

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2025. Т.23, №3

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. Колокольников (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», 2025

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 30.09.2025. Заказ 295. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2025. Vol.23, no.3

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, 2025

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: 30.09.2025. Order 295. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ	5
<i>Колодежская Е.В., Горлова О.Е., Шадрунова И.В., Гаркави М.С., Хардин И.С., Шавакужева О.П.</i> Перспективы переработки бурожелезняковых руд Южного Урала	5
<i>Кисляков В.Е., Шварцкопф А.В., Федотов А.С.</i> Обзор подходов в решении проблем вскрытия, порядка отработки и отвалообразования мульдобразных залежей угля	17
<i>Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Вильмис А.Л., Салахова К.Н., Орехов Д.Д.</i> Влияние фактора времени на срок безаварийной службы технологических скважин подземного выщелачивания урана	26
<i>Журавлев А.Г., Коньков И.Е., Чендырев М.А., Глебов И.А.</i> Вариант стратегии освоения месторождения с применением подъемника для крутопадающего месторождения	34
<i>Тальгамер Б.Л., Дорош Е.А., Мешков И.А., Рославцева Ю.Г.</i> Сокращение землеёмкости горных работ при разработке неглубоких россыпей	43
<i>Ситдикова С.В., Великанов В.С., Строганов Ю.Н., Чернухин С.А.</i> Экспериментальные исследования и анализ процесса нагружения элементов рабочего оборудования карьерных экскаваторов	52
ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ	59
<i>Валева А.Р., Хазиахмедова Р.М., Валиуллина А.И., Забелкин С.А., Грачев А.Н., Киселев Д.Ю.</i> Исследование продуктов пиролиза бурового шлама	59
ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	69
<i>Грачев А.Н., Леушин И.О., Манцеров С.А.</i> О разработке и практической реализации научного подхода к применению промышленных отходов в литейных технологиях	69
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	79
<i>Федулов А.А., Каменечки В., Булганина М.Ю.</i> Моделирование процесса длиннооправочного волочения капиллярных труб с целью оценки натяга перед извлечением оправки	79
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ..	87
<i>Зайдес С.А., Буй М.З.</i> Выбор и обоснование величины угла клинового участка плоских плит при поверхностном пластическом деформировании	87
<i>Шлярова Ю.А., Шляров В.В., Серебрякова А.А., Загуляев Д.В.</i> Распределение фаз и структурные изменения высококремнистого силумина после электровзрывного легирования и обработки электронным пучком.....	97

CONTENTS

SUBSOIL USE	5
<i>Kolodezhnaya E.V., Gorlova O.E., Shadrunkova I.V., Garkavi M.S., Khardin I.S., Shavakuleva O.P.</i> Prospects for Processing the Low-Grade Brown Iron Ores of the Southern Urals	5
<i>Kislyakov V.E., Shwartskopf A.V., Fedotov A.S.</i> Review of Approaches to Solving Problems of Opening, Mining Procedure and Dumping of Synclinal Coal Deposits	17
<i>Ivanov A.G., Arsentiev Yu.A., Vilms A.L., Salakhova K.N., Orekhov D.D.</i> Influence of Time Factor on Failure-Free Service Life of Technological Wells of In-Situ Uranium Leaching	26
<i>Zhuravlev A.G., Konkov I.E., Tchendyrev M.A., Glebov I.A.</i> Version of the Deposit Development Strategy Using a Lift for a Steeply Deeping Deposit	34
<i>Talgamer B.L., Dorosh E.A., Meshkov I.A., Roslavtseva Yu.G.</i> Reducing the Land Intensity of Mining Operations During the Development of Shallow Placers	43
<i>Sitdikova S.V., Velikanov V.S., Stroganov Y.N., Chernukhin S.A.</i> Experimental Studies and Analysis of the Loading Process of Working Equipment Elements of Quarry Crawler Excavators	52
RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE	59
<i>Valeeva A.R., Khaziakhmedova R.M., Valiullina A.I., Zabelkin S.A., Grachev A.N., Kiselev D.Y.</i> Study of Pyrolysis Products of Boring Sludge.....	59
FOUNDRY ENGINEERING.....	69
<i>Grachev A.N., Leushin I.O., Mantserov S.A.</i> On the Development and Practical Implementation of a Scientific Approach to the Use of Industrial Waste in Foundry Technologies	69
METAL FORMING	79
<i>Fedulov A.A., Kamenechki V., Bulganina M.Yu.</i> Modeling the Process of Long Mandrel Drawing for Capillary Tubes to Assess the Stress-Strain State before the Mandrel Extraction	79
MATERIAL PROCESS ENGINEERING.....	87
<i>Zaides S.A., Bui M.D.</i> Selection and Justification of the Angle Value of the Wedge Section of Flat Plates Under Surface Plastic Deformation	87
<i>Shliarova Yu.A., Shliarov V.V., Serebryakova A.A., Zaguliaev D.V.</i> Phase Distribution and Structural Changes of High-Silicon Silumin after Electro-Explosive Alloying and Electron Beam Treatment	97

Михно А.Р., Крюков Р.Е., Панченко И.А., Коновалов С.В., Перов С.С.	
Исследование механических свойств сплава системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni, полученного методом проволоочно- дуговой наплавки	106
Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Башков А.А., Рябов Д.А., Акулова А.А.	
Структурные изменения в углеродистых сталях при контактном взаимодействии с твердым сплавом в условиях наростообразования при резании	114
Кузнецов С.В., Rogovik А.А., Кузнецова Е.С.	
Детекция деталей, получаемых методами токарной обработки, с использованием модели для распознавания объектов YOLOv5.....	122
Атамашкин А.С., Приймак Е.Ю., Исаева А.В., Тулибаев Е.С., Сёмка Я.С.	
Усталостная прочность сварных соединений высокопрочных буровых труб	129
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	141
Мартынец Е.Р.	
Методика совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников	141
НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ	151
Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Шувалова М.М., Репина А.А., Лизогуб В.А., Шибеева А.С.	
Технология синтеза биоразлагаемых полимерных материалов на основе желатина.....	151
Злобин Е.П., Белякин А.В., Хаймович А.И., Котов К.А., Кретов К.С., Платонов М.С.	
Изготовление отводов для атомной промышленности методом прямого лазерного выращивания из металлопорошковой композиции 08X18Ni10T....	159
НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ..	169
Герасименко П.А., Андреева Н.П., Герасименко Т.Е., Рево А.А.	
Разработка технологии и оборудования для усиления фундамента шаровой мельницы	169
ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ.....	178
Лимарев А.С., Сомова Ю.В., Волкова Е.А.	
Исследование уровня воздействия на окружающую среду и возможности улучшения экологической ситуации в городе Магнитогорске на основе развития электротранспорта.....	178
ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ	187
Ершов А.Н.	
Актуальные проблемы развития предиктивной аналитики в промышленности	187

