартной техникой для производства объемных сверхпроводящих образцов с высокими критическими параметрами [3-6]. Авторами в течение семи лет исследовались условия синтеза и накоплен значительный опыт в получении сверхпроводящих поликристаллических и монокристаллических образцов состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ диаметром от 20 до 50 мм.

В данной работе описан метод получения объемных сверхпроводников $\text{Y}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_{7-x}$ (Y1.8) цилиндрической формы диаметром 30 мм, а также приведены результаты анализа выращенного монокристалла Y1.8 .

Материалы и методы исследования

Для приготовления образцов $\text{Y}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_{7-x}$ (Y1.8) использовались реактивы $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, CuO марки ЧДА и Y_2O_3 марки ОСЧ в необходимых количествах. Реактивы перемешивались и были подвержены медленному нагреву в серебряном тигле при температуре от 22 до 890-900°C в течение 9-12 ч. Смесь начинает плавиться при температуре около 650-660°C, при этом расплавленный азотнокислый барий начинает интенсивно взаимодействовать с Y_2O_3 и CuO . Дальнейшее медленное нагревание необходимо для завершения реакции разложения $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ и его более полного взаимодействия с CuO и Y_2O_3 . Полученный после охлаждения спек легко извлекается из тигля и подвергается грубому размолу до размера частиц 1-3 мм, после чего в него добавляется 1% порошка диоксида церия (CeO_2) от общей массы.

Смесь перемешивалась и размалывалась в шаровой мельнице HSIANG TAI (ball mill) в течение 6 ч для обеспечения однородности полученного порошка и дальнейшего насыщения кислородом [5, 7-

9]. Полученный порошок просеивался через сито марки Haver & Boecker, размер ячеек 150 мкм. Для определения размера частиц исходного порошка диоксида церия (CeO_2), а также смеси порошка Y1.8 и CeO_2 использовался анализатор размера частиц SALD-2300. На **рис. 1** представлена функция распределения частиц по размеру для исходного CeO_2 и для смеси порошка Y1.8 и CeO_2 .

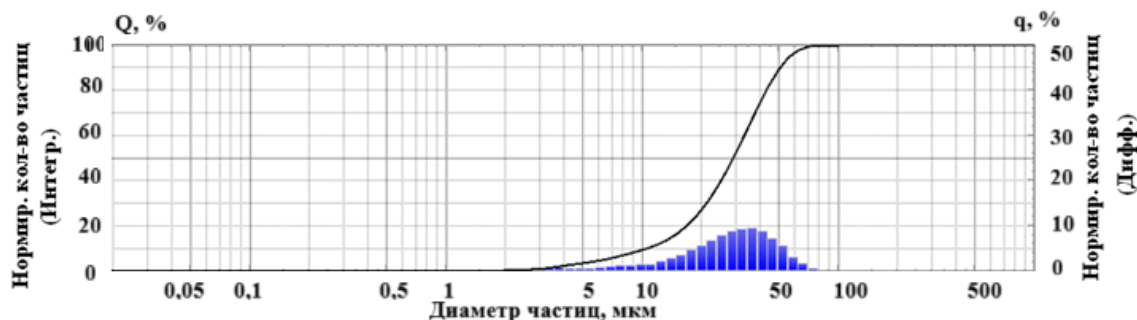
Из **рис. 1, а** видно, что основной размер частиц находится в диапазоне 10–80 мкм, ~20% (максимальное количество частиц) имеют диаметр около 35 мкм. Согласно функции распределения частиц смеси порошка Y1.8 и CeO_2 , наблюдается два распределения: первое – от 1 до 30 мкм, характерное для CeO_2 , распределение стало более плавным (отсутствует четко выраженный пик); второе – соответствует распределению частиц Y1.8. Максимальное количество частиц Y1.8 приходится на ~100 мкм.

Просеянный порошок уплотнялся в стальной форме методом одноосного прессования в заготовку диаметром 33 мм и высотой 100 мм под давлением 1800–2000 кг/см². На полученную заготовку по центру накладывался затравочный монокристалл $\text{Sm}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_{7-x}$ (Sm1.8), допированный 1 мас.% MgO. Образцы YBCO выращивались из расплава в

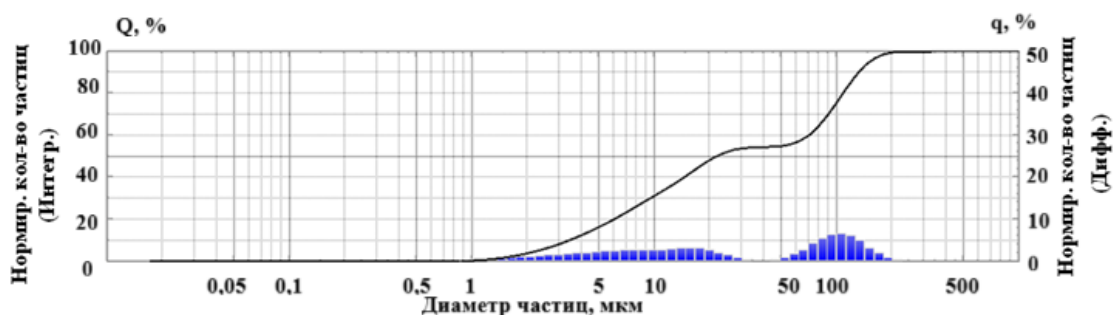
течение 120 ч при температуре от 1055 до 982°C, с медленным охлаждением. Процесс роста монокристалла начинается при нагреве выше температуры перитектического расплава $\text{Y}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_{7-x}$ (Y1.8), но ниже температуры перитектического расплава затравочного кристалла $\text{Sm}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_{7-x}$ (Sm1.8). В ходе синтеза происходит постепенное снижение температуры со скоростью 0,2–0,3°C/ч [10]. В результате получен образец $\text{Y}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_{6.5}$ (Y1.8).

Верхняя поверхность полученных образцов шлифовалась до выравнивания по краям, а нижняя часть отрезалась плоскопараллельно верхней поверхности алмазным диском. Для увеличения концентрации кислорода образцы помещали в кварцевую печь при температуре 400–450°C в течение 48–96 ч в зависимости от размера монокристалла, в результате чего был получен образец $\text{Y}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_{6.95}$ (Y1.8), приготовленный с использованием затравки $\text{Sm}_{1.8}\text{Ba}_{2.4}\text{Cu}_{3.4}\text{O}_{7-x}$ (Sm-1.8) методом роста из расплава.

На **рис. 3** представлена зависимость относительной массы монокристаллического образца YBCO диаметром 30 мм от времени насыщения кислородом при 420°C.



а



б

Рис. 1. Функция распределения размера частиц: а – для исходного порошка CeO_2 ; б – для смеси порошка Y1.8 и CeO_2

Fig. 1. Particle size distribution function: a is for the initial CeO_2 powder; б is for the Y1.8- CeO_2 powder mixture



Рис. 2. Образец $Y_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_{6.95}$ (Y1.8)
 Fig. 2. Sample $Y_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_{6.95}$ (Y1.8)

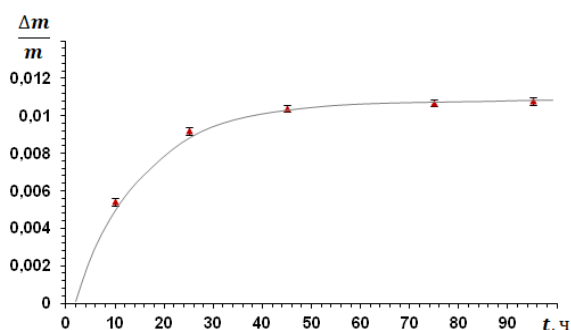


Рис.3. Зависимость относительной массы образца от времени насыщения кислородом при 420°C
 Fig. 3. Dependence of the sample's relative mass on the oxygen saturation time at 420°C

Из графика видно, что относительная масса образца вначале увеличивается до 40 ч, затем практически не изменяется от времени выдержки. Увеличение массы образца обусловлено ростом концентрации кислорода.

Для определения силы левитации монодоменного образца Y1.8 используется медная пластинка в

пенопластовом контейнере, который размещается на настольных весах. Над образцом находится неодимовый магнит диаметром 30 мм и напряженностью магнитного поля на поверхности 0,5 Тл. Напряженность магнитного поля измерялась теслометром с датчиком Холла. Между неодимовым магнитом и медной пластинкой включен звуковой генератор через звуковой динамик, который в момент приближения неодимового магнита на расстояние 0,5 мм до монодоменного образца издает сигнал. В пенопластовый контейнер наливается жидкий азот и после прекращения кипения жидкости на поверхности образца фиксируются показания силы левитации.

Для анализа морфологии поверхности и подтверждения элементного состава сверхпроводящие монодоменные образцы YBCO, полученные из расплава, исследовались методом РЭМ на растровом электронном микроскопе JEOL-5700 с приставкой для энергодисперсионного анализа JED-2300.

По методу Виккерса была определена микротвердость в различных точках поверхности кристалла монодомена.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 представлено полученное РЭМ-изображение поверхности образца YBCO при увеличении 33 и 50 крат.

Поверхность образца характеризуется микроступенями, сходящимися к отчетливым ребрам. Такая структура характерна для спирального механизма роста кристаллов [11] и соответствует зонально-секторальной структуре. Из этого предположения следует, что рост граней монодоменной структуры YBCO идет через образование и развитие спиралей. Область поверхности, расположенная наиболее близко к затравочному кристаллу, является наиболее гладкой и ступени на ней отсутствуют.

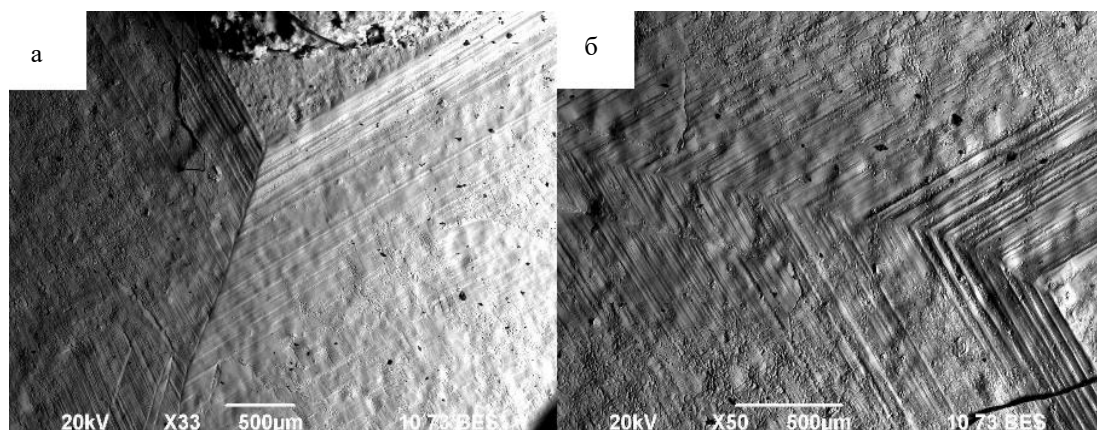


Рис. 4. РЭМ-изображения поверхности сверхпроводящих монодоменных образцов YBCO в режиме отраженных электронов при увеличении: а – 33 крат; б – 50 крат

Fig. 4. SEM images of the surface of YBCO single-domain superconducting samples in backscattered electron mode at magnifications of: a is $\times 33$; б is $\times 50$

На **рис. 5** представлены результаты измерения описанных ступеней.

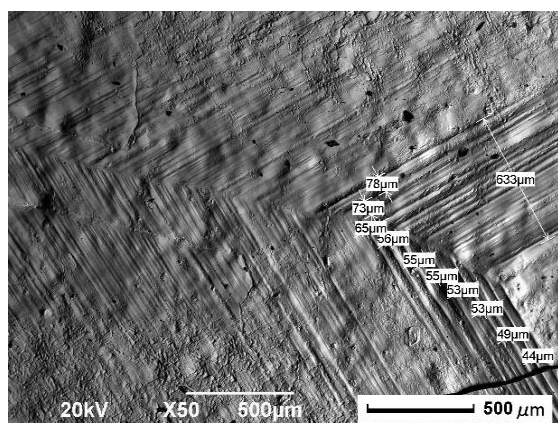


Рис. 5. Результаты измерения морфологии образца YBCO

Fig. 5. Results of YBCO sample morphology measurements

По проведенным измерениям (см. **рис. 5**) установлено, что по мере отдаления от затравочного кристалла ступени становятся менее четкими, а ширина ступеней увеличивается. Таким образом, ширина изменяется с 44 до 78 мкм, а на расстоянии 633 мкм от гладкого участка поверхности невозможно различить отдельные ступени. Полученная морфология позволяет предположить, что по мере роста новые ступени растут отложением слоев, продвигаясь из центра к поверхности, что также соответствует механизму спирального роста [11].

Увеличение ширины ступеней, а также снижение их четкости может свидетельствовать о снижении степени монокристалличности и постепенном переходе в поликристаллическую форму. Такое поведение наблюдается на микрофотографиях образца, представленных на **рис. 4**. Об этом свидетельствует четко выраженный квадрат на поверхности (см. **рис. 2**), отличающийся цветом и отделенный четкой границей от оставшегося объема материала [1, 11]. Предположительно, такой переход из моно- в поликристаллическое состояние может быть связан с высокой скоростью охлаждения получаемых образцов при увеличении их объема (даже отклонение на несколько десятых долей градуса способно привести к такому росту). Известно, что с повышением скорости охлаждения скорость роста увеличивается, размер кристаллитов, из которых состоит кристалл сверхпроводника, уменьшается, а степень их разориентировки возрастает [10].

В **табл. 1** приведены результаты энергодисперсионного анализа для областей при различном удалении от затравочного кристалла.

Из полученных данных предположено, что по мере отдаления от затравочного кристалла происходит постепенное увеличение содержания меди и снижение концентрации кислорода. Если предположить,

что тенденция увеличения содержания меди по мере удаления от затравочного кристалла сохраняется, это может являться одной из причин снижения монокристалличности [11].

Таблица 1. Зависимость концентрации от расстояния до затравочного кристалла

Table 1. Dependence of elemental concentration on the distance from the seed crystal

Расстояние от затравочного кристалла, мкм	Концентрация, ат.%			
	Y	Ba	Cu	O
500	7,2	17,4	24,2	51,2
1000	8,1	20,0	28,4	43,4
1500	7,9	19,9	29,5	42,7

Снижение монокристалличности может свидетельствовать о появлении дефектов в виде угла разориентировки соседних зерен в структуре образцов.

На **рис. 6** показаны зависимости силы левитации от расстояния между магнитом и образцом Y1.8 для диаметров 30 мм (**рис. 6, а**) и 40 мм (**рис. 6, б**).

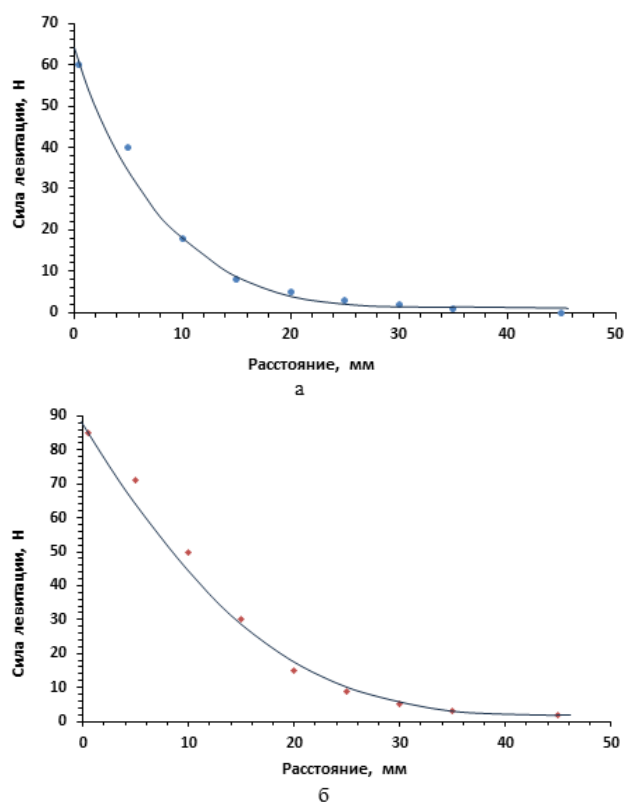


Рис. 6. Зависимость силы левитации от расстояния между неодимовым магнитом и образцом Y1.8: а – для образца диаметром 30 мм и толщиной 10 мм; б – для образца диаметром 40 мм и толщиной 10 мм

Fig. 6. Dependence of levitation force on the distance between the neodymium magnet and the Y1.8 sample: а is sample with a diameter of 30 mm and thickness of 10 mm; б is sample with a diameter of 40 mm and thickness of 10 mm

Из графиков видно, что с увеличением расстояния между магнитом и образцом сила левитации уменьшается. Для образца 40 мм абсолютные значения силы левитации выше, чем для образца 30 мм.

На одинаковых расстояниях от затравочного кристалла на разных плоскостях значение микротвердости практически не изменяется, а с увеличением расстояния до затравочного кристалла наблюдается уменьшение микротвердости образца (табл. 2). Такое изменение микротвердости образца может быть обусловлено ростом зерен структуры образцов, а также образованием дефектов в виде кластеров вакансионного типа за счет диффундирования кислорода и возникновения микрообластей с различной кислородной нестехиометрией [1].

Таблица 2. Изменение микротвердости монодоменов от расстояния до затравочного кристалла
Table 2. Variation of the microhardness of single domains with distance from the seed crystal

Расстояние от затравочного кристалла, мкм	Твердость HV				
	Плоскость 1	Плоскость 2	Плоскость 3	Плоскость 4	На стыке между плоскостями
1000	1459	1461	1465	1460	1490
4000	1111	1050	1179	1164	1320
7000	940	945	936	944	1227

Заключение

Изготовление качественных монодоменных сверхпроводников YBCO представляет собой многопараметрическую задачу. Одним из самых капризных параметров является точное знание температуры перитектического распада для полученной смеси. Эта температура может изменяться в известных пределах в зависимости от качества используемых исходных реактивов, а также методики приготовления исходной шихты для синтеза. Точное знание этой температуры позволяет синтезировать монодоменные образцы максимального размера без роста паразитных кристаллитов вокруг основного домена. Эксперименты также показали, что температурное поле внутри печи должно быть очень однородным и показания термопары должны быть поверены известными способами по эталону или по температуре затвердевания чистых металлов (например, серебра).

Методом РЭМ показано, что полученные рассматриваемым в работе методом сверхпроводники действительно являются монодоменными, о чем свидетельствует ступенчатая структура на поверхности. Наличие такой структуры также является показателем того, что домены растут по спиральному механизму. Изменение ширины и четкости ступенек свидетельствует о снижении монокристалличности и постепенном переходе образца в поликристаллическое состояние от центра к краям. Помимо этого, о

постепенном снижении монокристалличности может свидетельствовать возрастающее содержание меди при удалении от затравочного кристалла. Уменьшающаяся степень монокристалличности предположительно указывает на возрастание количества дефектов в структуре, что отрицательно влияет на силу левитации сверхпроводников. Снижение микротвердости также может говорить о дефектном изменении структуры. Такой подход становится особенно актуальным при синтезе образцов 40, 50 мм в диаметре и более.

Основными проблемами, не позволяющими внедрить производство сверхпроводников Y1.8 стандартными методами на рынок, является высокая стоимость химических компонентов, используемых в процессе изготовления, особые условия их обработки, необходимость четкого детального контроля, как катионной стехиометрии, так и кислородной нестехиометрии. Поскольку ключевые свойства рассматриваемого типа сверхпроводников зависят от содержания в их структуре слабосвязанного кислорода.

Наиболее вероятно получение дефектов в виде разориентированных соседних зерен по краям кристалла при недостаточно долгом обжиге в чистом кислороде, что видно по уменьшению концентрации кислорода.

Эмпирически установлено, что с точки зрения ряда аспектов производства и эксплуатации оптимальным диаметром таких образцов является 20–30 мм. Такие образцы стабильно получаются односторонним одноосевым прессованием вместо изостатического, что сокращает время производства и снижает расход реагентов. Хотя захваченное магнитное поле, связанное с левитацией, теоретически пропорционально диаметру диска, на практике оказывается, что эффективная сила левитации (отношение силы левитации к массе образца) у дисков среднего размера выше, чем у 40 и 50 мм. Вследствие этого для достижения требуемой на заданной площади силы левитации выгоднее использовать комбинации сверхпроводящих дисков меньшего размера вместо использования более крупных.

Список источников

1. Свойства керамик YBCO в зависимости от допирования кислородом / А.Э. Рабаданова, С.Х. Гаджимагомедов, Д.К. Палчаев и др. // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер. 1. Естественные науки. 2022. Т.37. Вып. 3. С.42-56.
2. Namburi D. K., Shi, Y., Cardwell D. The processing and properties of bulk (RE)BCO high temperature superconductors: current status and future perspectives // Superconductor Science and Technology. 2021, no. 34, 053002.
3. Финкель В.А. Электропроводность керамических ВТСП $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ с различным содержанием кислорода при низких температурах // ФНТ. 2002. Т. 28. В. 8/9. С. 952-957.
4. Сычѳв С. А., Серопян Г. М., Позыгун И. С. Определение содержания кислорода в сверхпроводящем купра-

- те $YBa_2Cu_3O_x$ методом электродных потенциалов // Вестник Омского университета 2022. Т. 27, № 1. С. 37-41.
- Получение наноструктурированных материалов на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ / С.Х. Гаджимагомедов, М.П. Фараджева, А.Ф.А. Табит и др. // Вестник Дагестанского государственного университета. 2014. Вып. 1. С. 36-42.
 - Связь эффектов проводимости и сверхпроводимости YBCO с особенностями кристаллической структуры / Д.К. Палчаев, С.Х. Гаджимагомедов, Ж.Х. Мурлиева и др. // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер. 1. Естественные науки. 2020. Т.35. Вып. 3. С. 96-102.
 - Керамические материалы на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, полученные из нанопорошков / С.Х. Гаджимагомедов, Д.К. Палчаев, М.Х. Рабаданов и др. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, №. 1. С. 9-16.
 - Сверхпроводящая микрокристаллическая керамика YBCO: корреляции структуры и свойств / А.Э. Рабаданова, С.Х. Гаджимагомедов, Д.К. Палчаев и др. // Прикладная физика. 2025. №1 С. 84-91.
 - Влияние параметров механоактивации на формирование сверхпроводящей фазы в YBCO-композите / С. Толендиулы, Э. Совет, М. Садыков и др. // Горение и плазмохимия. 2024. № 22 (3). С. 241-250.
 - Effects of cooling rate on single domain growth and the superconducting properties for YBCO bulk / L. Xiao, H. T. Ren, Yanmei Jiao et al. //Physica C: Superconductivity. 2003, vol. 386, pp. 262-265.
 - Чурин С. А., Юнин П. А. Ориентированный рост монокристаллов $YBaCuO$ //Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 1(1). С. 53-56.
 - at low temperatures. *FNT* [FNT]. 2002;28(8/9):952-957. (In Russ.)
 - Sychev S. A., Seropyan G. M., Pozygun I. S. Determination of oxygen content in superconducting cuprate $YBa_2Cu_3O_x$ by the method of electrode potentials. *Vestnik Omskogo universiteta* [Herald of Omsk University]. 2022;27(1):37-41. (In Russ.)
 - Gadzhimagomedov S.Kh., Faradzheva M.P., Tabit A.F.A. et al. Obtaining nanostructured materials based on $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Dagestan State University], 2014;(1):36-42. (In Russ.)
 - Palchaev D.K., Gadzhimagomedov S.H., Murlieva J.H. et al. The connection of the effects of conduction and superconductivity of YBCO with the features of the crystal structure. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 1. Estestvennye nauki* [Bulletin of Dagestan State University. Ser. 1. Natural Sciences]. 2020;35(3):96-102. (In Russ.)
 - Gadzhimagomedov S.H., Palchaev D.K., Rabadanov M.H. et al. Ceramic materials based on $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ obtained from nanopowders. *Pisma v ShTF* [Letters to the Journal of Technical Physics]. 2016;42(1):9-16. (In Russ.)
 - Rabadanova A. E., Gadzhimagomedov S. H., Palchaev D. K. et al. YBCO superconducting microcrystalline ceramics: Correlations of structure and properties. *Prikladnaya fizika* [Applied Physics]. 2025;(1):84-91. (In Russ.)
 - Tolendiuly S., Sovet E., Sadykov M. et al. The influence of mechanical activation parameters on the formation of a superconducting phase in YBCO composites. *Gorenie i plazmokhimiya* [Combustion and plasma chemistry]. 2024;(22(3)):241-250. (In Russ.)
 - Xiao L., Ren H. T., Jiao Y. L., Zheng M. H., Chen Y. X. Effects of cooling rate on single domain growth and the superconducting properties for YBCO bulk. *Physica. C, Superconductivity*. 2023;386:262-265. doi.org/10.1016/S0921-4534
 - Churin S. A., Yunin P. A. Oriented growth of monodomain $YBaCuO$ crystals. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Bulletin of Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky], 2013;(1(1)):53-56. (In Russ.)

References

- Rabadanova A.E., Gakhimagomedov S.H., Palchaev D.K. et al. Properties of YBCO ceramics depending on oxygen doping. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Dagestan State University]. 2022;37(3):42-56. (In Russ.)
- Namburi D. K., Shi, Y. and Cardwell D. The processing and properties of bulk (RE)BCO high temperature superconductors: current status and future perspectives. *Superconductor Science and Technology*. 2021;(34):053002. doi:10.1088/1361-6668/abde88
- Finkel V.A. Electrical conductivity of ceramic $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ceramic HTS with different oxygen content

Поступила 06.11.2025; принята к публикации 19.01.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 06/11/2025; revised 19/01/2026; published 30/06/2026

Теплоухов Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Серопян Геннадий Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент,
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия.
Email: ser_gm@mail.ru. ORCID 0000-0001-8626-2893

Сычев Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент,
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия.
Email: sychev226@mail.ru. ORCID 0000-0003-3849-8927

Федосов Денис Викторович – учебный мастер,
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия.
Email: feden86@mail.ru. ORCID 0000-0002-5617-112X

Семенюк Наталья Андреевна – кандидат технических наук, доцент,
Нижевартовский государственный университет, Нижневартовск, Россия.
Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

Скакун Дмитрий Викторович – аспирант,
Омский государственный технический университет», Омск, Россия.
Email: skakun_dmitrii@mail.ru. ORCID 0009-0008-9768-6227

Andrey A. Teploukhov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Gennady M. Seropyan – PhD (Eng.), Associate Professor,
Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia.
Email : ser_gm@mail.ru. ORCID 0000-0001-8626-2893

Sergey A. Sychev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia.
Email: sychev226@mail.ru. ORCID 0000-0003-3849-8927

Denis V. Fedosov – Training Master,
Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia.
Email: feden86@mail.ru. ORCID 0000-0002-5617-112X

Natalya A. Semenyuk – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia.
Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

Dmitry V. Skakun – Postgraduate Student,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: skakun_dmitrii@mail.ru. ORCID 0009-0008-9768-6227

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.922: 621.921.34
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-173-180



ПРОГРАММА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РАСЧЕТА СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГРАММ ИСИКАВЫ-ПАРЕТО – MIXPARETO V3.0

Евсеев А.В., Яковлев Б.С., Карпилов Д.А., Черкаев Я.А., Петров С.А., Маркаров Е.Э.

Тульский государственный университет, Тула, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Актуальность работы обусловлена необходимостью получения гетерогенных композиций с заданными и обеспеченными показателями качества, что не позволяет получать ни одна традиционная технология. **Цель работы.** Реализация и изучение программы оптимизации поиска и анализа наиболее важных параметров для формирования показателей качества композитов и гетерогенных смесей, полученных различными методами и на различном оборудовании, в том числе с использованием нового класса автоматизированных машин – немиксеров методами управляемой однородности. **Используемые методы.** Ввод исходных данных для расчета осуществляется с использованием диаграммы Исикавы, а анализ полученных результатов осуществляется на основе данных диаграммы Парето. Оптимизация параметров производственных процессов осуществлялась с использованием симбеоза данных инструментов TQM с расширенным выбором различных алгоритмов, находящихся в теле разработанного программного обеспечения. **Новизна.** Методы управляемой однородности являются оригинальными и подтверждены соответствующими охраняемыми документами на технологические методы, оборудование и программное обеспечение. Научная новизна заключается в разработке и использовании новых методов формирования управляемой однородности гетерогенных композиций. **Результат.** Использование разработанного программного продукта позволило на практике применительно к некоторым (металлическим и неметаллическим) гетерогенным композициям оптимизировать получение высокой управляемой однородности и улучшить показатели качества композиций от 25% и выше. **Практическая значимость.** Использование разработанного программного обеспечения целесообразно и возможно как в условиях реальных производственных процессов для улучшения качества выпускаемой продукции, так и в учебных целях при подготовке специалистов различного уровня профильных направлений.

Ключевые слова: композиты, гетерогенные композиции, смеси, управляемая однородность, оптимизация, диаграмма Исикавы, диаграмма Парето, программное обеспечение, эксперимент, верификация

© Евсеев А.В., Яковлев Б.С., Карпилов Д.А., Черкаев Я.А., Петров С.А., Маркаров Е.Э., 2026

Для цитирования

Программа для производственного расчета свойств композитов с использованием диаграмм Исикавы-Парето – MixPareto V3.0 / Евсеев А.В., Яковлев Б.С., Карпилов Д.А., Черкаев Я.А., Петров С.А., Маркаров Е.Э. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 173-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-173-180>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MIXPARETO V3.0: SOFTWARE FOR INDUSTRIAL CALCULATION OF COMPOSITE PROPERTIES USING ISHIKAWA-PARETO DIAGRAMS

Evseev A.V., Yakovlev B.S., Karpilov D. A., Cherkaev Ya.A., Petrov S.A., Markarov E.E.

Tula State University, Tula, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The relevance of this study is determined by the need to produce heterogeneous compositions with specified and guaranteed quality characteristics that cannot be achieved by conventional technologies. **Objectives.** The study is aimed at implementing and investigating a software program for optimizing the search and analysis of the most significant parameters influencing the quality characteristics of composites and heterogeneous mixtures produced by various methods and equipment, including a new class of automated machines such as non-mixers using the controlled homogeneity approach. **Methods Applied.** Input data for calculations are generated using the Ishikawa diagram, while the analysis of the obtained results is based on the Pareto diagram. Optimization of production process parameters is carried out through the symbiosis of these TQM tools, combined with an extended selection of algorithms integrated into the developed software package. **Originality.** The controlled homogeneity methods are original and are protected by relevant intellectual property documents covering technological methods, equipment, and software. The scientific novelty lies in the development and application of new methods for achieving controlled homogeneity in heterogeneous compositions. **Results.** The developed software product was successfully applied to a number of metallic and non-metallic heterogeneous compositions, enabling the optimization of controlled homogeneity and improving quality indicators by 25% or more. **Practical Relevance.** The developed software can be effectively used both in real industrial production processes to improve product quality and in educational activities for training specialists at various levels in relevant engineering fields.

Keywords: composites, heterogeneous compositions, mixtures, controlled homogeneity, optimization, Ishikawa diagram, Pareto diagram, software, experiment, verification

For citation

Evseev A.V., Yakovlev B.S., Karpilov D. A., Cherkaev Ya.A., Petrov S.A., Markarov E.E. MIXPARETO V3.0: Software for Industrial Calculation of Composite Properties Using Ishikawa-Pareto Diagrams. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 173-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-173-180>

Введение

Производство композитных материалов является высокотехнологическим, трудоемким и энергозатратным производственным процессом. Это, в свою очередь, накладывает ряд жестких требований как на входные, так и выходные технологические и производственные показатели соответствующих инновационных технологических процессов.

Появление новых свойств материалов возможно только при высокой степени их однородности. Обеспечение такой высокой заданной, а в отдельных случаях – управляемой однородности получаемых композитов, а также создание высокого уровня автоматизации инновационных технологических процессов требует использования новых методов организации производства и нестандартных технологических подходов.

Традиционными методами миксинга достичь таких показателей практически невозможно. Кроме того, управление однородностью требует управления качеством получаемой продукции в соответствии нормативными документами, принципами и использованием различного инструментария общей теории управления качеством (TQM) [1-6].

Обеспечение такого управления невозможно без современных АСУ и соответствующего программного обеспечения к ним. Еще сложнее обеспечить высокую производительность производства гетерогенных композиций при минимуме брака. Поэтому научно-техническая задача производства композитов с новыми эксплуатационными свойствами при обеспечении заданного уровня показателей их качества методами управляемой однородности является актуальной и полностью соответствует пункту 21, а «Стратегии научно-технологического развития РФ» в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 года № 145. Решению этой задачи посвящены материалы данного исследования.

Материалы и методы исследования

Оптимизация управления качеством производства композитов методами управляемой однородности. Одним из наиболее перспективных подходов к решению данной научно-технической проблемы является разработка и применение нового типа автоматических технологических машин – нонмиксеров [1, 2, 7-10]. Эти устройства совместно с тонкопоточными дозирующими механизмами позволяют точно контролировать и регу-

лизовать состав получаемых смесей и композитов, обеспечивая более высокое качество и точность соотношения компонентов. При этом технологические процессы реализуются в условиях реального производства и в полном соответствии с принципами TQM.

В отличие от классических смесителей, нонмиксеры обеспечивают высокоточный синтез гетерогенных сред с различными физико-механическими свойствами, что гарантирует стабильность однородности. Основу процесса производства составляет подача компонентов в рабочую зону нонмиксера с помощью дискретных микродоз или непрерывных тонкоструйных потоков, в зависимости от типа используемых дозаторов.

За основу структуры и собственно наполнения программы авторами используется диаграмма Исикавы (рис. 1), основные факторы или группы факторов которой используются для ввода и первичного анализа данных в режиме реального времени при использовании разработанного ПО.

На данном примере основные группы факторов диаграммы Исикавы определены следующими группами: материалы, оборудование, технология, измерения и персонал. В каждой группе на диаграмме определены факторы первого порядка (см. рис. 1).

Оптимизация управления качеством при производстве композитов с помощью программного пакета *MixPareto v3.0* (далее – разработанное ПО [10]). Теперь уже с помощью диаграммы Парето методами разработанного ПО проводится вторичный, в том числе и корреляционный межфакторный анализ введенных или вновь введенных факторов или групп факторов. Все расчеты проводятся в рамках методов инструментария TQM и в процессе обработки информации многократно обновляются для нахождения максимального или наиболее эффективного конечного результата [7-10].

Интерфейс программы содержит три рабочих пространства: элемент для работы с факторами (рис. 2), диаграмма Парето (рис. 3), область изменения параметров диаграммы (рис. 4). Особенностью такой реализации интерфейса является то, что пользователю предоставляется возможность вводить факторы, проводить экспертную оценку, отслеживать изменения диаграммы Парето в режиме реального времени, задавать шаг графика и желаемый процент качества, а также отправлять результаты на печать.

Мы ввели параметры из диаграммы Исикавы на рис. 1, дали экспертные оценки каждому из них и получили результат (см. рис. 2), демонстрирующий тривиальные и значимые факторы в данном выборе. Тривиальные факторы выделены красным цветом, значимые – зеленым. Таким образом, благодаря программному обеспечению мы можем оценить и выделить группы факторов, оказывающих наибольшее влияние на процесс. По результатам расчетов в программе мы видим, что из набора факторов с рис. 1 мы получили, что тривиальными являются: рабочая группа, квалификация сотрудников, принципы управления и метрологическое обеспечение (сопровождение) соответствующего процесса синтеза композита. Значимые факторы: принцип укладки микродоз, скорость нонмиксинга, способы анализа, точность дозирования, хранение сырья, свойства сырья.