Mikhno A.R., Kryukov R.E., Panchenko I.A., Konovalov S.V., Perov S.S.	
Research of the Mechanical Properties of the Alloy of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni System Produced by the Method of Wire-Arc Surfacing	106
Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Bashkov A.A., Ryabov D.A., Akulova A.A.	
Structural Changes in Carbon Steels During Contact Interaction with a Hard Alloy Under Conditions of Build-Up Formation During Cutting	114
Kuznetsov S.V., Rogovik A.A., Kuznetsova E.S.	
Detection of Parts Obtained by Turning Methods Using the YOLOv5 Object Recognition Model	122
Atamashkin A.S., Priymak E.Y., Isaeva A.V., Tulibaev E.S., Semka Y.S.	
Fatigue Strength of Welded Joints of High-Strength Drill Pipes	129
MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES	141
Martynets E.R.	
Methodology for Improving the Product Development Process Using Digital Twin Technology.....	141
NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT	151
Mishurina O.A., Mullina E.R., Shuvalova M.M., Repina A.A., Lizogub V.A., Shibaeva A.S.	
Technology of Synthesis of Biodegradable Polymer Materials Based on Gelatin.....	151
Zlobin E.P., Balyakin A.V., Khaimovich A.I., Kotov K.A., Kretov K.S., Platonov M.S.	
Manufacturing of Branch Tubes for Nuclear Industry by Direct Energy Deposition Made of Metal Powder Composition 08Cr18Ni10T	159
RELIABILITY AND DURABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT	169
Gerasimenko P.A., Andreeva N.P., Gerasimenko T.E., Revo A.A.	
Development of Technology and Equipment for Strengthening the Foundation of Ball Mill.....	169
INDUSTRIAL ECOLOGY IN METALLURGY	178
Limarev A.S., Somova Yu.V., Volkova E.A.	
Environmental Impact Study and Opportunities for Improving the Environmental Situation in the City of Magnitogorsk Based on the Development of Electric Transport	178
ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET	187
Ershov A.N.	
Current Issues in the Development of Predictive Analytics in Industry.....	187



ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕРАБОТКИ БУРОЖЕЛЕЗНЯКОВЫХ РУД ЮЖНОГО УРАЛА

Колодежная Е.В.¹, Горлова О.Е.^{1,2}, Шадрюнова И.В.¹, Гаркави М.С.³, Хардин И.С.³, Шавакулева О.П.²

¹ Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

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

³ ЗАО «Урал-Омега», Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). По мере истощения традиционной сырьевой базы магнетитовых руд необходимо проводить комплекс мероприятий, направленных на оценку перспектив и разработку технологий переработки бедных бурожелезняковых руд, которых на Южном Урале известно свыше 20 месторождений. В статье рассмотрены новые технологические подходы к переработке окисленного труднообогатимого железорудного сырья на примере одного из месторождений бурых железняков Зигазино-Комаровской группы. **Цель работы.** Оценка возможности обогащения бурожелезняковой руды наиболее простыми и менее затратными сухими процессами обогащения и разработка технологической схемы для получения железного концентрата, пригодного для металлургического передела. **Используемые методы.** Изучение вещественного состава пробы руды проведено рентгено-флуоресцентным и оптико-минералогическим методами, магнитных свойств – осциллографическим способом. Дифференциально-термический анализ выполнен на приборе STA 499 F3 Jupiter. Измельчение и классификация руды проводились в измельчительном комплексе КИ-0,36, работающем с центробежным классификатором КЦ-0,3. Сухая магнитная сепарация проведена на валковом сепараторе ЭВС-28/9 с магнитной индукцией 1,7 Тл, мокрая магнитная сепарация – на полиградиентном мокром магнитном сепараторе с кассетой с ферромагнитными телами. **Новизна.** Разработана технологическая схема сухого обогащения бурожелезняковой руды (без магнетизирующего обжига), позволяющая получать концентрат для аглодомного производства с массовой долей железа на уровне 47,5–49,1% (52,9–54,7% на прокаленное вещество) при достаточно высоком для данного типа руд извлечении 55,5–72,3%. **Результат.** Данная технологическая схема может рассматриваться в качестве альтернативы технологиям гравитационного обогащения и мокрой магнитной сепарации в сильном магнитном поле, обжиг-магнитного обогащения бурых железняков при технико-экономическом обосновании отработки некоторых небольших месторождений. Установлена оптимальная крупность помола руды при сухом обогащении – 0,315 мм и показана целесообразность обесшламливания руды перед сухой магнитной сепарацией. **Практическая значимость.** Технология может быть реализована в виде мобильной дробильно-обоганительной установки сухого предварительного обогащения бурожелезняковой руды непосредственно на месторождениях, не требующих при этом водоснабжения и водоотведения. Это повысит коммерческую привлекательность и потенциал использования небольших по запасам месторождений бурожелезняковых руд для металлургической промышленности Южного Урала.

Ключевые слова: бурожелезняковые руды, удельная магнитная восприимчивость, испытания на обогатимость, магнетизирующий обжиг, сухое обогащение, магнитная сепарация, обесшламливание, измельчительно-классифицирующий комплекс

© Колодежная Е.В., Горлова О.Е., Шадрюнова И.В., Гаркави М.С., Хардин И.С., Шавакулева О.П., 2025

Для цитирования

Перспективы переработки бурожелезняковых руд Южного Урала / Колодежная Е.В., Горлова О.Е., Шадрюнова И.В., Гаркави М.С., Хардин И.С., Шавакулева О.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 5-16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-5-16>



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

PROSPECTS FOR PROCESSING THE LOW-GRADE BROWN IRON ORES OF THE SOUTHERN URALS

Kolodezhnaya E.V.¹, Gorlova O.E.^{1,2}, Shadrunkova I.V.¹, Garkavi M.S.³, Khardin I.S.³, Shavakuleva O.P.²

¹Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³Ural-Omega CJSC, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). As the traditional raw material base of magnetite ores is depleted, it is necessary to carry out a set of measures aimed at assessing the prospects and developing technologies for processing low-grade brown iron ores, of which there are over 20 known deposits in the Southern Urals. The article considers new technological approaches to the processing of oxidized difficult-to-dress iron ore raw materials using one of the brown iron ore deposits of the Zigazino-Komarovo Formation as an example. **Objectives** are evaluation of the possibility of enriching brown iron ore using the simplest and least expensive dry enrichment processes and development of a process flow diagram for obtaining iron concentrate suitable for metallurgical processing. **Methods Applied.** The material composition of the ore sample was studied using X-ray fluorescence and optical-mineralogical methods, and the magnetic properties were studied using the oscillographic method. Differential thermal analysis was performed on the STA 499 F3 Jupiter device. Grinding and classification of ore were carried out in the CG-0,36 grinding complex, working with the CC-0,3 centrifugal classifier. Dry magnetic separation was carried out on the EVS-28/9 roller separator with a magnetic induction of 1,7 T; wet magnetic separation was carried out on a polygradient wet magnetic separator with a cassette with ferromagnetic bodies. **Originality.** A technological scheme for dry enrichment of brown iron ore (without magnetizing roasting) has been developed, making it possible to obtain concentrate for sintering and blast-furnace production with an iron mass fraction of 47,5–49,1% (52,9–54,7% on a calcined substance basis) at a sufficiently high extraction of 55,5–72,3% for this type of ore. **Result.** This process flow chart can be considered as an alternative to gravity enrichment and wet magnetic separation in a strong magnetic field, roasting-magnetic enrichment of brown iron ores in the feasibility study of developing some small deposits. The optimal ore grinding size during dry enrichment was established (0,315 mm), and the feasibility of ore desliming before dry magnetic separation was shown. **Practical Relevance.** The technology can be implemented as a mobile crushing and enrichment unit for dry preliminary enrichment of brown iron ore directly at the deposits, which does not require water supply and drainage. This will increase the commercial attractiveness and potential for using small brown iron ore deposits for the metallurgical industry of the Southern Urals.