Теперь, изменяя экспертные оценки, мы будем получать разные результаты в режиме реального времени, что поможет нам точнее оценивать процесс. Более того, программа позволяет добавить новые факторы.

Также программа позволяет установить желаемый уровень качества, поменять шаг графика, экспортировать и распечатать результат (см. рис. 4).

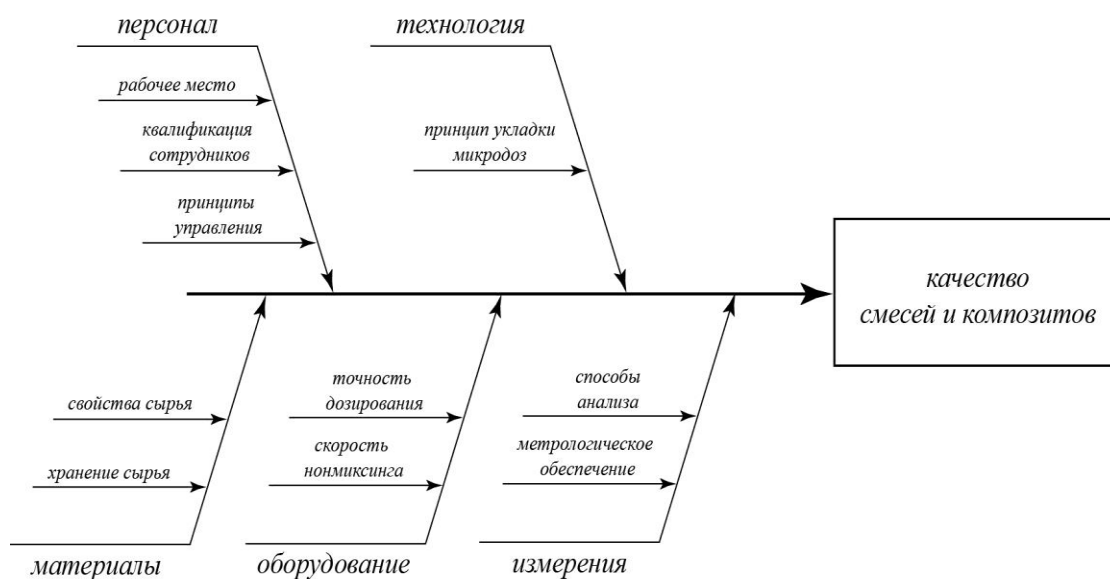


Рис. 1. Пример диаграммы Исикавы, используемой при производстве композитов
Fig. 1. Example of Ishikawa diagram used in composites production

Факторы		
Количество:	10	
Общее значение:	100	
Название	%	☑
Рабочее место	8	<input checked="" type="checkbox"/>
Квал. сотрудников	7	<input checked="" type="checkbox"/>
Принципы управлени	6	<input checked="" type="checkbox"/>
Принцип укладки до:	17	<input checked="" type="checkbox"/>
С-ва сырья	9	<input checked="" type="checkbox"/>
Хранения сырья	9	<input checked="" type="checkbox"/>
Точность дозировани	12	<input checked="" type="checkbox"/>
Скорость нонмиксинг	14	<input checked="" type="checkbox"/>
способы анализа	13	<input checked="" type="checkbox"/>
Метрологическое о-е	5	<input checked="" type="checkbox"/>

Рис. 2. Добавление факторов
Fig. 2. Adding factors

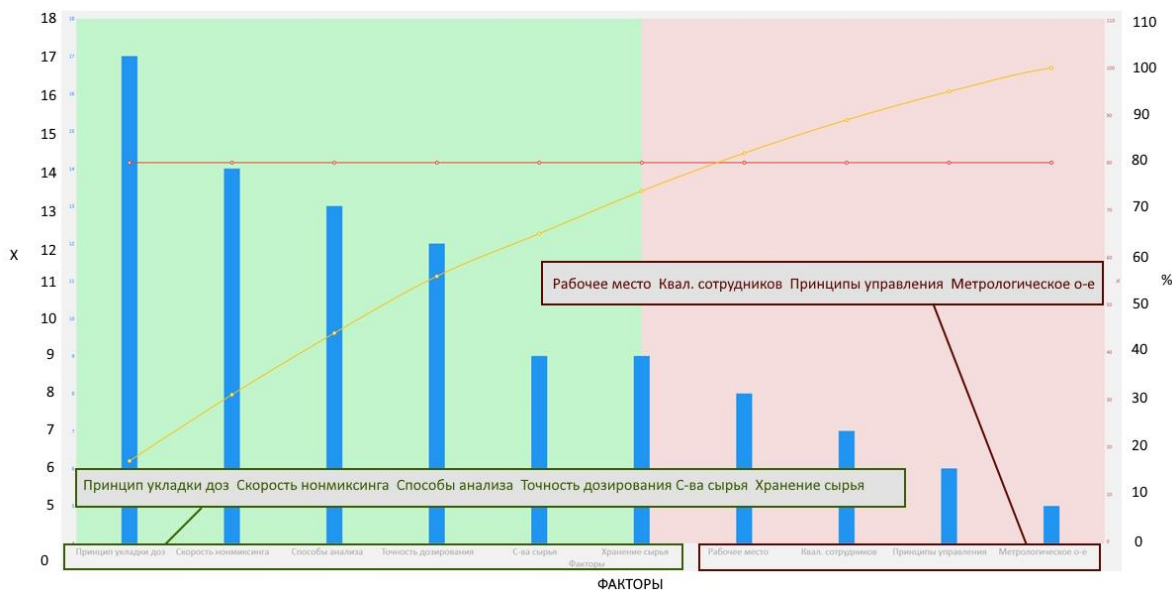


Рис. 3. Диаграмма Парето
Fig. 3. Pareto diagram

Уровень (%): <input type="text" value="80"/> <input type="button" value="Изменить"/>	Шаг графика: <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="Изменить"/> Авто: <input type="checkbox"/>	Факторы: <input checked="" type="checkbox"/> Значимые <input type="checkbox"/> Тривиальные	Печать и экспорт: <input type="button" value="Печать"/> <input type="button" value="Экспорт графика"/>
--	--	--	--

Рис. 4. Настройка диаграммы
Fig. 4. Diagram settings

Математические модели (подходы) процессов формирования однородности композитов из управляемых дискретных и непрерывных потоков компонентов и получения из них высокоэффективных продуктов рассмотрены в работах [2, 9, 10].

В ходе данного исследования были поставлены следующие задачи:

1) провести эксперимент получения композитов различного назначения, синтезируемых из непрерывных и дискретных потоков компонентов методами управляемой однородности на нонмиксерах [7, 8] при базовых (заданных) параметрах производства, рассчитанных при помощи разработанного программного обеспечения;

2) провести выборочный контроль и анализ качества композитов различного назначения;

3) провести разнонаправленные эксперименты при изменении входящих и выходных показателей производства при многофакторном расчете с помощью разработанного ПО;

4) провести комплексный анализ и верификацию полученных результатов.

Полученные результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования проводились на опытных стендах, обеспечивающих реализацию двух принципиально различных технологических решений нонмиксинга: из дискретных и непрерывных потоков, составляющих гетерогенные композиции компонентов.

Проведена соответствующая верификация разработанных математических моделей процессов нонмиксинга, зафиксированных в теле программы с результатами (выборочными), полученными экспериментально как авторами, так и другими исследователями [11-15].

Анализ данных для металлических композитов. Проведено сопоставление абсолютных и относительных характеристик качества продуктов, синтезируемых вероятностными и детерминированными методами и проведен сравнительный анализ [7, 8]. На **рис. 5** показано соотношение значений отклонений концентраций, составляющих композиты порошковых металлических компонентов при использовании двух вышеперечисленных способов.

Относительные показатели. В результате применения управляемого формирования однородности композитов при использовании алгоритма на базе разработанного ПО улучшилось качество металлических порошковых композитов:

- по техническим алмазам – от 1,6 до 9 раз;
- по олову – от 1,3 до 11,1 раза;
- по меди – от 2,5 до 14,9 раза.



Рис. 5. Предельные отклонения содержания компонентов в образцах инструментальных композитов: а – алмазы; б – олово; в – медь

Fig. 5. Maximum deviations in the component content of tool composite samples: а is diamonds; б is tin; в is copper

Анализ данных для неметаллических композитов. На **рис. 6** показано соотношение значений отклонений концентраций компонентов, составляющих бетонные композиты при использовании двух вышеперечисленных способов.

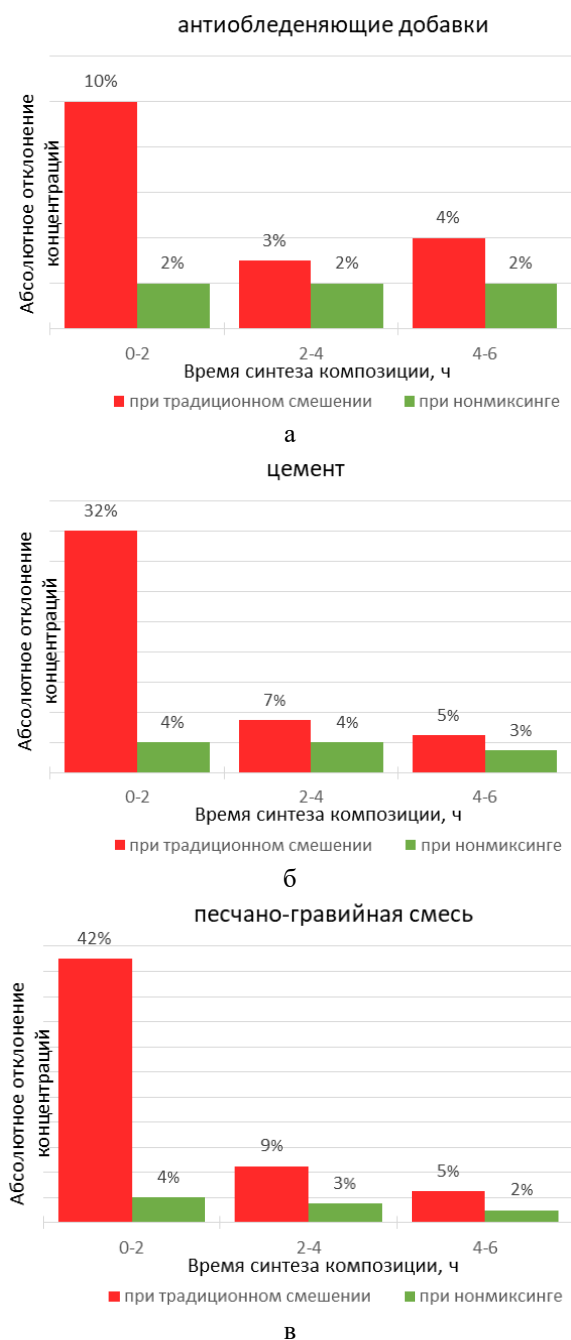


Рис. 6. Предельные отклонения содержания компонентов в образцах бетонных композитов: а – модификаторы; б – цемент; в – наполнитель

Fig. 6. Maximum deviations in the component content of concrete composite samples: а is modifiers; б is cement; в is filler

Относительные показатели. В результате применения управляемого формирования однородности смеси и ее оптимизации с помощью разработанного ПО качество композитных бетонов улучшилось по трём компонентам:

- по модификаторам – от 1,5 до 5 раз;
- по цементу – от 1,25 до 10,7 раза;

– по наполнителю – от 1,25 до 21,0 раза.

Теоретические разработки с использованием элементов теории немиксинга [6] вполне удовлетворительно подтверждены результатами экспериментальных исследований.

Можно сделать вывод, что получаемые потоки компонентов обеспечивают выдачу микродоз по массе и времени в отработанных экспериментально режимах в соответствии с распределением Гаусса, а данные устройства и методы синтеза потоков могут быть использованы далее в автоматах-немиксерах для получения высококачественных композиций с заданным гарантированным качеством и производительностью.

Верификация сходимости экспериментально полученных результатов с прогнозами, смоделированными с использованием разработанного ПО, не превысила уровень в 5-7%.

Заключение

Полученные в результате обработки информации данные при использовании разработанного ПО, в том числе и при учете полученных текущих экспериментальных характеристик, проходили верификацию при сравнении полученных расчетных и экспериментальных данных по показателям качества получаемых композитов.

В целях улучшения качества использования разработанного ПО было проведено более 1000 тестирований, как в лабораторных, так и в реальных производственных условиях. В конечном итоге разработано ПО версии 3.0, в том числе с использованием актуальных инструментов [16-18].

Однако понятно, что на перспективу необходимо разработать уже не прикладное ПО, а более совершенную экспертную систему, основной особенностью которой будет интеграция в нее корреляционных зависимостей и функций между параметрами (входными и выходными факторами) или их группами. При этом желательно использование не только стандартных функций, но и аппроксимированных зависимостей, полученных в условиях реальных промышленных экспериментов.

Основные результаты, полученные при внедрении разработанного ПО:

- уровень автоматизации с использованием разработанного ПО повышен на 15-25%;
- время нахождения оптимального решения (максимального качества) сокращено в 2-3 раза.

Список источников

1. Евсеев А.В. Теория и оборудование детерминированного формирования однородности гетерогенных смесей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13 / Евсеев Алексей Владимирович. Тула, 2021. 297 с.
2. Патент РФ № 2804823. Устройство для получения смеси из сыпучих компонентов. С01В 32/19, В82У 40/00 // Евсеев А.В. и др.; заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет. Опубл. 06.10.23. Бюл. № 28.

3. Капранова А.Б., Бакин М.Н., Верлока И.И. Моделирование критерия качества смеси в объеме барабанно-ленточного устройства // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 5. С. 3–9.
4. Размерные факторы в анализе качества перемешивания порошковых механических смесей / В.В. Мокрушин, А.Ю. Постников, А.А. Потехин, П.Г. Бережко, И.А. Царева, О.Ю. Юнчина // Молодежь в науке: сборник докладов 16-й научно-технической конференции. 2018. С. 98-103.
5. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
6. Мак-Келви Д.М. Переработка полимеров. Москва: Химия, 1965. 442 с.
7. Automated Production and Quality Control of Composites Produced by Automatic Non-Mixing Machines Employing Controlled Homogeneity Methods / Evseev A.V., Yuraskova I.A., Karpilov D. A., Cherkaev Y. A. // 2024 IEEE Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, Russia, 12–14 November 2024. С. 1–6. DOI: 10.1109/Dynamics64718.2024.10838640.
8. Providing production control of heterogeneous compositions from discrete and continuous flows of components / Evseev A.V., Yuraskova I.A., Karpilov D. A., Cherkaev Y. A. // 2024 IEEE Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, Russia, 12–14 November 2024. С. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics64718.2024.10838679.
9. Свидетельство № 2025612636. Программа расчёта и анализа показателей качества при производстве гетерогенных смесей на основе диаграммы Парето – MixPareto v2.0 / Евсеев А.В., Карпилов Д.А., Черкаев Я.А., Юраскова И.А. Заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет. Дата рег. 03.02.2025. Бюл. № 2.
10. Свидетельство № 2025612637. Программа производственного расчёта свойств композитов с использованием диаграмм Ишикавы-Парето – MixPareto v3.0 / Евсеев А.В., Черкаев Я.А. Заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет. Дата рег. 03.02.2025. Бюл. № 2.
11. Капранова А.Б., Верлока И.И. Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами // Теоретические основы химической технологии. 2018. Т. 53, № 5. С. 1-15.
12. ГОСТ 8.579-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к количеству фасованных товаров в упаковках любого вида при их производстве, расфасовке, продаже и импорте.
13. Григорьян С.Г., Дегтярёва А.Н. Имитационное моделирование процесса комбинационного дозирования. // Новая наука: техника и технологии: материалы междунар. науч.-практ. конф., 17 апреля 2017 г. Москва, 2017. С. 42–44.
14. Жавнер В.Л., Чжао Вэнь. Мехатронная система дозирования сыпучих продуктов малыми дозами // Современное машиностроение: наука и образование ММЕСЕ-2017: материалы 6-й междунар. науч.-практ. конф., 22–23 июня 2017 г. СПб., 2017. № 6. С. 462–470. DOI: 10.1872/MMF-2017–40.
15. Peng Bo. Development and analysis of precision metrological loose packaging system. Hubei University of Technology. 2017.
16. Васильев А.Н. Программирование на С# для начинающих. Особенности языка. Москва: Эксмо, 2019. 528 с.
17. Комлев Н.Ю. Полезное программирование. Москва: Солон-Пресс, 2019. 256 с.
18. Gerard Sierksma; YoriZwols (2015). Linears and Integer Optimization: Theory and Practice. Boca Raton: CRC Press, 2015.

References

1. Evseev A.V. *Teoriya i oborudovanie determinirovannogo formirovaniya odnorodnosti geterogennykh smesei: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Theory and equipment of deterministic formation of homogeneity of heterogeneous mixtures. Doctoral dissertation]. Tula, 2021. 297 p.
2. Evseev A.V. et al. *Ustroystvo dlya polucheniya smesi iz syuchikh komponentov* [Device for producing a mixture from bulk components]. Patent RU, no. 2804823, 2023.
3. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I. Modeling the mixture quality criterion in the volume of a drum-belt device. *Khimicheskoe i nefegazovoe mashinostroenie* [Chemical and petroleum engineering machinery]. 2018;(5):3-9. (In Russ.)
4. Mokrushin V.V., Postnikov A.Yu., Potekhin A.A., Berezhko P.G., Tsareva I.A., Yunchina O.Yu. Dimensional factors in the analysis of powder mechanical mixture mixing quality. *Molodezh v nauke: sbornik докладов 16-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Youth in science. Proceedings of the 16th Scientific and Technical Conference]. 2018, pp. 98-103. (In Russ.)
5. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya syuchikh materialov* [Equipment for mixing bulk materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 216 p. (In Russ.)
6. McKelvey D.M. *Pererabotka polimerov* [Polymer processing]. Moscow: Khimiya, 1965, 442 p. (In Russ.)
7. Evseev A.V., Yuraskova I.A., Karpilov D.A., Cherkaev Y.A. Automated Production and Quality Control of Composites Produced by Automatic Non-Mixing Machines Employing Controlled Homogeneity Methods. 2024 IEEE Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, Russia, November 12-14, 2024. pp. 1-6. DOI: 10.1109/Dynamics64718.2024.10838640.
8. Evseev A.V., Yuraskova I.A., Karpilov D.A., Cherkaev Y.A. Providing production control of heterogeneous compositions from discrete and continuous flows of components. 2024 IEEE Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, Russia, November 12-14, 2024. pp. 1-4. DOI: 10.1109/Dynamics64718.2024.10838679.
9. Evseev A.V., Karpilov D.A., Cherkaev Ya.A., Yuraskova I.A. *Programma rascheta i analiza pokazatelei kachestva pri proizvodstve geterogennykh smesei na osnove diagrammy Pareto – MixPareto v2.0* [Software for calculation and analysis of quality indicators in the production of heterogeneous mixtures based on the Pareto chart – MixPareto v2.0]. Certificate, no. 2025612636, 2025.
10. Evseev A.V., Cherkaev Ya.A. *Programma proizvodstvennogo rascheta svoistv kompozitov s ispolzovaniem diagramm Ishikavy-Pareto – MixPareto v3.0* [Software for production calculation of composite properties using Ishikawa-Pareto diagrams – MixPareto v3.0]. Certificate, no. 2025612637, 2025.
11. Kapranova A.B., Verloka I.I. Stochastic description of the formation of bulk component flows in apparatuses with

- brush elements. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical engineering]. 2018;53(5):1-15. (In Russ.)
12. State Standard GOST 8.579-2019. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Trebovaniya k kolichestvu fasovannykh tovarov v upakovkakh lyubogo vida pri ikh proizvodstve, rasfasovke, prodazhe i importe [State system for ensuring the uniformity of measurements. Requirements for the quantity of packaged goods in packages of any type during their production, packaging, sale and import].
 13. Grigoryan S.G., Degtyareva A.N. Simulation modeling of the combinatorial dosing process. *Novaya nauka: tekhnika i tekhnologii: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoy konferentsii* [New Science: engineering and technologies. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2017. pp. 42-44. (In Russ.)
 14. Zhavner V.L., Zhao Wen. Mechatronic system for small-dose dispensing of bulk products. *Sovremennoe mashinostroenie: nauka i obrazovanie MMESE-2017: materialy 6-i mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern mechanical engineering: science and education MMESE-2017. Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference]. Saint-Petersburg, 2017, no. 6, pp. 462-470. (In Russ.) doi:10.1872/MMF-2017-40.
 15. Peng Bo. Development and analysis of precision metrological loose packaging system. Hubei University of Technology; 2017.
 16. Vasilev A.N. *Programmirovaniye na C# dlya nachinayushchikh. Osobennosti yazyka* [Programming in C# for beginners. Language features]. Moscow: Eksmo, 2019, 528 p. (In Russ.)
 17. Komlev N.Yu. *Poleznoye programmirovaniye* [Useful programming]. Moscow: Solon-Press, 2019, 256 p. (In Russ.)
 18. Sierksma G., Zwols Y. *Linear and Integer Optimization: Theory and Practice*. Boca Raton: CRC Press, 2015.

Поступила 22.01.2026; принята к публикации 27.03.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 22/01/2026; revised 27/03/2026; published 30/06/2026

Евсеев Алексей Владимирович – доктор технических наук, доцент,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: ews1972@mail.ru. ORCID 0000-0003-0436-869X

Яковлев Борис Сергеевич – кандидат технических наук, доцент,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: bor_yak@mail.ru. ORCID 0000-0001-6856-6818

Карпилов Дмитрий Александрович – аспирант,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: karpilovdima@yandex.ru. ORCID 0009-0008-4383-9216

Черкаев Ярослав Андреевич – аспирант,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: yaroslav.cherkaev@yandex.ru. ORCID 0009-0008-6859-5705

Петров Сергей Александрович – аспирант,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: sap71ru@mail.ru. ORCID 0009-0000-0724-2465

Маркаров Евгений Эдуардович – аспирант,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: eugene.markarov@gmail.com. ORCID 0000-0003-2397-5858

Alexey V. Evseev – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: ews1972@mail.ru. ORCID 0000-0003-0436-869X

Boris S. Yakovlev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: bor_yak@mail.ru. ORCID 0000-0001-6856-6818

Dmitry A. Karpilov – Postgraduate Student,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: karpilovdima@yandex.ru. ORCID 0009-0008-4383-9216

Yaroslav A. Cherkaev – Postgraduate Student,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: yaroslav.cherkaev@yandex.ru. ORCID 0009-0008-6859-5705

Sergey A. Petrov – Postgraduate Student,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: sap71ru@mail.ru. ORCID 0009-0000-0724-2465

Evgeny E. Markarov – Postgraduate Student,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: eugene.markarov@gmail.com. ORCID 0000-0003-2397-5858



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.512
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-181-187

ИНФОРМАЦИОННОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ДЛЯ ПРОСЛЕЖИВАНИЯ И УСТРАНЕНИЯ ПРИЧИН ДЕФЕКТОВ В ПОТОКАХ ОПЕРАЦИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АВТОКОМПОНЕНТОВ

Сафаров Д.Т., Касьянов С.В., Сафарова Л.Р.

Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,
Набережные Челны, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Несмотря на внедрение СМК, по требованиям IATF 16949 объем дефектов, выявляемых у потребителя, и объем внутреннего брака остаются значительными. Систематизация задач поставщика по управлению дефектами показала, что эта методика не охватывает полный цикл выявления и устранения причин дефектов. **Используемые методы.** Системный анализ. Процессный подход. Анализ последствий потенциальных дефектов. **Новизна.** Управление дефектами автокомпонентов рассматривается как комплекс процедур, применяемых на этапах APQP-проекта, для выявления и устранения причин значимых потенциальных дефектов, возникающих в конкретных операциях жизненного цикла автокомпонента. Для прослеживания процесса развития значимого дефекта введены понятия «плечо дефекта» и «дефектоопасная операция», позволяющие выполнить прослеживание процесса развития значимого дефекта в операциях по этапам жизненного цикла изделия. На основе понятий «плечо дефекта» и «дефектоопасная операция» разработана методика экспертного выявления и оперативного устранения причин наиболее опасных последствий дефектов, возникших у пользователя изделия, в производстве заказчика, в производстве поставщика по этапам APQP-проекта подготовки производства новых автокомпонентов. **Результат.** Прослеживание осуществляется по картам непрерывных потоков операций на этапах производства автокомпонента и его составляющих. Условия каждой операции идентифицируются по выверенной технической документации. **Практическая значимость.** Разработаны дополнительные процедуры подготовки производства и документооборот выявления и устранения причин значимых потенциальных дефектов APQP-проекта. При условии компьютерной реализации вероятность предупреждения потенциальных дефектов возрастает, сроки устранения причин выявленных дефектов значительно сокращаются, отчеты заказчику становятся более адекватными.

Ключевые слова: автокомпонент, информационное сопровождение, жизненный цикл, специальная характеристика качества, дефекты, потоки операций

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № FZSM-2025-0017 «САПР металлорежущего инструмента».

© Сафаров Д.Т., Касьянов С.В., Сафарова Л.Р., 2026

Для цитирования

Сафаров Д.Т., Касьянов С.В., Сафарова Л.Р. Информационное сопровождение для прослеживания и устранения причин дефектов в потоках операций жизненного цикла автокомпонентов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 181-187. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-181-187>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

INFORMATION SUPPORT FOR TRACKING AND ELIMINATING THE CAUSES OF DEFECTS ACROSS THE OPERATIONAL FLOWS THROUGHOUT THE AUTOMOTIVE COMPONENT LIFE CYCLE

Safarov D.T., Kasyanov S.V., Safarova L.R.

Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Despite the implementation of the IATF 16949-compliant QMS, the volume of defects detected by a customer and the volume of internal defects remain significant. The systematization of a supplier's defect management tasks has revealed that this methodology does not cover the entire cycle of identifying and resolving the causes of defects. **Methods Applied.** System analysis, process approach, and analysis of consequences of potential defects have been used within the framework of the research. **Originality.** The management of defects in automotive components is considered as a set of procedures applied at the stages of the APQP project to identify and eliminate the causes of significant potential defects that occur in specific operations of the automotive component's life cycle. To trace the development process of a significant defect, the concept of "shoulder of the defect" and "defect-prone operation" has been introduced, allowing for the tracking of the development process of a significant defect in operations across the product's life cycle. Based on the concepts of "shoulder of the defect" and "defect-prone operation," a methodology has been developed for expert identification and prompt elimination of the most dangerous consequences of defects that occur in the user's product, in the customer's production, and in the supplier's production, according to the stages of the APQP project for preparing the production of new automotive components. **Result.** Tracking is carried out using maps of continuous flow operations at the stages of production of the automotive component and its parts. The conditions of each operation are identified using verified technical documentation. **Practical Relevance.** Additional procedures have been developed for production preparation and document management to identify and eliminate the causes of significant potential defects in the APQP project. With the implementation of computer-based solutions, the probability of preventing potential defects increases, the time required to eliminate the causes of identified defects is significantly reduced, and reports to the customer become more accurate.

Keywords: automotive component, information support, life cycle, special quality characteristic, defects, workflows.

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. FZSM-2025-0017, "Computer-Aided Design of Metal-Cutting Tools".

For citation

Safarov D.T., Kasyanov S.V., Safarova L.R. Information Support for Tracking and Eliminating the Causes of Defects Across the Operational Flows Throughout the Automotive Component Life Cycle. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 181-187. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-181-187>

Постановка задачи работы

Российские поставщики автокомпонентов (АК) сертифицируют свои СМК на соответствие требованиям IATF 16949 уже свыше 15 лет. Все требуемые стандартом процедуры признаются формально выполненными. Однако практически на всех предприятиях сохраняется проблема оперативного устранения причин дефектов товарной продукции, выявляемых у заказчика и предупреждения внутреннего брака в производстве. Так, по требованиям [1, 2] поставщик АК представляет на согласование с головным заводом реестр специальных характеристик качества (СХК), которые могут приводить к дефектам со следующими последствиями:

- нарушаются законодательные требования;
- возникают отказы изделия у конечного потребителя (пользователя);

– возникают отказы в сборочном производстве заказчика.

Для каждой СХК заказчику представляется индивидуальный план управления.

Методика определения СХК [3, 4] содержит только самые общие положения экспертной оценки степени тяжести последствий потенциальных дефектов, вероятности возникновения и вероятности обнаружения. Исходные данные для анализа не включают обязательное использование требований технической документации. Набор выходных документов анализа ограничен только формами отчетов для заказчика. Предположения о причинах дефектов не являются идентификацией условий их возникновения в конкретных операциях. Отсутствуют рекомендации по определению конкретных потенциально дефектоопасных операций при использовании изделия, при его сборке и в производстве АК. Не формализованы

процедуры планирования поставщиком мероприятий для последующего управления качеством АК. Не раскрыт механизм прямой связи СХК с потенциальным дефектом и не уделено внимания дефектам, возникающим в производстве самого поставщика.

Большая часть нынешних российских поставщиков не имеют достаточно квалифицированных специалистов для качественного анализа. Поэтому заложенную в [4] версию FMEA они рассматривают только как подготовку отчетов для одобрения производства потребителем и прохождения сертификационных аудитов СМК. FMEA-команду они обычно наскоро формируют по должностям специалистов уже в ходе серийного производства АК без проверки знания ими устройств автомобиля, функций АК и технологий его жизненного цикла (ЖЦ). Это дополнительно снижает адекватность отчетов и обесценивает труд специалистов по их подготовке в ряде современных публикаций [5-9], на примерах несложных технологических процессов также авторами исследований подтверждаются недостатки стандартной методики FMEA-анализа.

Таким образом, методика FMEA при ее релаксации в стандартном применении, без обеспечения информационного сопровождения в потоках операций жизненного цикла изготовления изделий не помогает конкретизировать причины проблем поставщика и не может дать необходимой ему информации для улучшений.

Цель данной работы – обосновать комплекс информации для прослеживания факторов зарождения, развития, возникновения значимых потенциальных дефектов в операциях потоков технологий на этапах ЖЦ АК для разработки планов по их предупреждению, а также для оперативного устранения причин уже выявленных дефектов.

Теоретическое положение

В [11] дано следующее определение: дефект – это невыполнение требований, связанных с предполагаемым или установленным использованием. Значит, за любым возникшим дефектом какого-либо элемента АК стоит или невозможность выполнить какую-то функцию (отказ АК), или ухудшение качества выполнения функции, или, как минимум, снижение эффективности ее выполнения. Необходимо разобраться в причинах его возникновения и развития.

Качество выполнения автомобилем (изделием) какой-либо функции обеспечивает совокупность действовавших в этом процессе автокомпонентов (технологических модулей). Структура изделия является иерархической, то есть каждая ее сборочная единица входит в состав сборочной единицы смежного вышележащего уровня. Общая схема структуры изделия (автомобиля) содержит следующие иерархические уровни;

– функциональные системы изделия (например, трансмиссия);

– агрегаты функциональной системы (коробка раздаточная);

– узлы агрегата (вал первичный в сборе коробки раздаточной);

– детали узла (шестерня первичного вала).

Цельная деталь является материальным телом. Но как технологический модуль она также имеет функциональную иерархическую структуру [12]. В ее состав входят функциональные комплексы (опорные, несущие, рабочие). Так, рабочий комплекс шестерни – это зубчатый венец. Его конструктивными элементами являются отдельные зубья. В объеме каждого зуба выделяются функциональные составляющие – части его объема, обеспечивающие в зацеплении передачу вращения с заданными характеристиками качества.

Отказы и неисправности механических устройств возникают из-за несоответствий требованиям или повреждений хотя бы одной характеристики качества (ХК) детали, в одном ее конструктивном элементе, или из-за несоблюдения требуемых условий работы хотя бы одного сопряжения.

Представим, что при движении грузового автомобиля с полной загрузкой в одном из агрегатов трансмиссии возник дефект – крупный скол одного зуба одной шестерни. Это означает риск лавинообразного нарастания поломок остальных зубьев. Очевидное последствие – отказ данной зубчатой передачи. Но возникновение отказа передачи означает и отказ агрегата в целом – стало невозможно принять и передать движение по кинематической цепи трансмиссии. Соответственно, это и ее отказ. В конечном счете становится невозможным движение машины. Дефект только одного конструктивного элемента одной детали через распространение отказов на все более крупные модули приводит к отказу транспортного средства в целом. Дальнейшее последствие – транспортное подразделение организации-владельца машины не в состоянии продолжать выполнять задание на перевозку груза. Организация либо не выполнит в срок полученный заказ (значимость последствия для нее 8 баллов, по ГОСТ [3]), либо понесет дополнительные затраты (7 баллов). Поэтому для гарантированного устранения причин значимых последствий дефектов их зарождение и развитие надо прослеживать последовательно по всем иерархическим уровням конструкции изделия, начиная с простейших.

Каждый отдельно взятый элемент АК проходит через множество предыдущих операций собственного ЖЦ. Зарождение и возможное развитие дефекта проследим на другом примере. Опорная шейка детали типа «вал» должна работать в подвижном сопряжении. На конечной круглошлифовальной операции для нее установлено требование к точности диаметрального размера $\varnothing 60 (-0,005/-0,030)$. Предположим, что в результате обработки диаметр получил значение 60,010 мм (больше верхнего предельного значения).

Если это несоответствие на последующей контрольной операции будет обнаружено, то полуфабрикат детали получит статус «негодный» и не будет использоваться далее. Потенциальный дефект в последующих операциях предупрежден, но конвейер не получит нужное количество сборочных комплектов. Это последствие не выходит за пределы производства поставщика.

Если же при контроле несоответствие не будет обнаружено, то на сборочной операции появляется дефект «несобираемость сопряжения». Последствие – запланированная сборочная единица не войдет в состав АК. Опять-таки потребуются дополнительные затраты. Но в этом случае еще возрастает риск срыва срока сдачи партии АК заказчику, так как сборка осуществляется уже в самом конце производственного цикла.

Допустим далее, что фактический диаметр шейки после шлифования составил $\varnothing 59,998$ мм. Если это вроде бы незначительное несоответствие не обнаружить при контроле, то сборка сопряжения будет выполнена, но зазор посадки будет меньше запланированного. При эксплуатации выявляется несоответствие условий работы сопряжения (недостаточная несущая способность слоя смазки) и риск возникновения дефекта «повышенная интенсивность износа элементов сопряжения». Мгновенного отказа не произойдет, но, очевидно, приведет к сокращению срока службы узла и снижению эффективности изделия в целом (значимость 7 баллов).

Таким образом, любой вариант невыполнения требований к характеристике $\varnothing 60$ (-0,005/-0,030) становится первичным несоответствием для ряда возможных дефектов. Точно так же невыполнение требований к свойствам материала детали, а также к точности сборки узла или агрегата, к значениям момента затяжки резьбовых соединений – это первичное несоответствие будущих дефектов.

Для прослеживания процесса развития значимого дефекта введем понятие «плечо дефекта» – это непрерывный поток всех операций в жизненных циклах деталей и сборочных единиц АК, начиная с той, где допущено несоответствие хотя бы одной ХК одного структурного элемента детали, и заканчивая операцией, в которой из-за этого несоответствия и возникает дефект. По мере прохождения АК по этим операциям к первичному несоответствию могут добавляться те, которые допущены в последующих операциях. Для идентификации операций, в которые наиболее вероятно возникновение дефектов, введено понятие «дефектоопасная операция». Например, у конечного пользователя это будут те операции, в которых действуют максимальные эксплуатационные нагрузки.