Keywords: brown iron ore, specific magnetic susceptibility, enrichment tests, magnetizing roasting, dry enrichment, magnetic separation, desliming, grinding and classifying unit.

For citation

Kolodezhnaya E.V., Gorlova O.E., Shadrunkova I.V., Garkavi M.S., Khardin I.S., Shavakuleva O.P. Prospects for Processing the Low-Grade Brown Iron Ores of the Southern Urals. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 5-16. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-5-16>

Введение

Бурожелезняковые руды кор выветривания имеют важное экономическое значение, поскольку по запасам занимают третье место в мире [1]. Однако использование их в металлургическом производстве в настоящее время весьма ограничено в силу ряда причин. Содержание железа в рудах составляет 17–44%, большинство руд относятся к бедным и требуют обогащения. Наличие в руде фосфора вызывает трудности при разработке технологий их переработки и в ряде случаев удаление фосфора из концентрата возможно только при обжиге [2]. Природные слабомагнитные оксиды и оксигидроксиды железа – гематит, лепидокрокит, гётит, гидрогётит, ферригидрид – составляют значительную часть рудных минералов,

имеют тонкодисперсную зернистость и вкрапленность, образуют порошковатые, скрытокристаллические и коллоидальные массы, а также имеют низкую контрастность магнитных свойств. Характерной особенностью железосодержащих минералов данного типа руд является наличие большого количества переходных форм, различающихся по содержанию железа и текстурно-структурным признакам.

Промышленную переработку такого типа руд на территориях России и стран ближнего зарубежья осуществляют только на Бакальском рудоуправлении (Российская Федерация), перерабатывающем руду Ново-Бакальского месторождения по обжиг-магнитной схеме, и на обогатительной фабрике (ОФ) Лисаковского ГОКа, перерабатывающей руду Лисаковского ме-

сторождения (Республика Казахстан) по гравитационно-магнитной и обжиг-магнитной схемам [3]. Основное сырье для производства железного концентрата на Бакальском рудоуправлении – сидеритовая руда, бурый железняк является сопутствующим типом руды. Среднее содержание железа общего в рудах Бакальского рудоуправления варьирует от 29 до почти 52% [4]. В то же время в Казахстане бурожелезняковые руды являются стратегически важным сырьем для черной металлургии, основные запасы которых сосредоточены на месторождениях Лисаковское, Аятское, Кокбулак, Кутанбулак и Талдыеспе и др. [5–8].

Около 15% запасов железных руд заключено в недрах Уральского федерального округа на территории Свердловской и Челябинской областей. На Урале производится около 20% железорудного сырья России и исторически имеются огромные металлургические мощности по его переработке. При этом ряд комбинатов Южного Урала (Магнитогорский, Челябинский) работают на дальнепривозном сырье и испытывают острый дефицит собственного железорудного сырья. До 65% сырья завозится для них с месторождений КМА, из Республики Карелия, Мурманской и Иркутской областей [9].

В то же время на Южном Урале известно свыше 20 перспективных месторождений бурых железняков (Туканское, Тара, Наратай и др.), представляющих собой серию тектонических чешуй, имеющих значительное сходство и однотипность отдельных объектов. Приуроченность рудных тел к определенным стратиграфическим горизонтам обуславливает линейность в их расположении. Запасы железных руд данного района по категориям A+B+C1 составляют около 74 млн т со средним содержанием железа 40,5% [10]. Характерной особенностью руд данного района является относительно невысокое содержание фосфора – 0,01–0,03%, что делает их перспективным сырьем для металлургической переработки. По мере истощения традиционной сырьевой базы легкообогащаемых магнетитовых руд необходимо проводить комплекс мероприятий, направленных на оценку перспектив и разработку технологий переработки бедных бурожелезняковых руд, которых только в Зигазино-Комаровско-Инзерском районе Республики Башкортостан известно свыше 20 месторождений [11].

Традиционно переработка таких руд осуществляется по сложным обжиг-магнитно-гравитационным схемам, включающим, как правило, стадийную промывку и обесшламливание руды, что значительно удлиняет технологическую цепочку фабрики [12]. Рудоподготовка таких структурно-неоднородных и легкошламуемых руд, как бурые железняки, сопровождается образованием вторичных шламов при большом количестве присутствующих первичных шламов, с которыми связаны основные потери ценного компонента и трудности в обезвоживании полученных продуктов переработки. Наличие в руде глины и охристых частиц потребует создания особенных

условий при транспортировке и складировании исходного сырья, сгущении продуктов переработки. Разрабатываются и более сложные комбинированные технологии обогащения и дефосфорации бурожелезняковых руд, к примеру обжиг-магнитная с выщелачиванием обожженного продукта для руды месторождения Кокбулак в Казахстане [13].

Технология термоманитного обогащения представляет собой наиболее жизнеспособный и приемлемый способ обогащения бурых железняков и применяется на Лисаковском ГОКе в Казахстане, Кремиковском металлургическом комбинате в Болгарии. Сущность технологии заключается в предварительном обжиге руды или концентрата с последующим магнитным обогащением полученного огарка. Термообработка окисленной руды позволяет повысить содержание железа в материале за счет удаления гидратной влаги. В результате обжига могут измениться магнитные свойства железосодержащих минералов за счет перехода гётита в гематит. Гётит превращается в структурно неупорядоченный гематит при температурах до 250°C. При дальнейшем нагревании структура гематита становится всё более совершенной, и к 600°C этот процесс в основном завершается. При этом качество железного концентрата, получаемого из обожженной руды, становится выше, но и себестоимость технологии переработки обожженной руды значительно возрастает [4].

Целями исследования являлись оценка возможности обогащения окисленных бурожелезняковых руд Южного Урала наиболее простыми и наименее затратными сухими процессами обогащения и разработка технологической схемы сухого обогащения для получения железного концентрата, пригодного для металлургического передела.