На основе понятия «плечо дефекта» можно однозначно интерпретировать сущность понятия «специальная характеристика качества». Этот статус должна получить та ХК, невыполнение требований к которой является первопричиной или одной из наиболее веро-

ятных причин возникновения потенциального дефекта с наиболее значительными последствиями (10–7 баллов по шкале S [1]). Чем тяжелее могут быть последствия дефекта, тем более жестким должен быть план управления этой СХК на той операции, где она формируется. Все прочие характеристики остаются в статусе «контролируемая».

Подготовка информационно-технологического сопровождения для управления значимыми дефектами

Дефекты элементов конструкции могут возникать и у конечного пользователя, и в производстве заказчика АК (изготовителя автомобиля), и, конечно, в производстве поставщика АК. Оценка степени тяжести и последствий для всех этих случаев приведена к балльной шкале показателя S (табл. 1). Полный цикл мероприятий по устранению причин дефектов встроен в общую последовательность работ на всех этапах APQP-проекта (табл. 2). В таблице приведены также используемые документы ЕСПП и дополнения к ним. На I этапе формируются данные, необходимые для управления дефектами. В состав перечня требований заказчика предложено включать перечень всех потенциально дефектоопасных операций на этапе применения изделия у конечного пользователя и в производстве заказчика. Исходя из этого, поставщик АК на II этапе своего проекта целенаправленно определяет варианты возможных дефектов деталей и сопряжений АК у конечного пользователя и в ходе монтажа АК у заказчика.

Определение операций, в которых может быть допущено первичное несоответствие (не выполнены требования с СХК), ведется на III этапе по картам потоков обратным ходом от момента возникновения возможного конкретного дефекта. В той операции, где формируется конкретная СХК, надо определить факторы (контрольные характеристики), в наибольшей степени влияющие на ее величину, и составить план реагирования на возможные несоответствия. Для разработки адекватных планов устранения причин дефектов потребуются проверка содержания технологической документации, а также наличие данных по устройству узлов оборудования и оснастки, содержанию процедур наладки, характеристик процесса обработки.

В ходе выпуска и поставок АК на V этапе проекта заказчик может ужесточить свои требования. Могут также возникнуть не выявленные ранее лимитирующие дефекты. Подготовленное информационное сопровождение позволит в минимально короткие сроки выявить и устранить их причины.

В ходе серийного производства по данным измерений СХК обязательно формировать базы статистических данных. Это многократно повышает вероятность назначения адекватных планов управления СХК с первой попытки и сокращает трудоемкость работы команды. При таком подходе стандартизованные формы отчета для одобрения производства заказчиком формируются автоматически.

Таблица 1. Систематизация последствий потенциальных дефектов АК их составляющих
 Table 1. Systematization of the consequences of the AC potential defects and their components

Последствия		У конечного пользователя	В производстве заказчика	В производстве поставщика
Балл S	Содержание			
10	Угроза жизни и здоровью людей	Авария. Отказ системы жизнеобеспечения. Возгорание в машине	Травмы при выполнении монтажа АК	Травмы в операциях изготовления деталей и сборки АК
9	Значительный ущерб природной и производственной среде	Утечки топлива, масла при движении. Выбросы вредных веществ в атмосферу	Повреждение оборудования, производственной инфраструктуры	Повреждение оборудования, производственной инфраструктуры
8	Невозможность выполнить функцию изделия	Невыполнение задания на перевозку груза	Несобираемость АК в составе изделия: - по базовым сопряжениям - по выходным сопряжениям Несоответствие функциональных характеристик при испытании в составе изделия	Невозможность выполнить последующую операцию в производстве АК. Срыв срока поставки АК, необеспечение характеристик функции АК при испытаниях
7	Недостаточная эффективность выполнения функции	Ограниченная возможность: - наблюдения за дорогой - регулирования режимов работы АК. Повышенный расход топлива. Потеря мощности двигателя. Ограниченный объем кузова/салона	Завышенная трудоемкость монтажа АК	Повышенный расход ресурсов в операциях АК. Санкции за нарушение условий договора поставки АК

Таблица 2. Подготовка и применение информационно-технологического сопровождения для предупреждения критических дефектов АК и устранение причин их возникновения

Table 2. Preparation and application of information technology support to prevent critical defects of the AC and eliminate the causes of their occurrence

Этап APQP	Группы информации	Пользователи информации	
		Производственная система заказчика АК	Производственная система поставщика АК
1	ЕСТПП	Техническое задание на изделие	Техническое задание на подготовку производства АК
	ИТСД	Перечень дефектоопасных операций и степень тяжести последствий отказов агрегатов при эксплуатации изделия	Разработка перечней дефектоопасных операций и степень тяжести потенциальных дефектов АК заказчика по ЖЦ агрегата
2	ЕСТПП	Разработка технической документации на сборку изделия АК	Техническое задание на технологическую подготовку АК
	ИТСД	Перечень дефектоопасных операций при монтаже. Степень тяжести последствий дефектов	Перечень видов потенциальных дефектов в производстве заказчика
3	ЕСТПП	Разработка технического задания на сборку изделия	Разработка техдокументации на АК
	ИТСД	Перечень СХК в операциях монтажа АК	Дефектоопасные операции в производстве поставщика и степень тяжести последствий дефектов. Карты потоков операций сборки узлов и изготовления деталей АК. Перечень СХК. Методики измерения СХК. Перечень ключевых контрольных характеристик в операциях формирования СХК
4	ЕСТПП	Отладка техпроцессов	Отладка техпроцессов
	ИТСД	Оценка первичного отчета РРАР	Анализ приемлемости процессов измерения СХК. Оценка возможностей операций, в которых формируется СХК. Первичный отчет РРАР, реестр СХК
5	ЕСТПП	Периодическая оценка точности	Периодическая оценка точности. Устранение причин рекламационных дефектов
	ИТСД	Одобрение производства АК у поставщика	Разработка текущих планов управления СХК. Мониторинг СХК по планам управления. Пополнение баз данных значений дефектов и СХК. Текущие отчеты РРАР

Подготовка межфункциональной команды экспертов для управления дефектами

Для результативного анализа каждый из привлекаемых в команду специалистов (конструкторов, технологов, специалистов сервиса, метрологов) должен досконально знать свои технологические операции. Но для взаимопонимания в команде он должен также иметь достаточное представление о содержании операций в других маршрутах полного жизненного цикла АК. Поэтому все они обязаны предварительно изучить справочники по техобслуживанию и ремонту узлов и агрегатов, каталоги деталей изделия, функции и устройство поставляемого АК. Они должны также ознакомиться с содержанием накопленных баз данных по ранее выявленным дефектам.

Каждый цикл проведения анализа должен быть запланирован. Для анализа потенциальных дефектов и потоков операций потребуются:

- каталоги деталей и узлов автомобиля;
- руководства по эксплуатации автомобиля;
- конструкторская документация на АК;
- чертежи деталей АК;
- карты потоков операций в маршрутах изготовления элементов АК;
- имеющиеся актуальные базы данных по дефектам.

Заключение

К сожалению, требование тотальной сертификации поставщиков АК привело к формальному применению обязательных процедур, анализ их содержания показывает, что сама постановка задач анализа дефектов [3, 4] весьма поверхностна. Многие процедуры анализа проблем и решения задач управления качеством, в том числе и стандартизованные методики FMEA, ограничиваются только формированием укрупненных исходных данных. Но изготовителю АК важно представить полный цикл действий вплоть до подтверждения устранения причин выявленных проблем. Требуется постоянное ведение и анализ баз данных, которые позволят оперативно устранять вновь возникающие на данный момент проблемы. Чтобы результативно устранять причины первичных несоответствий, необходимо достоверно знать, в какой именно операции они допущены. Поэтому для прослеживания причин наиболее опасных потенциальных дефектов надо обязательно документировать содержание потоков всех операций в технологических маршрутах на этапах ЖЦ АК. Иначе говоря, конструкторская и технологическая подготовка производства. Достаточно предусматривать создание полного комплекта информации не только для обеспечения годности, но и для регулирования значений специальных характеристик качества. Это разработка карт потоков операций на этапах ЖЦ АК, формирование баз данных, предметная подготовка команды экспертов.

В данной статье управление дефектами АК рассматривается как комплекс процедур, применяемых на этапах APQP-проекта для выявления и устранения причин значимых потенциальных дефектов, возникающих в операциях жизненного цикла автокомпо-

нента. А требования подготовки отчетов для потребителей тогда решаются автоматически. Однако десятилетия формального внедрения процедур СМК серьезно затормозили решение этой проблемы, поэтому главное – скорейшая автоматизация комплекта информационного сопровождения.

Список источников

1. IATF 16949:2016. Системы менеджмента качества. Особые требования к применению стандарта ISO 9001:2015 для автомобильного производства и соответствующих сервисных организаций. М.: Стандартинформ, 2015. 23 с.
2. ГОСТ Р 51839 – 18. Системы менеджмента качества. Требования к организации автомобильной промышленности. М.: Стандартинформ, 2018. 32 с.
3. ГОСТ Р 51901.12-2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов. М.: Стандартинформ, 2008. 40 с.
4. ГОСТ Р 51814.2-01. Системы менеджмента качества. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов. М.: Стандартинформ, 2001. 23 с.
5. Подгорный А.С., Козловский В.Н., Панюков Д.И. Роль методологического инструментария FMEA в рамках реализации APQP // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2025. Т. 27, № 2(124). С. 34-42.
6. Ключевые характеристики и критические элементы продуктов в проектах машиностроительного производства / И.А. Беляева, А.С. Клентак, А.С. Подгорный, В.Н. Козловский // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26, № 6(122). С. 47-55.
7. Совершенствование процессов ремонта и обслуживания автомобиля на основе метода FMEA / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, О.В. Никишов, О.В. Пантюхин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 12. С. 493-497.
8. Улучшение методики оценки вероятности обнаружения вида отказа или его причин в рамках метода FMEA / Д.И. Панюков, М.В. Ненашев, Д.А. Деморецкий, В.Н. Козловский // СТИН. 2023. № 12. С. 65-68.
9. Организация подготовительных работ по процедуре FMEA на предприятии / Д.И. Панюков, М.В. Ненашев, Д.А. Деморецкий, В.Н. Козловский // СТИН. 2023. № 12. С. 68-70.
10. Модели оценки эффективности процедуры FMEA / Д.И. Панюков, В.Н. Козловский, Д.В. Айдаров, М.В. Шакурский // СТИН. 2022. № 8. С. 42-45.
11. ГОСТ 27.002-15. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.
12. Кондрашов А.Г., Сафаров Д.Т. Математическое моделирование геометрической точности венцов в процессах зубообработки // Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения: сборник докладов международной научно-практической конференции, посвященной 30-летию основания научного подразделения «Институт механики имени профессора Гольдфарба В.И.». Ижевск: ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2024. С. 67-76.

References

1. IATF 16949:2016. Quality management systems. Particular requirements for the application of ISO 9001:2015 for automotive production and relevant service organizations. Moscow: Standartinform, 2015, 23 p.
2. State standard GOST R 51839–2018. Quality management systems. Requirements for automotive industry organizations. Moscow: Standartinform, 2018, 32 p. (In Russ.)
3. State standard GOST R 51901.12–2007. Risk management. Failure modes and effects analysis method. Moscow: Standartinform, 2008, 40 p. (In Russ.)
4. State standard GOST R 51814.2–2001. Quality management systems. Method of analysis of potential failure modes and effects. Moscow: Standartinform, 2001, 23 p. (In Russ.)
5. Podgorniy A.S., Kozlovskiy V.N., Panyukov D.I. Role of FMEA methodological tools within the framework of APQP implementation. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2025;27(2(124)):34-42. (In Russ.)
6. Belyaeva I.A., Klentak A.S., Podgorniy A.S., Kozlovskiy V.N. Key characteristics and critical elements of products in mechanical engineering projects. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2024;26(6(122)):47-55. (In Russ.)
7. Panyukov D.I., Kozlovskiy V.N., Nikishov O.V., Pantyukhin O.V. Improvement of vehicle repair and maintenance processes based on the FMEA method. *Izvestiya Tluskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences]. 2024;(12):493-497. (In Russ.)
8. Panyukov D.I., Nenashev M.V., Demoretskiy D.A., Kozlovskiy V.N. Improvement of the methodology for assessing the probability of detecting a failure mode or its causes within the FMEA method. *STIN* [STIN]. 2023;(12):65-68. (In Russ.)
9. Panyukov D.I., Nenashev M.V., Demoretskiy D.A., Kozlovskiy V.N. Organization of preparatory work for the FMEA procedure at an enterprise. *STIN* [STIN]. 2023;(12):68-70. (In Russ.)
10. Panyukov D.I., Kozlovskiy V.N., Aydarov D.V., Shakurskiy M.V. Models for evaluating the effectiveness of the FMEA procedure. *STIN* [STIN]. 2022;(8):42-45. (In Russ.)
11. State standard GOST 27.002–2015. Reliability in engineering. Terms and definitions. Moscow: Standartinform, 2016, 23 p. (In Russ.)
12. Kondrashov A.G., Safarov D.T. Mathematical modeling of geometric accuracy of gear rims in gear machining processes. *Teoriya i praktika zubchatykh peredach i reduktorostroeniya: sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 30-letiyu osnovaniya nauchnogo podrazdeleniya "Institut mekhaniki imeni professora Goldfarba V.I."* [Theory and practice of gear transmissions and gearbox engineering. Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 30th anniversary of the Institute of Mechanics named after Professor V.I. Goldfarb]. Izhevsk: Kalashnikov ISTU, 2024, pp. 67-76. (In Russ.)

Поступила 26.06.2025; принята к публикации 26.01.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 26/06/2025; revised 26/01/2026; published 30/06/2026

Сафаров Дамир Тамасович – кандидат технических наук, доцент,
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия.
Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524

Касьянов Станислав Владимирович – кандидат технических наук, доцент,
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия.
Email: kpfu.ktomp@yandex.ru

Сафарова Лейля Ринатовна – аспирант,
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия.
Email: leila-r.85@mail.ru

Damir T. Safarov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Russia.
Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524

Stanislav V. Kasyanov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Russia.
Email: kpfu.ktomp@yandex.ru

Leyla R. Safarova – Postgraduate Student,
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Russia.
Email: leila-r.85@mail.ru

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.271+621.31
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-188-200



ИННОВАЦИОННЫЙ ВЗГЛЯД НА ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ДОНБАССА

Григорьев М.Н.¹, Щеглов Д.К.^{1,2}

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

²АО «Научно-производственное объединение «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Воссоединение Донецкой и Луганской Народных Республик, а также Запорожской и Херсонской областей с Российской Федерацией обусловило необходимость разработки новых направлений использования человеческих и природных ресурсов Донбасса в условиях, когда сложившиеся рынки сбыта стали недоступными. Традиционный способ решения проблемы, связанный с консервацией шахт, не исключает расходы по их обслуживанию и лишает значительную часть шахтеров привычной работы, что ухудшает социально-экономический и политический климат в проблемном регионе России. Требуется инновационное техническое решение отмеченных проблем. **Цель работы.** Разработка инновационного подхода к технической проблеме комплексного использования природных, трудовых и длительно не востребованных инфраструктурных ресурсов Донбасса в сфере энергетики, направленного на решение социально-экономических проблем региона путем увеличения его экспортного потенциала. **Используемые методы.** В работе использованы экспертные методы оценки, основанные на инновационно-логистическом подходе к развитию энергетических комплексов с учетом современных мировых технологических тенденций и стратегических ориентиров Российской Федерации. **Новизна.** Авторами предложен ряд комплексных организационно-технических решений, направленных на вовлечение в хозяйственный оборот невостребованных ресурсов региона с использованием технологий накопления энергии и глубокой переработки угля. **Результат.** Проработаны варианты комплексного использования энергетического потенциала Донбасса, позволяющие в ближайшей перспективе использовать природные, человеческие и длительно не востребованные инфраструктурные ресурсы территории, а также гармонизировать интересы вовлеченных в проект сторон. **Практическая значимость.** Предлагаемые организационно-технические решения могут быть оперативно реализованы с опорой на имеющуюся инфраструктуру и трудовые ресурсы.

Ключевые слова: энергетика, горная добыча, Донбасс, террикон, гравитационный накопитель энергии

© Григорьев М.Н., Щеглов Д.К., 2026

Для цитирования

Григорьев М.Н., Щеглов Д.К. Инновационный взгляд на перспективы комплексного использования энергетического потенциала Донбасса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 188-200. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-188-200>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

AN INNOVATIVE APPROACH TO THE INTEGRATED USE OF THE ENERGY POTENTIAL OF THE DONBAS

Grigoriev M.N.¹, Shcheglov D.K.^{1,2}

¹ FSBEI HE Baltic State Technical University VOENMEH named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia

² JSC Scientific and production association North-West Regional Center of the Concern VKO Almaz – Antey – Obukhov Plant, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The reunification of the Donetsk and Luhansk People's Republics, as well as the Zaporizhzhia and Kherson regions, with the Russian Federation has necessitated the development of new approaches to utilizing the human and natural resources of the Donbas under conditions where traditional markets have become inaccessible. The conventional approach to addressing this issue through the conservation and closure of mines does not eliminate maintenance costs and deprives a significant part of miners of their habitual employment, thereby aggravating the socio-economic and political climate in one of Russia's most challenging regions. Therefore, there is a need for an innovative technical solution capable of addressing these challenges. **Objectives.** The purpose of the article is to develop an innovative approach to the technical problem of the integrated use of natural, human, and long underutilized infrastructural resources of the Donbas in the energy sector, aimed at solving the region's social and economic problems by increasing its export potential. **Methods Applied.** The study employs expert assessment methods based on an innovation and logistics approach to the development of energy complexes, taking into account contemporary global technological trends and the strategic priorities of the Russian Federation. **Originality.** The authors have proposed a set of integrated organizational and technical solutions aimed at incorporating the region's underutilized resources into economic circulation through the use of energy storage technologies and advanced coal processing. **Result.** Conceptual designs of integrated schemes for utilizing the energy potential of the Donbas have been developed. These schemes make it possible, in the near future, to employ the region's natural, human, and long-inactive infrastructural resources while harmonizing the interests of all stakeholders involved in the project. **Practical Relevance.** The proposed organizational and technical solutions can be rapidly implemented using the existing industrial infrastructure and labor potential of the region.

Keywords: energy, mining, Donbas, spoil heap, gravity energy storage system

For citation

Grigoriev M.N., Shcheglov D.K. An Innovative Approach to the Integrated Use of the Energy Potential of the Donbas. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 188-200. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-188-200>

Введение

В своём обращении 30 сентября 2025 года по случаю Дня воссоединения Донецкой и Луганской Народных Республик (ДНР и ЛНР), Запорожской и Херсонской областей с Российской Федерацией Президент Российской Федерации В.В. Путин подчеркнул ключевое значение энергетического фактора в реализации масштабной программы социально-экономического развития новых регионов. Глава государства выразил уверенность в том, что Российская Федерация обеспечит все необходимые условия для раскрытия колоссального индустриального и природно-ресурсного потенциала Донбасса, придав мощный импульс его восстановлению и дальнейшей интеграции в общенациональную экономическую систему.

Исторически Донбасс выступал опорным промышленным центром юга России, формируя энергетическую и металлургическую основу страны. Здесь зародилась одна из старейших в Европе угледобывающих школ, а уникальные по качеству антрацитовые и коксующиеся угли определяли стратегическую

устойчивость отечественной промышленности. Однако в результате длительного периода экономической дезинтеграции, отсутствия инвестиций и военных действий энергетическая инфраструктура региона оказалась в критическом состоянии, что требует не только восстановления, но и глубокого технологического переосмысления её будущего.

В условиях мирового энергетического перехода и растущей конкуренции на рынке углеводородов акцент на комплексное использование энергетического потенциала Донбасса приобретает особую актуальность. Речь идёт не просто о возобновлении добычи угля, а о необходимости формирования новой энергетической парадигмы региона, основанной на синтезе традиционных и инновационных технологий.

Выступая 16 октября 2025 года на пленарном заседании VIII Международного форума «Российская энергетическая неделя – 2025», президент отметил, что, несмотря на пессимистичные прогнозы ряда экспертов, уголь продолжает занимать значительную долю в мировом энергобалансе и сохранит своё значение на десятилетия вперёд. Глава государства под-

черкнул необходимость повышения эффективности и конкурентоспособности угольной отрасли, а также призвал правительство обеспечить её поддержку в условиях ценовой волатильности. Особое внимание было уделено перспективам использования передовой «чистой» угольной генерации для обеспечения потребностей цифровой экономики, включая центры хранения и обработки данных. Президент отметил, что размещение подобных объектов в угледобывающих регионах создаёт современные рабочие места, способствует диверсификации экономики и формированию новых производственных кластеров. Кроме того, подчеркнута стратегическая роль доступной энергетической инфраструктуры в привлечении инвестиций, технологий и квалифицированных кадров [1].

Современные тенденции развития мировой энергетики демонстрируют, что экономическая эффективность энергетических технологий достигается не за счёт экстенсивного наращивания добычи сырья, а благодаря внедрению интеллектуальных систем управления потоками энергии и повышению её добавленной стоимости. В этом контексте Донбасс может стать экспериментальной площадкой для внедрения передовых энергетических технологий, интегрирующих принципы ресурсосбережения, экологической безопасности и территориального развития.

Таким образом, настоящая работа направлена на формирование системного подхода к использованию энергетического потенциала Донбасса, сочетающего экономическую эффективность, технологическую инновационность и социальную устойчивость, что соответствует стратегическим приоритетам энергетической политики Российской Федерации.

Историко-географическая справка о Донбассе

Донецкий угольный бассейн (Донбасс) был открыт в 1721 году русским горным инженером и геологом Г.Г. Капустиным в районе современного города Лисичанска. С тех пор Донбасс стал ключевым центром угледобычи, сформировав промышленное ядро юга Российской империи, а позднее – Советского Союза. В настоящее время Донбасс представляет собой крупнейшее месторождение каменного угля в Европе [2].

Регион традиционно играл системообразующую роль в обеспечении углём металлургии, энергетики и химической промышленности России. Особое значение имеют коксующиеся угли, являющиеся стратегическим сырьём для чёрной металлургии – прежде всего для доменного и мартеновского производств. Их использование в энергетике ограничено ввиду высокой стоимости и приоритетного использования в металлургическом производстве.

Наиболее ценным видом энергетического угля является антрацит. Он отличается высокой теплотворной способностью и низким содержанием летучих веществ, благодаря чему горит коротким, бездымным, синим пламенем. При этом антрацит явля-

ется редким видом угля – его доля в мировых запасах не превышает 1 %.

На протяжении более двух столетий социально-экономическое развитие Донбасса оставалось неразрывно связанным с угольной промышленностью. В настоящее время основная часть запасов сосредоточена на территориях ДНР и ЛНР. Информация о запасах угля в Донбассе до глубины 1800 м на конец 2014 года приведена в **табл. 1**.

Таблица 1. Запасы угля в Донбассе до глубины 1800 м на конец 2014 года

Table 1. Coal reserves in the Donbas reached a depth of 1800 m at the end of 2014

Вид запасов	Величина запаса, млрд т
Суммарные запасы	140,8
Отвечающих действующим требованиям по мощности пластов и зольности, из них:	108,5
– антрацит	7
– коксующийся уголь	6
Разрабатываемые запасы угля	57,5
Намеченные к освоению	18,3

Как видно из представленных в **табл. 1** данных, угольная промышленность остаётся ключевой основой экономики региона, определяющей уровень занятости, социальной стабильности и качества жизни населения. В этой связи вопросы расширения добычи угля и освоения других полезных ископаемых следует рассматривать не только с позиции текущей рентабельности, но и в контексте долгосрочных стратегических интересов Российской Федерации, направленных на обеспечение устойчивого развития и благополучия граждан страны в средне- и долгосрочной перспективе.

Исторический опыт зарубежных стран свидетельствует о стратегических рисках утраты угольной базы. Так, Великобритания в период реформ правительства М. Тэтчер фактически ликвидировала национальную угольную отрасль. В настоящее время на фоне сокращения доступных запасов природного газа и нестабильности выработки электроэнергии из возобновляемых источников Великобритания вынуждена компенсировать дефицит за счёт импорта сжиженного природного газа из США [3].

С учётом данного опыта при решении вопроса о закрытии либо модернизации угледобывающих предприятий Донбасса требуется рациональный и комплексный подход к использованию минерально-сырьевой базы региона. В результате вооружённого конфликта, начавшегося в 2014 году, из 93-х действовавших шахт прекратили работу 69. С началом СВО из-за мобилизации горняков добыча угля в ДНР и ЛНР значительно сократилась, на фронт ушел практически каждый второй шахтёр.

Если за 2021 год в ДНР подняли на-гора около 4,5 млн т угля, то по итогам 2022 года – только 3,2 млн т,

а в ЛНР 5 и 3 млн т соответственно. Для сравнения – шахтеры РФ в 2021 году добыли 438 млн т угля.

В настоящее время все функционирующие 24 шахты Донбасса нуждаются в глубокой технической модернизации и обновлении горношахтного оборудования. Восстановление законсервированных предприятий или строительство новых возможно при условии рентабельности доработки оставшихся участков шахтных полей. По экспертным оценкам, модернизация одной действующей шахты требует инвестиций в размере от 1 до 2 млрд руб., а восстановление закрытых – от 3 до 5 млрд руб. [4].

По данным Министерства топлива, энергетики и угольной промышленности ЛНР, озвученным 3 сентября 2025 года министром К. Роговенко, восстановление шахт на территориях, освобождённых от украинских вооружённых формирований, в настоящее время не планируется. Вместе с тем обеспечение гидрогеологической безопасности остаётся приоритетной задачей, что требует постоянных затрат даже при отсутствии производственной деятельности.

Несмотря на указанные трудности, запасы высококачественных углей Донбасса при уровнях добычи, сопоставимых с советским периодом, обеспечивают устойчивое развитие отрасли на срок не менее 150 лет. В регионе сохраняются квалифицированные специалисты, развитые научные и инженерные школы, а также богатый производственный опыт. Ключевая задача состоит не столько в наращивании экспорта сырья, сколько в повышении эффективности его использования на месте, включая переработку угля и утилизацию сопутствующих отходов [5].

Интересной особенностью организации угледобывающей отрасли на территории ДНР и ЛНР является различие в формах собственности предприятий. В ДНР значительная часть угледобывающих предприятий функционирует на основе частной формы собственности, тогда как в ЛНР преобладает государственное владение. Подобная структура собственности формирует благоприятные условия для привлечения в угледобывающую и энергетическую отрасли Донбасса как частного, так и государственного капитала – как отечественного, так и зарубежного происхождения. Это открывает возможности для реализации различных форм взаимодействия, включая государственно-частное партнёрство, создание совместных предприятий и развитие своеобразного экономического соревнования между производственными структурами.

В данном контексте особенно актуально звучат слова президента РФ В.В. Путина, произнесённые на заседании VIII Международного форума «Российская энергетическая неделя – 2025»: *«Настоящее партнёрство – это то, в основе которого лежит обмен знаниями, опытом, создание промышленных альянсов. Причём результатами такого партнёрства должны пользоваться все, кто участвует в этой работе»* [1].

Таким образом, развитие энергетического комплекса Донбасса на принципах партнёрства и взаимовыгодного сотрудничества отвечает современным тенденциям интеграции промышленного и инвестиционного потенциала в рамках единого экономического пространства Российской Федерации.

С точки зрения стратегического планирования экспорт коксующихся углей в ближайшей перспективе может оставаться рентабельным направлением, учитывая близость портов и развитую транспортную инфраструктуру. Однако вывоз энергетического угля за пределы страны представляется менее рациональным. Значительно более перспективным направлением является экспорт электроэнергии, произведённой на основе местных угольных ресурсов.

Современное состояние энергетики Донбасса

Современная энергетическая инфраструктура ДНР и ЛНР представлена в основном тепловыми электростанциями (ТЭС), функционирующими на местных угольных ресурсах, а также отдельными объектами возобновляемой энергетики [6].

Старобешевская тепловая электростанция.

Старобешевская ТЭС расположена в посёлке Новый Свет ДНР, в непосредственной близости от границы с Ростовской областью Российской Федерации. Станция введена в эксплуатацию в 1958 году и была построена в течение четырёх лет в советский период. Основным топливом для станции традиционно является антрацитовый штыб, а в летние месяцы, с целью снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, применяется природный газ [6].

Штыб представляет собой мелкодисперсную фракцию угля с размером частиц, как правило, менее 6 мм, образующуюся при дроблении и сортировке угольной массы. Данный материал характеризуется повышенной зольностью, неоднородностью гранулометрического состава и склонностью к самовозгоранию, что затрудняет его хранение и транспортировку. Перевозка штыба на большие расстояния экономически нецелесообразна вследствие высокой доли инертных примесей и низкой насыпной плотности, поэтому основным направлением его использования становится локальная энергетическая переработка.

В советский период исследовательские коллективы уделяли значительное внимание вопросам рационального применения штыба. Были разработаны и внедрены технологии его брикетирования, сжигания в циркулирующем кипящем слое, а также получения водоугольного топлива – устойчивой суспензии, состоящей из угольного порошка, воды и пластифицирующих добавок, обладающей высокой теплотворной способностью и удобством транспортировки [7].

В настоящее время лидерство в промышленном производстве водоугольного топлива принадлежит Китайской Народной Республике (КНР), где годовой объём выпуска достигает порядка 60 млн т [8].

В период нахождения Донбасса под управлением Украины инвестиции в модернизацию энергетической инфраструктуры региона фактически не осуществлялись. В результате на Старобешевской ТЭС из 13-ти турбинных агрегатов эксплуатируются только 10 блоков мощностью по 200 МВт, три агрегата по 100 МВт были демонтированы.

Зуевская тепловая электростанция. Зуевская ТЭС, введенная в эксплуатацию 24 марта 1982 года, является одной из наиболее современных по конструкции станций региона. Она расположена в 40 км восточнее Донецка и неоднократно подвергалась обстрелам в ходе боевых действий. На станции установлены четыре энергоблока мощностью по 300 МВт, три из которых до 2014 года прошли модернизацию.

Зуевская ТЭС является не только значимым объектом энергетики, но и своеобразным символом региона. На внешнюю поверхность одной из градирен высотой 150 м нанесено крупнейшее в мире изображение флага ДНР площадью около 2000 м². Дымовая труба станции высотой 330 м видна на расстоянии до 100 км, что придает объекту высокую визуальную узнаваемость, но одновременно создает определённые риски в условиях вооружённого конфликта.

Новоазовская ветровая электростанция. Новоазовская ветровая электростанция (ВЭС) мощностью 79,3 МВт расположена на северном побережье Азовского моря, вблизи устья реки Безымянной и одноимённого населённого пункта. Строительство станции началось в 1998 году и завершилось в 2012 году. В её состав вошёл 141 бельгийский ветроагрегат.

После 2014 года Новоазовская ВЭС оказалась в непосредственной близости от линии разграничения, в результате чего получила значительные повреждения. Введение международных санкций и прекращение поставок оборудования иностранного производства затруднили проведение восстановительных работ в полном объёме. Тем не менее на сегодняшний день станция в значительной мере восстановлена и вырабатывает до 66,1 МВт электроэнергии, что составляет около половины её проектной мощности.

Перспективы дальнейшего восстановления и модернизации Новоазовской ВЭС оцениваются как благоприятные, несмотря на сохраняющиеся внешние ограничения. Это обусловлено успешным развитием в России компании «Новавинд» – дочернего предприятия Госкорпорации «Росатом». На её производственных мощностях в городе Волгодонске (Ростовская область) выпускаются ключевые компоненты ветроэнергетических установок: генераторы, гондолы, ступицы и основания башен с уровнем локализации порядка 68%. Основной проблемой остаётся производство лопастей, ранее осуществлявшееся в Ульяновской области на заводе датской компании *Vestas*, прекратившей деятельность в России в 2022 году.

В сложившихся условиях решение проблемы импортозамещения лопастей может быть достигнуто за счёт организации их серийного производства на отече-

ственных предприятиях композитной промышленности, а также посредством кооперации с российскими научно-исследовательскими центрами и инжиниринговыми компаниями, специализирующимися на разработке полимерных и углеволоконных материалов.

Луганская тепловая электростанция. Ключевым объектом электроэнергетики ЛНР является Луганская ТЭС, расположенная в городе Счастье Луганской области. Станция была введена в эксплуатацию в 1956 году, а к моменту завершения строительства последней очереди (1989 год) её установленная мощность достигла 2300 МВт.

В 2014 году Луганская ТЭС оказалась в зоне активных боевых действий, что привело к частичной остановке и повреждениям инфраструктуры. После перехода станции под контроль ЛНР в феврале 2022 года начались восстановительные работы, позволившие возобновить ограниченную выработку электроэнергии.

Современное состояние энергетики Донбасса можно охарактеризовать как стабильно-функционирующее при высокой степени технологического и инфраструктурного износа. Регион располагает развитой сетью тепловых электростанций, сформированных в советский период, при этом их технический ресурс в большинстве случаев превышает нормативный срок эксплуатации. Наличие квалифицированных инженерно-технических кадров, накопленный опыт эксплуатации энергетического оборудования и развитая угледобывающая база создают предпосылки для поэтапной модернизации и интеграции энергосистемы ДНР и ЛНР в единую энергосистему Российской Федерации.

Ключевыми направлениями дальнейшего развития региона являются:

– модернизация действующих ТЭС с переходом на более эффективные и экологичные технологии сжигания топлива (в том числе в кипящем слое, с применением водоугольного топлива и штыбового угля);

– восстановление и частичное обновление объектов возобновляемой энергетики, включая Новоазовскую ВЭС, с применением российского оборудования;

– создание инфраструктуры распределённой генерации электроэнергии для локальных потребностей промышленности и населения;

– встраивание региональной энергосистемы в российский энергетический контур, что позволит повысить надёжность электроснабжения, сократить потери при передаче и обеспечить устойчивый сбыт электроэнергии за пределами региона.

Технологии экспортной поставки электроэнергии с учетом особенностей Донбасса

Современные технологии транспортировки электроэнергии развиваются в направлении увеличения автономности и гибкости энергетических систем. Од-

ним из наиболее инновационных, хотя пока и сравнительно экзотичных решений, является использование так называемых «энерговозов» – судов-аккумуляторов, предназначенных для перевозки и передачи электрической энергии.

В 2025 году японская компания PowerX планирует завершить строительство первого подобного «энерговоза». Он оснащён 96-ю литий-железо-фосфатными (LFP) аккумуляторами, общая ёмкость которых составляет до 240 МВт·ч. По мере совершенствования технологий LFP ожидается увеличение энергоёмкости подобных систем на 30–40% в ближайшие годы.

Параллельно в этом направлении активно работают китайские исследователи. Так, 17 сентября 2025 года в одном из старейших научных журналов мира *Nature* (издаётся с 1869 года) была опубликована статья, посвящённая разработке нового типа гидрид-ионного аккумулятора, отличающегося принципиально иными физико-химическими свойствами.

Группа учёных под руководством Чэнь Пина, Цао Хуцзюня и Чжан Вэйцзиня из Даляньского института химической физики (*Dalian Institute of Chemical Physics*, Китайская академия наук, провинция Ляонин) создала композитный материал на основе тонкого слоя гидрида бария (BaH_2), нанесённого на тригидрид церия (CeH_3), выполняющий функцию электролита. Синтезированный материал сочетает высокую гидрид-ионную проводимость с превосходной термической и электрохимической стабильностью. Экспериментальные исследования показали, что удельная ёмкость нового аккумулятора достигает 984 $mA \cdot ч/г$, а расчётная теоретическая величина составляет до 1200 $mA \cdot ч/г$, что существенно превосходит показатели традиционных литий-ионных аккумуляторов (150–300 $mA \cdot ч/г$) и даже теоретический предел графитового анода (372 $mA \cdot ч/г$).