Теория вопроса, материалы и методы исследования

При переработке бурожелезняковых руд получают концентраты с невысокой массовой долей железа на уровне 50–55%, поэтому построение экономически выгодных технологических схем обогащения данного типа руд должно осуществляться на основе современных научных достижений в области рудоподготовки и магнитной сепарации и включать в себя комплексное изучение вещественного состава, магнитных свойств и их модификации с целью формирования и управления потоками материала, обладающими контрастными свойствами по одному или нескольким разделительным признакам. При переработке бурожелезняковой руды к таким признакам относятся крупность рудных минералов, как природная, сформировавшаяся в месторождении, так и изменяющаяся под действием прикладываемой нагрузки в операциях дезинтеграции, и магнитная восприимчивость материала различной дисперсности. Эти два параметра являются взаимосвязанными и должны изучаться в комплексе.

Разработка схемы сухого обогащения бурожелезняковых руд представляется нам вполне перспективной, так как позволит вводить в эксплуатацию мелкие месторождения, расположенные в неблагоприятных условиях, снизить энергетические затраты во всех операциях обогащения и удешевить природоохранные мероприятия за счет исключения затрат на строительство и содержание хвостохранилища и водно-шламового хозяйства в целом.

Использование воды в качестве транспортирующей и разделительной среды в обогатительных операциях увеличивает объем перерабатываемой рудной массы и удорожает проект в целом. Необходимость строительства вблизи горно-обогатительного комбината хвостохранилища и станции очистки сточных вод создает дополнительные эколого-социальные трудности. Стабильность водоснабжения технологических процессов также вызывает трудности при освоении небольших месторождений, расположенных в горных и засушливых районах. Наличие в бурожелезняковых рудах железосодержащих минералов ряда гётит-гидрогётит определяет необходимость проведения обжига, что также ставит под сомнение целесообразность использования воды в последующих процессах обогащения.

Применение сухой магнитной сепарации в практике обогащения окисленных бурожелезняковых руд ограничено, так как руды обладают слабомагнитными свойствами и относятся к шламуемым материалам [14, 15]. Современные магнитные сепараторы российских производителей позволяют регулировать индукцию магнитного поля в зависимости от крупности питания и магнитных свойств руды [14]. Высокоиндуктивные валковые сепараторы для сухого обогащения слабомагнитных руд ЭРГА СМВИ компании «ЭРГА» имеют повышенную индукцию на рабочей поверхности до 2 Тл, а сепараторы 2ЭВС-36/100 завода «Рудгормаш» имеют индукцию в рабочей зоне не менее 1,65 Тл. В связи с общей направленностью проводимого исследования на применение сухих процессов рудоподготовки и обогащения была испытана сухая магнитная сепарация измельченной бурожелезняковой руды.

Технологии обогащения с использованием сухой магнитной и электрической сепараций, пневматического обогащения, радиометрических методов сегодня можно назвать альтернативой традиционным гравитационным и флотационным схемам обогащения, они имеют большие перспективы для многих видов минерального сырья [16]. Особенностью опробованных технологических решений является использование центробежно-ударной техники в операции рудоподготовки. Реализуемый в оборудовании принцип разрушения свободным ударом в воздушной среде и возможность регулирования величины прилагаемой нагрузки под особенности перерабатываемого сырья позволяет решать широкий спектр задач рудоподготовки [17].

В центробежно-ударную мельницу материал подается внешним управляемым питателем и поступает на вращающийся ускоритель. В ускорителе материал распределяется, приобретает высокую скорость и выбрасывается в камеру измельчения. При ударе частиц о статичную поверхность они разрушаются. Измельченные частицы подхватываются воздушным потоком и направляются во встроенный классификатор. В классификаторе производится разделение: частицы, превышающие установленную границу крупности, направляются в ускоритель на повторный цикл измельчения. Частицы, удовлетворяющие установленной границе, воздушным потоком удаляются из мельницы, осаждаются и разгружаются в готовый продукт. Возможность регулировки гранулометрического состава продуктов классификации за счет изменения числа оборотов и расхода воздуха классификатора позволяет регулировать качественно-количественные показатели переработки в некотором диапазоне значений (рис. 1). Производительность комплексов от 10 до 50 т/ч и гибкость компоновочных решений позволяют легко встраивать пневмокласифицирующие комплексы в современные проектные решения.

По нашему мнению, варьирование степени дисперсности руды в процессе рудоподготовительных операций и дозированная термообработка сырья позволят достичь в процессе обогащения бурожелезняковых руд технологических показателей, приемлемых для введения в промышленную переработку перспективного железорудного сырья. При разрушении бурожелезняковой руды произойдет избирательное разрушение частиц менее прочных глинистых минералов и бедных охристых минералов, а последующая воздушная классификация в центробежном классификаторе позволит получить продукты, отличающиеся не только по гранулометрическому, но и химическому составу.

Объектом исследований является бурожелезняковая охристая руда, отобранная на одном из месторождений Зигазино-Комаровской группы (Республика Башкортостан, Белорецкий район).

Изучение вещественного состава руды проведено рентгено-флуоресцентным методом на рентгеновском энергодисперсионном спектрометре ARL QUANT'X компании Thermo Scientific с использованием программного обеспечения UniQuant. Дифференциально-термический анализ выполнен на приборе STA 499 F3 Jupiter. Минеральный состав проб определялся оптико-минералогическим методом анализа на автоматизированном анализаторе горных пород, руды и рудных концентратов «Минерал С7».

Магнитные свойства минералов характеризуются магнитной восприимчивостью, коэрцитивной силой и удельной намагниченностью, которые были определены осциллографическим способом для порошкообразных материалов, позволяющим визуально наблюдать кривую гистерезисного цикла при намагничивании образца переменным током на экране электронного осциллографа [18].

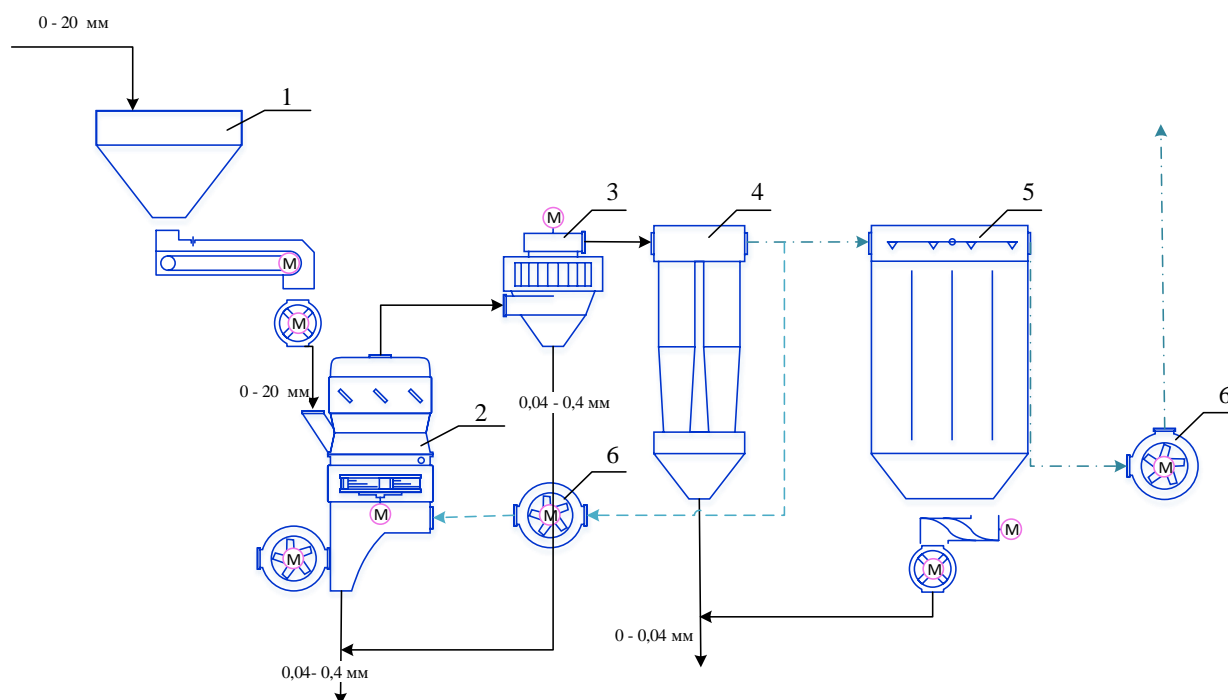


Рис. 1. Измельчительно-классифицирующий комплекс: 1 – бункер с ленточным питателем; 2 – центробежно-ударная мельница МЦ; 3 – центробежный классификатор КЦ; 4 – группа циклонов; 5 – фильтр рукавный; 6 – вентилятор
Fig. 1. Grinding and classifying unit: 1 is hopper with belt feeder; 2 is centrifugal impact mill MC; 3 is centrifugal classifier CC; 4 is cyclone group; 5 is bag filter; 6 is fan

Измельчение и классификация руды проводились в измельчительном комплексе КИ-0,36, работающем с центробежным классификатором КЦ-0,3 компании ЗАО «Урал-Омега» (Россия). Производительность комплекса по исходному материалу составляет до 300 кг/ч. Обжиг руды проводился в муфельной печи ЭКПС-10 при температуре 400°C в течение 1 ч.

Сухая магнитная сепарация проведена на лабораторном валковом сепараторе ЭВС-28/9 с максимальной магнитной индукцией в рабочей зоне до 1,7 Тл. Производительность сепаратора до 600 кг/ч. Мокрая магнитная сепарация осуществлялась на установке, включающей электромагнитную систему и кассету с ферромагнитными телами – железными шарами с напряженностью электромагнитного поля на обкладках кассеты 115–355 кА/м, представляющей собой полиградиентный мокрый магнитный сепаратор.

Результаты исследования и их обсуждение

Опробованные руды относятся к гипергенным бурым железнякам, сформировавшимся при выветривании сидеритов, а также основных и ультраосновных пород. Данная руда содержит 0,02% фосфора и является перспективным металлургическим сырьем (табл. 1). Влажность руды составила 8,5%.

Таблица 1. Химический состав технологической пробы руды

T a b l e 1. Chemical composition of the technological ore sample

Массовая доля компонентов, %									
Fe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	K ₂ O	SO ₃	пмпп
42,8	14,0	0,28	0,80	9,60	0,30	1,40	1,79	42,8	9,03

Руды представлены плотными бурыми железняками и рыхлыми охристыми разностями. Главные рудные минералы: гётит, гидрогётит с подчиненными количествами гидрогематита, соотношение которых в параллельно отобранных пробах колеблется в широком диапазоне. В небольших количествах присутствуют гематит и гидроксиды марганца. Другие ценные попутные минералы, кроме марганцевых, отсутствуют. Вмещающие породы представлены слабометаморфизованными известняками, доломитами и углесто-глинистыми и алевролитоглинистыми сланцами. Содержание железа общего в пробе составило 42,8%.

Для определения температуры обжига руды, при которой происходит удаление химически связанной влаги из рудных минералов, был проведен дифференциально-термический анализ исходного материала, результаты которого приведены на рис. 2.

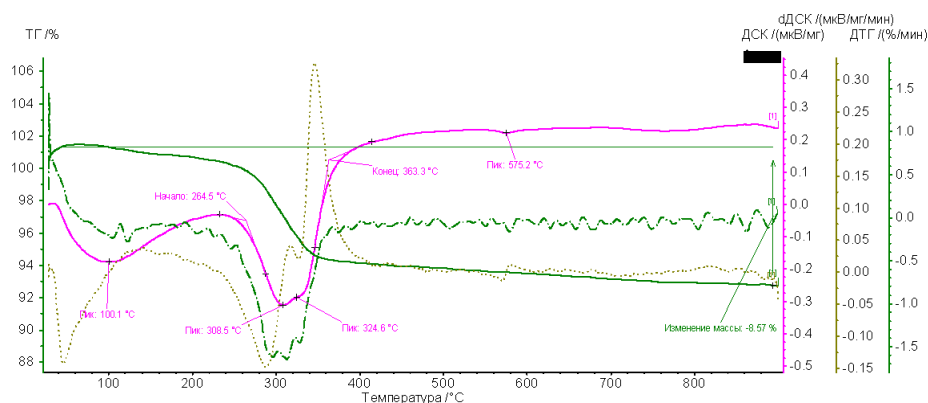


Рис. 2. Результаты дифференциально-термического анализа

Fig. 2. Results of differential thermal analysis

Как следует из представленных данных, при температуре 400°C происходит наиболее полная дегидратация бурожелезняковой руды. Содержание Fe_2O_3 в руде при обжиге возрастает с 45 до 51,0%. Для определения времени, необходимого для обжига, проведены эксперименты и установлены зависимости степени дегидратации руды от времени при температуре

обжига 300 и 400°C (рис. 3). Достаточен обжиг при температуре 400°C в течение 1 ч.

Для определения расхода тепла, необходимого для обжига материала, проведен теплотехнический расчет при содержании $\alpha\text{-FeOOH}$ в руде, равном 53% (табл. 2). Общий расход тепла на обжиг составит 1139,2 кДж/кг.