В отличие от литий-ионных батарей, подверженных образованию дендритов – металлических структур, вызывающих короткие замыкания и деградацию элементов, использование водорода в качестве носителя заряда исключает эти риски и повышает эксплуатационную безопасность.

Таким образом, первые «энерговозы», независимо от типа применяемых накопителей энергии, демонстрируют перспективность концепции мобильного экспорта электроэнергии. Для Донбасса данное направление представляет особый интерес ввиду географической близости региона к российским морским и речным портам, что создаёт возможности для поставок электроэнергии на значительные расстояния в обход транзитных государств.

Следует отметить, что Российская Федерация обладает уникальным опытом создания и эксплуатации плавучих энергетических объектов. Так, 22 мая 2020 года в порту города Певек (Чукотский автономный округ) была введена в эксплуатацию первая в мире плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС)

проекта 20870. Данный объект представляет собой самоходное судно стоечного типа водоизмещением 21 560 т, оснащённое двойным дном и двойными бортами, с развитой надстройкой: в носовой и средней частях размещено энергетическое оборудование, а в кормовой части – жилой модуль. Основные габаритные характеристики станции: длина корпуса – 140 м, ширина – 30 м, высота борта до ватерлинии – 10 м, осадка – 5,5 м.

Энергетическая установка ПАТЭС включает два реактора типа КЛТ-40С общей электрической мощностью 70 МВт и тепловой мощностью 50 Гкал/ч. Межремонтный период их эксплуатации составляет 12 лет, а расчётный срок службы – 40 лет. Реакторы данного типа зарекомендовали себя при длительной эксплуатации на атомном лихтеровозе-контейнеровозе «Севморпуть» и ледоколах «Таймыр» и «Вайгач», продемонстрировав высокий уровень надёжности и безопасности.

Следует отметить, что стоимость строительства ПАТЭС составила около 30,3 млрд руб., при этом стоимость одного киловатта установленной мощности оценивается примерно в 7200 долл. США, что превышает аналогичный показатель для традиционной тепловой генерации примерно в семь раз. Вместе с тем в нашей стране активно ведутся научно-конструкторские и производственные работы, направленные на повышение энергоэффективности, увеличение установленной мощности и снижение удельной стоимости вырабатываемой энергии подобных объектов.

Другим высокотехнологичным направлением является подводная передача электроэнергии по силовым кабелям, технология которой уже получила промышленную реализацию. Так, к началу 2021 года Норвегия завершила строительство в Северном море подводного кабеля длиной 720 км, обеспечивающего передачу мощности 1,4 ГВт при напряжении 515 кВ. Система успешно эксплуатируется, обеспечивая экспорт электроэнергии в Великобританию. Аналогичные проекты реализованы в Греции, где кабель меньшей протяжённости функционирует более десяти лет, а также в Австралии, где ведётся проектирование линии длиной около 3000 км [9].

Следует отметить, что расстояние от Крыма до побережья Турции по морю составляет всего 267 км, что делает экономически и технически обоснованным проект прокладки подводного кабеля. При реализации проекта на паритетных началах с турецкой стороны можно обеспечить высокую степень надёжности и безопасности линии.

Сопоставительный анализ свидетельствует о том, что при перераспределении финансовых ресурсов, предусмотренных для сооружения атомной электростанции «Аккую» в Турции, на строительство современных тепловых электростанций эквивалентной установленной мощности на территории Донбасса, совокупные затраты, включая расходы на прокладку

подводного энергетического кабеля и учёт потерь при передаче электроэнергии, могли бы быть ориентировочно в два раза ниже. При этом предполагаемые сроки реализации аналогичного проекта на базе ТЭС оказались бы примерно вдвое короче, что делает данное направление экономически и организационно более целесообразным.

Помимо экономических преимуществ, данный подход обеспечил бы высокую локализацию производства: занятость российских инженеров и рабочих, поступление налогов в национальный бюджет, а также гарантированный сбыт угольной продукции Донбасса при минимальном транспортном плече.

Перспективы использования гравитационных накопителей энергии на Донбассе

В процессе развития энергетического комплекса Донбасса целесообразно рассматривать возможность внедрения гравитационных накопителей энергии (ГНЭ) – инновационного, но в то же время основанного на классических физических принципах направления. Принцип их действия заключается в преобразовании избыточной электрической энергии в потенциальную энергию массы, с последующим её возвратом в электрическую форму при спуске груза.

Неравномерность суточного потребления электроэнергии остаётся одной из ключевых проблем энергосистемы. Эффективность работы паротурбинных установок и других тепловых источников генерации во многом определяется стабильностью эксплуатационных режимов. Для сглаживания пиков нагрузки и повышения эффективности функционирования энергосистем применяются различные типы накопителей энергии, среди которых ГНЭ представляют собой перспективное направление с точки зрения экологической чистоты и долговечности.

В августе 2023 года швейцарская компания *Energy Vault* завершила на территории КНР строительство первого в мире коммерческого гравитационного накопителя энергии мощностью 25 МВт и энергоёмкостью 100 МВт·ч [10]. Конструкция представляет собой башню высотой около 75 м, внутри которой посредством электрических подъёмных механизмов перемещаются бетонные блоки. При подъёме масса накапливает потенциальную энергию, а при опускании – преобразует её в кинетическую, возвращая энергию в сеть.

Технология компании *Energy Vault* вызвала значительный интерес в КНР, где уже ведутся переговоры о строительстве ещё пяти подобных объектов. В мировом экспертном сообществе гравитационные накопители рассматриваются как неотъемлемый элемент концепции «умного города» (*Smart City*), обеспечивающий гибкость и устойчивость локальных энергосетей [11].

Следует отметить, что возведение подобных конструкций требует значительных капиталовложений и проведения сложных землеотводных и строительных работ. В этом отношении Донбасс обладает рядом

уникальных природно-технических предпосылок для создания аналогичных систем при минимальных капитальных затратах. Речь идёт о терриконах – конических отвалах пустой породы, сформированных при шахтной добыче угля, высотой до 100 м, а также о шахтных стволах глубиной до 1200 м [12].

Применение терриконов в качестве конструктивной основы для ГНЭ открывает принципиально новые технологические возможности их практической реализации. В отличие от швейцарского прототипа, основанного на подъёме и опускании бетонных блоков, в донбасском варианте в качестве движущегося груза может использоваться вагонетка с горной породой, перемещающаяся по специально оборудованным направляющим. Такое инженерное решение обеспечивает адаптацию технологии к региональным условиям, позволяет задействовать существующие техногенные формы рельефа и тем самым существенно снижает капитальные затраты на строительство накопителя.

Дополнительное преимущество заключается в том, что многие отвалы содержат вторичные полезные компоненты, извлечение которых возможно в процессе эксплуатации накопителя. В таком случае процесс накопления и высвобождения энергии можно совместить с обогащением породы – подъёмом на верхнюю площадку отработанного материала и спуском вниз породы, содержащей ценные вещества. Подобная концепция перекликается с идеями, изложенными Чебаном А.Ю. в работе [13], где подчёркивается необходимость комплексного использования техногенных образований.

Ещё более перспективным представляется использование выработанных пространств закрывающихся шахт для размещения ГНЭ. В этом случае энергия аккумулируется за счёт управляемого спуска массы породы из террикона в подземные выработки, что устраняет необходимость подъёма груза и снижает капитальные затраты [14]. Управление процессом спуска синхронно с энергетическим спросом позволит не только аккумулировать энергию, но и повысить эффективность работы подъёмных установок, задействованных при эксплуатации глубоких шахт и техногенных полостей. Аналогичные технические решения рассматриваются в работах отечественных исследователей [15, 16].

Таким образом, Донбасс обладает естественными геотехническими преимуществами для внедрения ГНЭ. Использование существующих терриконов и шахтных стволов как элементов энергетической инфраструктуры может стать экономически эффективным направлением модернизации угольного региона, способствующим переходу к инновационной, малозатратной и экологически устойчивой энергетике.

Внедрение ГНЭ в энергетический комплекс Донбасса представляется экономически и технологически оправданным направлением диверсификации энергетической инфраструктуры региона. Природно-технические особенности территории – наличие терриконов, глубоких шахтных стволов и обширных вы-

рабочих пространств – создают естественную основу для ГНЭ без необходимости масштабного строительства капитальных сооружений.

Использование таких накопителей позволит решать сразу несколько стратегических задач:

- сглаживание суточных колебаний энергопотребления и повышение устойчивости энергосистемы;
- сокращение затрат на пиковую генерацию и повышение коэффициента использования установленной мощности ТЭС;
- вовлечение техногенных объектов (терриконов, шахтных полостей) в хозяйственный оборот с одновременным снижением их экологической нагрузки;
- развитие малых систем распределённой генерации электроэнергии, интегрированных в региональные сети.

С экономической точки зрения ГНЭ обладают высокой капитальной устойчивостью: эксплуатационные расходы минимальны, срок службы конструкций может превышать 40–50 лет, а потребность в редких или токсичных материалах отсутствует. Это делает технологию особенно привлекательной для промышленно развитых угольных регионов, где имеется избыток горнотехнических сооружений и квалифицированных инженерных кадров.

Таким образом, реализация проектов по созданию ГНЭ на базе инфраструктуры Донбасса способна стать одним из направлений технологической трансформации угольного региона – от преимущественно сырьевой специализации к модели инновационного энергетического кластера, обеспечивающего устойчивое развитие, энергетическую автономность и экологическую безопасность территории.

Возможные перспективные схемы использования энергетического потенциала Донбасса

Как уже отмечалось ранее, в современных условиях трансформации энергетического баланса и переориентации экспортных потоков особое значение приобретает разработка интегрированных схем использования энергетического потенциала Донбасса, сочетающих традиционные и инновационные технологии производства, аккумулирования и транспортировки электроэнергии.

Одной из наиболее реализуемых в техническом и организационном отношении является схема, предусматривающая экспорт электроэнергии по подводному кабелю, проложенному по дну Чёрного моря из Крыма в Турцию – страну с устойчивым ростом энергопотребления. Технология прокладки и эксплуатации морских силовых кабелей высокой мощности в мировой практике хорошо отработана. Примеры действующих систем (между Норвегией и Великобританией, Грецией и островными территориями, а также проект «*Australia-Asia Power Link*») подтверждают надёжность и экономическую целесообразность подобной схемы.

Российская Федерация располагает необходимыми технологическими и организационными возможностями для реализации проектов по использованию низкосортных углей непосредственно в местах их добычи, что позволяет минимизировать транспортные издержки и экологические риски. При этом для достижения максимальной эффективности целесообразно использование современного оборудования, производимого как на отечественных, так и на дружественных зарубежных предприятиях (например, расположенных в КНР), специализирующихся в области чистых угольных и энергоэффективных технологий.

Таким образом, практическая реализация проекта сводится к обеспечению финансовой поддержки и координации многостороннего взаимодействия между Российской Федерацией, государствами – стратегическими партнёрами по энергетическому сотрудничеству и потенциальными потребителями электроэнергии. В предложенной модели Россия (и, в частности, Донбасс) выступает в качестве поставщика электроэнергии и углеродного топлива, Турция – ключевого потребителя и партнёра по распределению энергетических потоков, а дружественные промышленные государства – как технологические инвесторы и производственные кооперанты.

С учётом устойчивого интереса Турции к расширению взаимодействия с Российской Федерацией в атомной и тепловой энергетике создание энергетического коридора «Донбасс – Крым – Турция» может рассматриваться как часть интегрированного пакета проектов, реализуемого на межгосударственном уровне и направленного на укрепление энергетической безопасности региона.

Финансовое участие России в данной схеме может быть ограничено затратами на модернизацию и восстановление угольных шахт и тепловых мощностей Донбасса, что соответствует стратегическим задачам социально-экономического развития региона.

Неотъемлемой составляющей рассматриваемой схемы является внедрение ГНЭ, способных повысить устойчивость и управляемость энергосистемы Донбасса. Использование ГНЭ позволит сглаживать пиковые нагрузки, обеспечивая оптимальные режимы работы ТЭС и возобновляемых источников. Финансирование НИОКР и пилотных проектов по созданию таких накопителей целесообразно осуществлять за счёт государственных программ экологической реабилитации региона, поскольку терриконы и подземные техногенные полости, образовавшиеся в результате многолетней угледобычи, представляют собой существенные источники экологического риска и одновременно потенциальную основу для инновационных инженерных решений.

Перспективным направлением, требующим дальнейшей научно-исследовательской проработки, является концепция судов-«энерговозов» – автономных плавучих хранилищ электроэнергии, способных доставлять энергию потребителям без участия транзитных государств. Технологически данное направление

сопрягается с развитием аккумуляторных систем большой ёмкости и ГНЭ. В теоретическом и концептуальном плане быстрая зарядка «энерговозов» от наземных гравитационных систем представляется перспективным решением, однако в кратко- и среднесрочной перспективе (3–5 лет) широкое промышленное внедрение подобных схем остаётся ограниченным по техническим и экономическим причинам.

Следует отметить, что, по данным Министерства иностранных дел Турции [17], за последние два десятилетия в стране наблюдается наиболее высокий темп роста потребления энергии среди государств-членов Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР). За тот же период Турция заняла второе место в мире после КНР по динамике увеличения спроса на электроэнергию и природный газ.

Значимым шагом в направлении интеграции национальной энергетической системы с общеевропейским рынком стало подписание 15 апреля 2015 года долгосрочного соглашения между Турецкой компанией по передаче электроэнергии (TEİAŞ) и Европейской сетью операторов систем передачи электроэнергии (ENTSO-E). Данное соглашение обеспечило физическую и рыночную интеграцию энергосистемы Турции с континентальной электроэнергетической системой Европы, что позволило создать устойчивую основу для участия Турции в общеевропейском энергетическом пространстве.

Не менее важным представляется заявление министра энергетики Азербайджана Пярвиза Шахбазова от 24 октября 2025 года [18], в котором был анонсирован запуск среднесрочной программы по формированию интегрированной инфраструктуры для транспортировки возобновляемой энергии из Центральной Азии и Азербайджана в направлении Турции и Европы. Проект предусматривает прокладку подводных энергетических кабелей по дну Каспийского моря с поэтапным началом реализации в 2032 году. Следует отметить, что еще в 2022 году Азербайджан, Грузия, Румыния и Венгрия подписали соглашение о стратегическом партнёрстве по строительству подводного электрического кабеля *Black Sea Energy*, к которому в 2023 году присоединилась Болгария.

Авторам представляется целесообразным рассмотреть формирование широкого консорциума для поставки электроэнергии в страны бассейна Средиземного моря, опирающегося на возможности Донбасса, ПАТЭС, судов-электровозов, ГНЭ, подводных и наземных линий электропередач.

Таким образом, комплексное развитие энергетического потенциала Донбасса на основе сочетания кабельной, аккумуляторной и гравитационной энергетики при международном партнёрстве может стать реалистичной стратегией интеграции региона в современную энергетику Евразии и Северной Африки, обеспечивая его технологическое обновление, экспортную привлекательность и экологическую устойчивость.

Обобщение результатов анализа и предложения

В целях систематизации и оценки факторов, влияющих на реализацию стратегии комплексного использования энергетического потенциала Донбасса, проведён SWOT-анализ, позволяющий выявить сильные и слабые стороны региона, а также определить внешние возможности и угрозы, формирующие стратегическую среду его развития. Такой подход обеспечивает комплексное понимание текущего состояния энергетического сектора, его потенциала и рисков, а также служит основой для выработки практических предложений по эффективному использованию природных, инфраструктурных и человеческих ресурсов.

Результаты анализа представлены в табл. 2, отражающей ключевые направления стратегического развития энергетики Донбасса.

Таблица 2. SWOT-анализ перспектив комплексного использования энергетического потенциала Донбасса

Table 2. SWOT-analysis of the prospects for the integrated utilization of the Donbas energy potential

Сильные стороны	Слабые стороны
<ul style="list-style-type: none"> - Крупные запасы угля и развитая минерально-сырьевая база - Сформированные трудовые и инженерные кадры - Наличие энергетической инфраструктуры (ТЭС, шахты, линии электропередач) - Интеграция с энергосистемой России - Близость к морским портам и экспортным маршрутам 	<ul style="list-style-type: none"> - Изношенность производственных фондов - Ограниченный доступ к инвестициям и зарубежным технологиям - Экологическая деградация территории (терриконы, затопленные шахты) - Логистические сложности и высокая себестоимость угля - Зависимость от внешнего спроса и экспортных каналов
Возможности	Угрозы
<ul style="list-style-type: none"> - Создание интегрированной энергетической модели нового типа - Экспорт электроэнергии вместо угля (в том числе по подводному кабелю в Турцию) - Использование гравитационных накопителей энергии на базе терриконов и шахт - Партнёрство с КНР в области технологий и инвестиций - Возможность решения экологических проблем через энергетические проекты - Социально-экономическая стабилизация региона 	<ul style="list-style-type: none"> - Военные и инфраструктурные риски - Мировая тенденция к отказу от угля - Технологическое отставание при недостатке инвестиций - Финансовые риски капиталоемких проектов - Потенциальные экологические и техногенные аварии

Для повышения эффективности использования энергетического потенциала Донбасса необходимо:

- использовать сильные стороны – имеющуюся минерально-сырьевую и кадровую базу региона;

– минимизировать слабые стороны через модернизацию и государственную поддержку;

– реализовать возможности экспорта электроэнергии и внедрения инновационных энергетических технологий;

– предотвратить угрозы путём технологического обновления, экологического контроля и привлечения партнёров из дружественных стран.

Комплексное использование энергетического потенциала Донбасса обладает высокой стратегической значимостью и потенциалом технологического прорыва при условии государственной поддержки, международного партнёрства и внедрения инновационных решений – прежде всего ГНЭ и экспортных схем передачи электроэнергии.