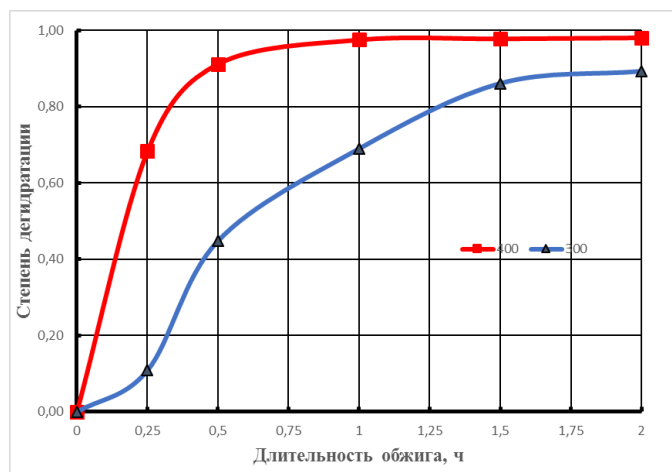


Рис. 3. Кинетика дегидратации бурожелезняковой руды

Fig. 3. Kinetics of dehydration of brown iron ore

Таблица 2. Расчет расхода тепла на обжиг

Table 2. Calculation of heat consumption for firing

Исходные данные	Результаты расчета
1. Начальная температура материала $t_n = 20^\circ\text{C}$	1. Расход тепла на нагрев материала: $Q_n = c_m(t_k - t_n) = 302,1 \text{ кДж/кг}$
2. Температура обжига $t_k = 400^\circ\text{C}$	2. Расход тепла на испарение физической влаги: $Q_{\text{исп}} = (2500 - 4,2 \cdot t_n) \cdot \frac{w}{100 - w} = 137,7 \text{ кДж/кг}$
3. Удельная теплоемкость материала $c_m = 0,795 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$	3. Тепловой эффект реакции дегидратации: $2\text{FeOOH} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O};$ $Q_p = 5,6 \cdot (\sum \Delta H_{\text{пр}} - \sum \Delta H_{\text{исх}}) = 1319,7 \text{ кДж/кг}$
4. Влажность материала $w = 5,4\%$	4. Расход тепла на дегидратацию: $Q_p = 0,53 \cdot 1319,7 = 699,4 \text{ кДж/кг}$
5. Стандартная энтальпия компонентов ΔH_{298} : – $\alpha\text{-FeOOH} = -558 \text{ кДж/моль}$ – $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 = -823,3 \text{ кДж/моль}$ – $\text{H}_2\text{O} = -57,8 \text{ кДж/моль}$	5. Общий расход тепла: $Q_{\text{общ}} = 302,1 + 137,7 + 699,4 = 1139,2 \text{ кДж/кг}$
6. Содержание $\alpha\text{-FeOOH}$ в руде – 53%	

Изучение магнитных свойств материала проводилось на разделенном исходном продукте по классам крупности +0,5, -0,5+0,1, -0,1+0 мм. Результаты определения магнитной восприимчивости, коэрцитивной силой и удельной намагниченности с использованием осциллографического способа представлены на рис. 4. Изучение магнитных свойств различных классов крупности бурожелезняковой руды показало, что с уменьшением крупности материала снижаются магнитные свойства материала. Так, для крупности более 0,5 мм удельная магнитная восприимчивость составляет $2 \cdot 10^{-8}$ м³/кг, коэрцитивная сила – 14 кА/м, для крупности -0,5+0,1 мм удельная магнитная восприимчивость составляет $2 \cdot 10^{-8}$ м³/кг, коэрцитивная сила – 23 кА/м и для крупности менее 0,1 мм удельная магнитная восприимчивость составляет всего $1 \cdot 10^{-8}$ м³/кг, а коэрцитивная сила – только 4 кА/м. Следовательно, материал крупностью более 0,1 мм обладает

более выраженными магнитными свойствами. Слабые магнитные свойства мелких частиц свидетельствуют о нецелесообразности их обогащения магнитным методом, поэтому они преимущественно будут переходить в хвосты. Показатели магнитных свойств материала крупностью более 0,5 мм подтверждают возможность отделения железосодержащих минералов при магнитной индукции в рабочей зоне сепаратора более 1,5 Тл.

При увеличении крупности материала увеличивается гистерезис остаточной намагничиваемости образцов, но ввиду установленного низкого значения данной характеристики в изученных пробах это не существенно влияет на эффективность процесса сепарации. Определяющее значение будет играть раскрытие сростков железистых минералов при измельчении и наличие шламов в зоне действия магнитной системы.

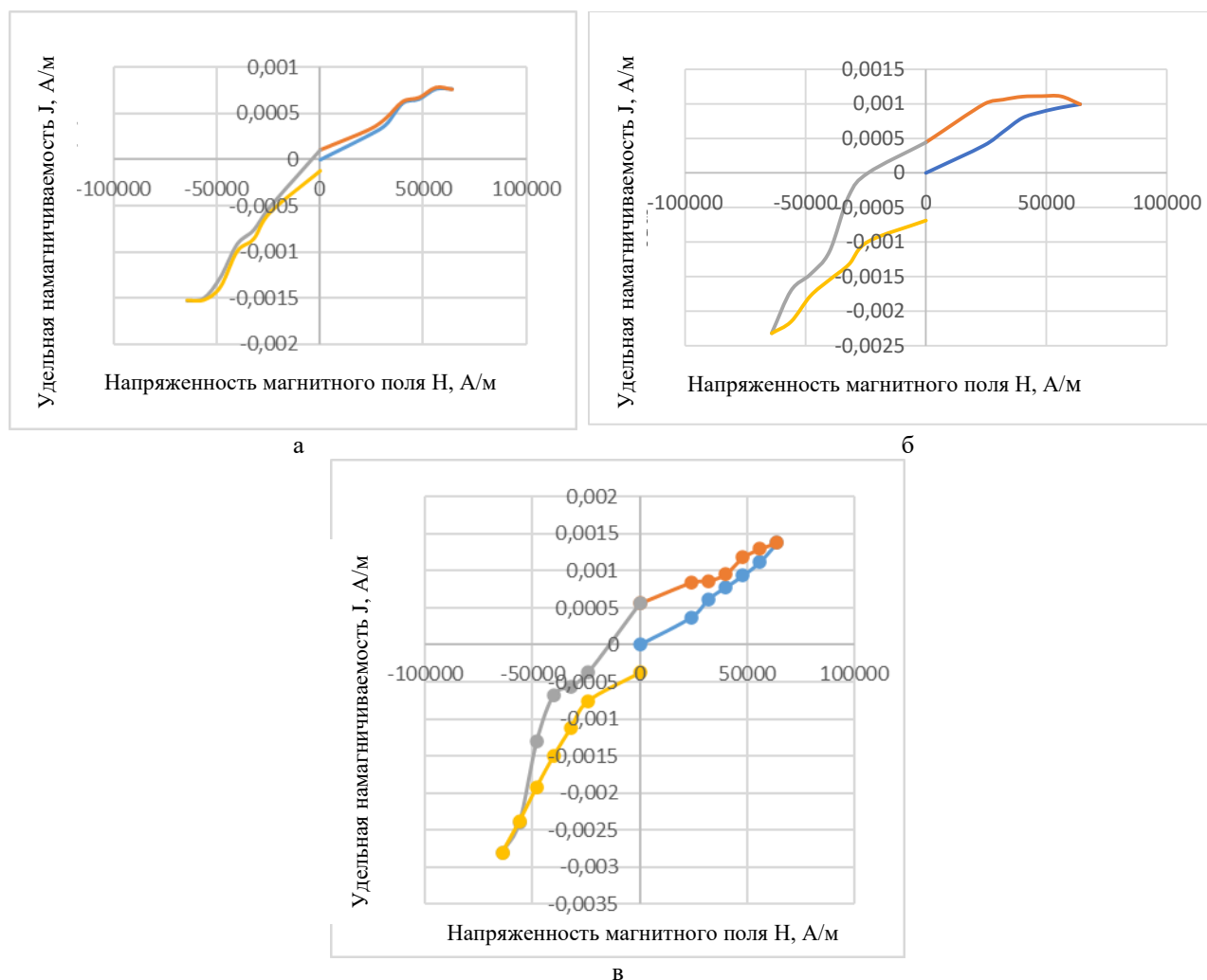


Рис. 4. Результаты определения магнитных свойств классов крупности бурожелезняковой руды:

а – менее 0,1 мм; б – 0,5-0,1 мм; в – более 0,5 мм

Fig. 4. Results of determining the magnetic properties of grain-size classes of brown iron ore: less than 0.1 mm (a), 0.5-0.1 mm (b), more than 0.5 mm (v)

Для сравнения технологических показателей сухой и мокрой магнитной сепарации были проведены технологические испытания по двум вариантам схем (рис. 5). Проба исходной руды была высушена (без магнетизирующего обжига) и усреднена. Далее руда стадийно дробилась до крупности менее 5 мм и была разделена на две идентичные пробы.

Схема сухого обогащения включала измельчение руды в центробежно-ударной мельнице, воздушную классификацию по границе 0,04 мм и сухую магнитную сепарацию. В результате испытаний установле-

ны оптимальные параметры работы комплекса, позволяющие достичь требуемой крупности помола руды при минимальных потерях ценного компонента со шламами (рис. 6, а). При проведении исследований было установлено, что при повышении крупности разделения потери железа со шламовым продуктом уменьшаются, а затем начинают увеличиваться ввиду недораскрытия сростков железистых минералов и минералов породы. Оптимальной крупностью руды при сухом обогащении изученной пробы является 0,315 мм.



Рис. 5. Показатели переработки бурожелезняковой руды по схемам сухого (а) и мокрого (б) обогащения
Fig. 5. Indicators of processing of brown clay iron ore according to dry (a) and wet (b) enrichment schemes

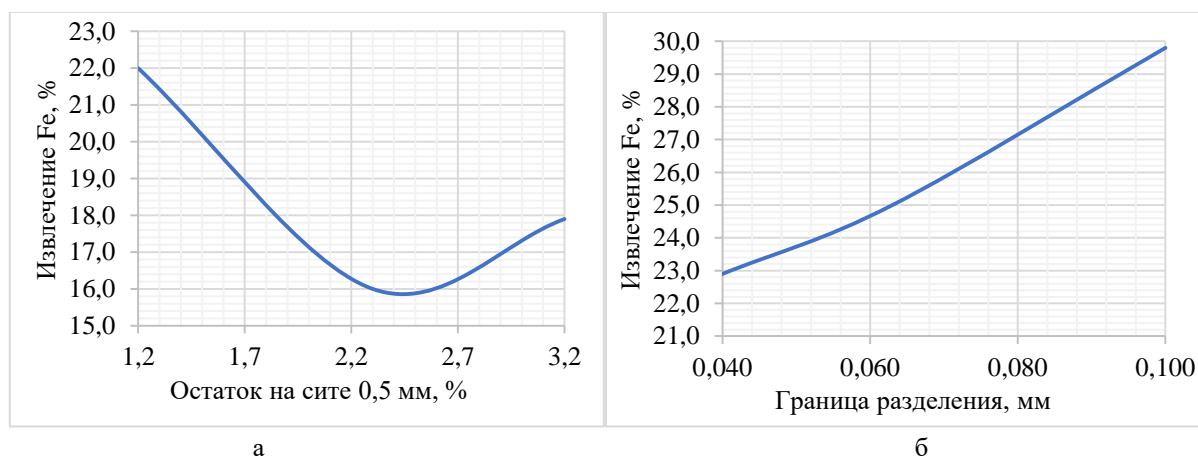


Рис. 6. Зависимости потерь ценного компонента (железа) со шламами: а – при обесшламливании воздушной сепарацией и сухом обогащении; б – при обесшламливании промывкой и мокрым обогащением
Fig. 6. Dependencies of valuable component (iron) losses with sludge: а is during desliming by air separation and dry enrichment and; б is during desliming by washing and wet enrichment

Схема мокрого обогащения включала промывку дробленной руды с выделением шламов и мокрую магнитную сепарацию обесшламленного материала. При промывке также произошло разрушение слабых рудных агрегатов, и крупность обесшламленного материала составила 100% класса -0,5 мм. Крупность шламовой фракции, при которой обеспечиваются минимальные потери железа с хвостами переработки, составила 0,04 мм (рис. 6, б).

Установлено, что качественно-количественные показатели переработки бурожелезняковой руды по схеме сухого магнитного обогащения по выходу магнитного продукта и извлечению в него железа значительно превосходят показатели, достигнутые по традиционной схеме переработки с промывкой и полиградиентной мокрой магнитной сепарацией.

Разработанная и испытанная технологическая схема сухого обогащения бурожелезняковой руды позволила без магнетизирующего обжига получить концентрат для аглодомного производства с массовой долей железа на уровне 47,5–49,1% (52,9–54,7% на прокаленное вещество) при достаточно высоком для данного типа руд извлечении 55,5–72,3%. В случае снижения массовой доли железа в исходной руде и при необходимости повышения массовой доли железа в концентрате свыше 48% в схему следует включить обжиг исходной руды при температуре 400°C, как показали проведенные исследования. Одновременно это будет способствовать повышению однородности материала, поступающего на переработку, исключит налипание глинистой руды на рабочие поверхности дробильного оборудования и повысит надежность работы всей технологической линии. Но, с другой стороны, включение в схему операции обжига руды будет удорожать стоимость переработки.

Данная технологическая схема сухого обогащения может рассматриваться в качестве альтернативы технологиям гравитационного обогащения и мокрой магнитной сепарации в сильном магнитном поле, обжиг-магнитного обогащения бурых железняков при технико-экономическом обосновании отработки некоторых небольших месторождений. Технология может быть использована в целях предварительного обогащения бурожелезняковой руды непосредственно на месторождении в составе мобильной дробильно-обогащительной установки, не требующей при этом водоснабжения и водоотведения, с последующим дообогащением полученного магнитного продукта уже на обогащательной фабрике. Полученные результаты открывают перспективы весьма значительного усовершенствования технологии переработки окисленного труднообогатимого железорудного сырья.

Заключение

Бурожелезняковые руды в перспективе будут иметь важное экономическое значение для металлургической промышленности Южного Урала за счет их значительных запасов, пониженного содержания нормируемых примесей и в связи с исчерпанием бо-

гатых и легкообогатимых магнетитовых руд. Рост мирового производства стали в настоящее время увеличил спрос на железную руду, в связи с чем в последние десятилетия в мире были предприняты значительные усилия по созданию новых технологических схем переработки бурожелезняковых руд с получением кондиционных железорудных концентратов.