Ключевым направлением развития следует считать интеграцию угледобычи, генерации и аккумуляции энергии в единую систему, обеспечивающую ресурсную эффективность, экологическую устойчивость и социальную стабильность региона.

На основе результатов проведённого анализа и выявленных стратегических направлений развития энергетического комплекса Донбасса авторами предложен вариант дорожной карты мероприятий, направленных на практическую реализацию предложенных организационно-технических решений. Представленные в таблице мероприятия сгруппированы с учётом приоритетности, ресурсной обеспеченности и ожидаемого социально-экономического эффекта.

Перечень основных мероприятий приведён в табл. 3.

Таблица 3. Вариант дорожной карты мероприятий по комплексному использованию энергетического потенциала Донбасса

Table 3. Proposed roadmap for the integrated utilization of the Donbas energy potential

№ п/п	Наименование мероприятия	Ожидаемый результат реализации
1	Комплексная оценка энергетических и минеральных ресурсов Донбасса с учетом текущего состояния шахт и инфраструктуры	Формирование актуальной ресурсно-энергетической базы региона; определение приоритетных направлений инвестиций
2	Разработка и реализация программы модернизации действующих угольных шахт и восстановления рентабельных закрытых	Повышение производительности, снижение себестоимости добычи, сохранение рабочих мест, рост налоговых поступлений
3	Создание технопарков и инженерных центров для внедрения инноваций в угольной и энергетической промышленности Донбасса	Ускорение технологического обновления, формирование научно-инженерного ядра региона
4	Разработка и внедрение проектов по глубокой переработке угля и производству ВОТ	Повышение добавленной стоимости угледобычи, снижение экологической нагрузки, диверсификация энергетики
5	Создание и апробация гравитационных накопителей энергии на основе терриконов и шахтных стволов	Повышение устойчивости энергосистемы, снижение себестоимости электроэнергии, рациональное использование техногенных объектов
6	Организация пилотного проекта по строительству энергетического кабеля Крым – Турция для экспорта электроэнергии	Увеличение экспортного потенциала региона, укрепление энергетического сотрудничества с зарубежными партнерами
7	Разработка НИОКР по применению судов-«энерговозов» для транспортировки электроэнергии	Формирование научно-технического задела для перспективного экспортного направления с использованием передовых технологий хранения энергии
8	Программа утилизации и рекультивации терриконов с извлечением полезных компонентов	Улучшение экологической ситуации, вовлечение вторичных ресурсов в хозяйственный оборот
9	Создание региональной системы гравитационных и аккумуляторных хранилищ энергии для сглаживания пиков потребления	Оптимизация энергетических нагрузок, повышение энергоэффективности генерации и сетевой устойчивости
10	Привлечение частных инвестиций на основе механизмов «краудмайнинга» и «краудфандинга» в проекты энергетической модернизации	Расширение финансовой базы развития, вовлечение населения и бизнеса в процессы восстановления Донбасса
11	Организация экспорта электроэнергии вместо сырьевого угля с опорой на модернизированные ТЭС	Рост валютных поступлений, повышение эффективности использования угольных ресурсов
12	Реализация программ профессиональной переподготовки кадров в области энергетики, экологии и цифровых технологий	Подготовка квалифицированных специалистов, снижение уровня безработицы, социальная стабилизация региона
13	Интеграция проектов развития Донбасса в федеральные и международные энергетические инициативы России	Укрепление позиций России на глобальном энергетическом рынке, повышение инвестиционной привлекательности региона
13	Создание системы мониторинга и аналитики эффективности энергетических проектов Донбасса	Повышение управляемости проектов, контроль экономических и экологических показателей, обеспечение прозрачности инвестиций

Реализация представленной дорожной карты позволит не только обеспечить эффективное и экологически сбалансированное использование энергетического потенциала Донбасса, но и сформировать основу для долгосрочного социально-экономического развития региона и его интеграции в единую энергетическую систему Российской Федерации.

Заключение

Резюмируя изложенное, следует подчеркнуть, что развитие угледобычи на Донбассе представляет собой не только экономическую, но и стратегическую задачу государственного уровня, поскольку от стабильности угольной отрасли напрямую зависит занятость населения, уровень социального благополучия и энергетическая безопасность юга Российской Федерации.

Создание условий для устойчивой и высокоэффективной добычи угля, наряду с обеспечением достойного уровня оплаты труда работников отрасли, требует формирования замкнутого производственно-энергетического цикла, при котором уголь используется преимущественно в качестве топлива для локальной генерации электроэнергии, а не сырья для экспорта. Такой подход отвечает принципам ресурсосбережения и энергетического суверенитета.

Проведённый анализ показывает, что прямая экспортная продажа энергетических углей не является экономически оптимальной. Существенно более эффективным направлением является экспорт электроэнергии, произведённой с применением современных технологий генерации и аккумулирования энергии.

Использование ГНЭ позволяет снизить себестоимость вырабатываемой электроэнергии не менее чем на 20% за счёт выравнивания суточных нагрузок и повышения коэффициента использования установленной мощности ТЭС. При этом применение терриконов и шахтных стволов в качестве конструктивных элементов накопителей электроэнергии обеспечивает значительное снижение капитальных затрат и позволяет эффективно использовать существующую горнотехническую инфраструктуру.

Особую перспективу имеет комплексное совмещение процессов энергетического аккумулирования с переработкой пород терриконов, что не только создаёт дополнительные источники прибыли, но и способствует решению острых экологических проблем региона, связанных с загрязнением почв, водных ресурсов и атмосферного воздуха.

Таким образом, реализация представленных в работе направлений – развитие угледобычи на инновационной основе, организация экспорта электроэнергии с применением передовых технологий передачи и хранения энергии, а также использование ГНЭ в сочетании с рекультивацией техногенных территорий – позволит превратить Донбасс в образцовый энергоиндустриальный кластер нового поколения, интегрированный в энергетическую систему Российской Федерации и евразийского пространства.

Данную статью авторы рассматривают как приглашение к научному и профессиональному диалогу, адресованное отечественным и зарубежным специалистам в области энергетики, экономики и промышленной экологии. Целью предлагаемой дискуссии является выработка концептуальных и практических подходов к комплексному использованию энергетического потенциала Донбасса, в том числе посредством внедрения современных форм коллективного участия – таких как механизмы «краудмайнинга» и «краудфандинга». Первые шаги в этом направлении сделали весной 2025 года ученые БГТУ «ВОЕНМЕХ» им Д.Ф. Устинова [19].

Мы обращаемся с этим предложением со страниц журнала «Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова», авторский коллектив, редакция и читатели которого традиционно отличаются высокой научной культурой, креативностью, профессиональной компетентностью и активной гражданской позицией.

Список источников

1. Пленарное заседание Международного форума «Российская энергетическая неделя». Сайт Администрации Президента России. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/speeches/78233> (режим доступа: 20.10.2025).
2. Жданова В.А. Донбасс: оценка угольного наследия и перспективы инновационного развития отрасли // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 10-й Международной научно-практической конференции. Донецк, 2024. С. 91-95.
3. Танатаров В.Ф. Состояние энергетики в странах Западной Европы // Российская наука в современном мире: сборник статей IV международной научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 88-90.
4. Попов С.М., Попова Э.А., Тумоян И.Г. Экономическая оценка минерально-сырьевой базы Донбасса: состояние и перспективы // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2022. №5. С. 94-100. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-5-94-100>.
5. Тараш Л.И., Голоднюк Р.А. О структурных изменениях в промышленности Донецкой Народной Республики // Механизм реализации стратегии социально-экономического развития государства: сборник материалов XVI Международной научно-практической конференции. Махачкала, 2024. С. 422-425.
6. Пеньков О.В., Полковниченко Д.В., Ткаченко С.Н. Исторические этапы развития энергетики Донбасса // Наше недавнее прошлое: современные направления советской истории и историческая память. Ставрополь, 2023. С. 187-195.
7. Зеленцова С.И. Обзор котлоагрегатов с циркулирующим кипящим слоем // Энергия Арктики – 2023: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. Архангельск, 2024. С. 105-108.
8. Баранова М.П. Современные технологии энергетики // Научно-практические аспекты развития АПК: материалы Всероссийской (Национальной) научной конференции. Красноярск, 2024. С. 124-128.

9. Development of a virtual environment for monitoring underwater electrical cables by an autonomous underwater vehicle based on fuzzy cellular automata / Tymochko O., Sotnikov O., Zazirnyi A., Kolodiaznyi O., Dudchenko S., Makarchuk D. // *Problems of the Regional Energetics*. 2024. № 3 (63). С. 130-145.
10. Успенский М.И. Гравитационное хранилище электроэнергии // *Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера – 2024: сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием)*. В 2-х ч. Воронеж, 2024. С. 199-205.
11. Григорьев М.Н. Концепция «умный город» и ее производные как основа развития государства в условиях роста неопределённости внешней среды // *Современные парадигмы устойчивого развития региональных социально-экономических систем в условиях роста неопределенности внешней среды: материалы Международной научно-практической конференции*. Гатчина, 2023. С. 43-48.
12. Юшкова А.Е. Типология терриконов Донецка // *Проблемы развития социально-экономических систем: материалы VIII Международной научной конференции молодых учёных и студентов*. Донецк, 2024. С. 186-188.
13. Чебан А.Ю. Ресурсосберегающая технология формирования отвалов с использованием модернизированного отвалообразователя // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2024. Т. 22. №2. С. 14-21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-14-21>.
14. Самойлик В.Г., Онищенко А.С. Разработка технических решений по переработке терриконов // *Проблемы горного дела: сборник научных трудов IV форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков*. Донецк, 2024. С. 210-213.
15. Повышение эффективности работы подъемных машин, эксплуатируемых на больших глубинах проходки стволов и при добыче полезных ископаемых / Курочкин А.И., Габбасов Б.М., Подболотов С.В., Усов И.Г., Пикалов В.А., Гавришев С.Е. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2024. Т. 22. №2. С. 33-40. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-33-40>.
16. Славиковская Ю.О. Экономическая оценка эффективности освоения месторождения с учетом использования техногенных пустот недр // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2024. Т. 22. №3. С. 13-21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-13-21>.
17. Международная энергетическая стратегия Турции. Сайт Министерства иностранных дел Турецкой Республики. URL: <https://www.mfa.gov.tr/turkiyes-energy-strategy.ru.mfa> (режим доступа: 20.10.2025).
18. Зелёный мост – Транскаспийский коридор готовится к запуску. Сайт E²nergy. URL: <https://eenergy.media/news/32322> (режим доступа: 20.10.2025).
19. Григорьев М.Н., Ващенко А.Н., Пикалов Г.Е. Комплексный подход к восстановлению и развитию энергетики Донбасса // *Актуальные вопросы современной экономики: материалы VI Международной научно-практической конференции*. Санкт-Петербург, 2025. С. 41-43.

References

1. Plenary session of the International Forum “Russian Energy Week”. *Sayt Administratsii Prezidenta Rossii* [Website of the Presidential Administration of Russia]. Available at: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/speeches/78233> (Accessed on October 20, 2025) (In Russ.)
2. Zhdanova V.A. Donbas: Assessment of the coal heritage and prospects for innovative development of the industry. *Innovatsionnye perspektivy Donbassa. Materialy 10-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Donetsk* [Innovative Prospects of Donbas. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference. Donetsk]. 2024:91-95. (In Russ.)
3. Tanatarov V.F. The state of the energy sector in Western European countries. *Rossiyskaya nauka v sovremennom mire. Sbornik statey IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moskva* [Russian Science in the Modern World. Collection of Articles of the 4th International Scientific and Practical Conference. Moscow]. 2023:88-90. (In Russ.)
4. Popov S.M., Popova E.A., Tumoyan I.G. Economic estimation of the mineral resource base of Donbass: state and prospects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* [Proceedings of higher educational institutions. Geology and Exploration]. 2022;(5):94-100. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-5-94-100>. (In Russ.)
5. Tarash L.I., Golodnyuk R.A. On structural changes in the industry of the Donetsk People’s Republic. *Mekhanizm realizatsii strategii sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya gosudarstva. Sbornik materialov XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Makhachkala* [Mechanism for Implementing the Strategy of Socio-Economic Development of the State. Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference. Makhachkala]. 2024:422-425. (In Russ.)
6. Penkov O.V., Polkovnichenko D.V., Tkachenko S.N. Historical stages of the development of the Donbas energy sector. *Nashe nedavnee proshloe: sovremennye napravleniya sovetskoy istorii i istoricheskaya pamyat* [Our Recent Past: Modern Directions in Soviet History and Historical Memory]. 2023:187-195. (In Russ.)
7. Zelentsova S.I. Overview of boilers with circulating fluidized bed. *Energiya Arktiki-2023. Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. Arhangel'sk* [Energy of the Arctic-2023. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Arkhangelsk]. 2024:105-108. (In Russ.)
8. Baranova M.P. Modern energy technologies. *Nauchno-prakticheskie aspekty razvitiya APK. Materialy Vserossiyskoy (Natsionalnoy) nauchnoy konferentsii. Krasnoyarsk* [Scientific and Practical Aspects of Agro-Industrial Complex Development. Proceedings of the All-Russian (National) Scientific Conference. Krasnoyarsk]. 2024:124-128. (In Russ.)
9. Tymochko O., Sotnikov O., Zazirnyi A., Kolodiaznyi O., Dudchenko S., Makarchuk D. Development of a virtual environment for monitoring underwater electrical cables by an autonomous underwater vehicle based on fuzzy cel-

- lular automata. Problems of the Regional Energetics. 2024;(3(63)):130-145.
10. Uspensky M.I. Gravitational energy storage. Aktualnye problemy, napravleniya i mekhanizmy razvitiya proizvoditelnykh sil Severa-2024. Sbornik statey IX Vserossiiskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem). V 2-h chastyakh. Voronezh [Current Problems, Directions, and Mechanisms for the Development of the Productive Forces of the North-2024. Proceedings of the 9th All-Russian Scientific and Practical Conference (with International Participation). In Two Parts. Voronezh]. 2024:199-205. (In Russ.)
 11. Grigoriev M.N. The «Smart City» concept and its derivatives as a basis for state development under increasing environmental uncertainty. *Sovremennye paradigmy ustoychivogo razvitiya regionalnykh sotsialno-ekonomicheskikh sistem v usloviyah rosta neopredelennosti vneshney sredy. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern Paradigms of Sustainable Development of Regional Socio-Economic Systems Under Growing Environmental Uncertainty. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. 2023:43-48. (In Russ.)
 12. Yushkova A.E. Typology of Donetsk waste heaps. Problemy razvitiya sotsialno-ekonomicheskikh sistem. Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchonykh i studentov. Donetsk [Problems of the Development of Socio-Economic Systems. Proceedings of the 8th International Scientific Conference of Young Scientists and Students. Donetsk]. 2024:186-188. (In Russ.)
 13. Cheban A.Yu. Resource-saving technology for the formation of dumps using a modernized dump former. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;(22(2)):14-21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-14-21>. (In Russ.)
 14. Samoylik V.G., Onishchenko A.S. Development of technical solutions for waste heap processing. *Problemy gor-nogo dela. Sbornik nauchnykh trudov IV foruma studentov, aspirantov i molodykh uchenykh-gornyakov. Donetsk* [Problems of Mining. Collection of Scientific Papers of the 4th Forum of Students, Postgraduates, and Young Mining Scientists. Donetsk]. 2024:210-213. (In Russ.)
 15. Kurochkin A.I., Gabbasov B.M., Podbolotov S.V., Usov I.G., Pikalov V.A., Gavrishev S.E. Improving the efficiency of hoisting machines operated at great shaft-drilling depths and in mineral extraction. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;(22(2)):33-40. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-33-40>. (In Russ.)
 16. Slavikovskaya Yu.O. Economic assessment of the efficiency of field development considering the use of technogenic subsurface cavities. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;(22(3)):13-21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-13-21>. (In Russ.)
 17. International Energy Strategy of Turkey. *Sayt Ministerstva inostrannykh del Turetskoy respubliki* [Website of the Ministry of Foreign Affairs of the Republic of Turkey]. Available at: <https://www.mfa.gov.tr/turkiyes-energy-strategy.ru.mfa> (Accessed on October 20, 2025) (In Russ.)
 18. Green bridge – The Trans-Caspian corridor is preparing for launch. *Sayt E²energy* [E²energy website]. Available at: <https://eenergy.media/news/32322> (Accessed on October 20, 2025) (In Russ.)
 19. Grigoriev M.N., Vashchenko A.N., Pikalov G.E. An integrated approach to the restoration and development of Donbass energy sector. *Aktualnye voprosy sovremennoy ekonomiki. Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sankt-Peterburg* [Topical Issues of the Modern Economy. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference. St. Petersburg]. 2025:41-43 (In Russ.)

Поступила 07.11.2025; принята к публикации 02.12.2025; опубликована 30.06.2026
Submitted 07/11/2025; revised 02/12/2025; published 30/06/2026

Григорьев Михаил Николаевич – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры экономики, организации и управления промышленным производством, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия.
Email: grigorievmn@ya.ru. ORCID 0000-0002-9286-9875

Щеглов Дмитрий Константинович – кандидат технических наук, доцент, научный руководитель, АО «Научно-производственное объединение «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз – Антей» – Обуховский завод»; Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия.
Email: _dk@bk.ru. ORCID 0000-0003-2459-7684

Michael N. Grigoriev – PhD (Eng.), Professor, Professor of the Department of Economics, Organization and Industrial Production Management, Baltic State Technical University VOENMEH named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russia.
Email: grigorievmn@ya.ru. ORCID 0000-0002-9286-9875

Dmitry K. Shcheglov – PhD (Eng.), Associate Professor, Scientific Supervisor, JSC Scientific and production association North-West Regional Center of the Concern VKO Almaz – Antey – Obukhov Plant; Baltic State Technical University VOENMEH named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russia.
Email: _dk@bk.ru. ORCID 0000-0003-2459-7684