Технология сухого обогащения представляется наиболее приемлемой для отработки небольших по запасам месторождений и рудопроявлений ввиду отсутствия «привязки» к источникам водоснабжения, исключения необходимости складирования «мокрых» хвостов, наличия подходящего компактного оборудования отечественных производителей, что позволит создавать мобильные и передвижные обогащательные комплексы по типу современных высокотехнологичных дробильно-сортировочных комплексов по переработке шлаков. Сухие фракционированные хвосты обогащения в виде мелкого наполнителя и пигмента могут найти применение при производстве строительных материалов и изделий.

Строительство таких предприятий также будет способствовать развитию логистической инфраструктуры и улучшению социально-экономических показателей региона за счет создания рабочих мест и востребованности квалифицированных трудовых кадров. Полученные результаты лабораторных исследований бурожелезняковой руды месторождения Зигазино-Комаровской группы свидетельствуют о перспективности новых технологических подходов к обогащению окисленного железорудного сырья Южного Урала.

Список источников

1. Дунаев В. А. Состояние и проблемы промышленного освоения минерально-сырьевой базы черной металлургии России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. №5. С. 117-122. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-problemy-promyshlennogo-osvoeniya-mineralno-syrievoy-bazy-chernoy-metallurgii-rossii> (дата обращения: 29.05.2025).
2. Термомагнитное обогащение и дефосфорация бурожелезняковых руд и концентратов / А.А. Мухтар, М.К. Мухымбекова, А.С. Макашев, В.Н. Савин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. №9. С. 708-713. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-708-713>.
3. Лопатин Ю. Н., Мушкетов А. А., Дмитриева Е. Г. Комплексные исследования по получению окисленных окатышей из бурожелезняковой руды // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 7. С. 55 – 68. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-7-55-68.
4. Orlov V. P., Berigin M. I., Golovkin N. I. (eds.) Iron ore resources of Russia. Moscow: Geoinformatsiia Publishing; 1998. (In Russ.).
5. Bogdanov O. S., Nenarokomov Iu. F. (eds.) Reference book on mineral processing. Processing plants. 2nd edition. Moscow: Nedra Publishing; 1984. 360 p. (In Russ.).
6. Смирнов Л.А., Бабенко А.А. Вовлечение в производство Лисаковского концентрата – одно из направлений расширения железорудной базы Урала

- и Сибири // Материалы Международного конгресса «300 лет Уральской металлургии». Екатеринбург, 2001. С. 48–49.
7. Рыбаков В.Н., Цылев Л.М., Громов М.И. Интенсификация процесса восстановления при магнетизирующем обжиге окисленных руд // Обжиг-магнитное обогащение окисленных руд. Киев, 1996. С.10–16.
 8. Мирко В.А., Кабанов Ю. А., Найденов В. А. Современное состояние развития месторождений бурых железняков Казахстана // Промышленность Казахстана. 2002. № 1. С. 79–82.
 9. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году». Москва, 2024.
 10. Пахомов В. П., Душин А. В. Оценка минерально-сырьевой безопасности УрФО // Экономика региона. 2008. № 3(15). С. 129–143.
 11. Определение степени обогатимости бурожеlezняковой руды сухим способом / М. С. Гаркави, О. Е. Горлова, Е. В. Колодежная, И. С. Хардин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 21–25 апреля 2025 года. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2025. С. 19.
 12. Громов М.И., Рыбаков В.Н. Подготовка железорудного сырья к металлургическому переделу. М.: Наука, 1973. С. 151–161.
 13. Комбинированная технология обогащения и дефосфорации бурожеlezняковой руды месторождения Кокбулак / А. А. Мухтар, А. С. Макашев, Б. К. Касымова, М. М. Атахан // Обогащение руд. 2024. №2. С. 3–7. DOI: 10.17580/or.2024.02.01.
 14. Пелевин А.Е. Технологии обогащения железных руд России и пути повышения их эффективности // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 579–592. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.
 15. Особенности обогащения низкотитанистых магнетитовых руд Урала / И. А. Гришин, Н. Н. Орехова, М. С. Гаркави, О. Е. Горлова // Горный журнал. 2019. № 11. С. 37–43. DOI: 10.17580/gzh.2019.11.06.
 16. Шадрунова И. В., Колодежная Е. В., Горлова О. Е. Разработка технологии сухого обогащения флюоритовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 2. С. 43–57. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_43.
 17. Обоснование интегративного критерия для прогноза возможности селективной дезинтеграции техногенного сложноструктурного сырья / О. Е. Горлова, Н. Н. Орехова, Е. В. Колодежная [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. № 3. С. 15–26. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-15-26.
 18. Вечеркин М.В., Шавакулева О.П., Романова И.П. Измеритель концентрации ферромагнитного компонента в порошкообразном материале горно-обогатительного производства // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года. В 2-х т. Т. 2. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2023. С. 351.

References

1. Dunaev V.A. The state and problems of industrial development of Russia's mineral resource base for ferrous metallurgy. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin], 2004;(5):117–122. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-problemy-promyshlennogo-osvoeniya-mineralno-syrievoy-bazy-chernoy-metallurgii-rossii> (Accessed May 29, 2025).
2. Mukhtar A.A., Mukhymbekova M.K., Makashev A.S., Savin V.N. Thermomagnetic enrichment and dephosphorization of brown iron ore and concentrates. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2018;(6(9)):708–713. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-708-713> (In Russ.)
3. Lopatin Yu.N., Mushketov A.A., Dmitrieva E.G. Integrated study on obtaining oxide pellets from brown iron ore. *Izvestiya vuzov. Gorniy zhurnal* [Minerals and Mining Engineering], 2021;(7):55–68. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-7-55-68 (In Russ.)
4. Orlov V.P., Berigin M.I., Golovkin N.I. Iron ore resources of Russia. Moscow: Geoinformatsiia Publishing, 1998, 842 p. (In Russ.)
5. Bogdanov O.S., Nenarokomov Iu.F. Reference book on mineral processing. Moscow: Nedra Publishing, 1984, 360 p. (In Russ.)
6. Smirnov L.A., Babenko A.A. Involvement in the production of Lisakovsky concentrate is one of the directions for expanding the iron ore base of the Urals and Siberia. *Mater. Mezhdunar. kongr. «300 let Uralskoy metallurgii* [Proceedings of the International Conference "300 Years of the Ural Conference"]. Ekaterinburg, 2001, pp. 48–49. (In Russ.)
7. Rybakov V.N., Tsylev L.M., Gromov M.I. Intensification of the reduction process during magnetizing roasting of oxidized ores. *Obzhig-magnitnoe obogashchenie okislennykh rud* [Roasting and magnetic enrichment of oxidized ores]. Kyiv, 1996, pp.10–16. (In Russ.)
8. Mirko V.A., Kabanov Yu.A., Naidenov V.A. The current state of development of Kazakhstan's brown iron ore deposits. *Promyshlennost Kazakhstana* [Industry of Kazakhstan], 2002;(17):79–82. (In Russ.)
9. The State report "On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2023". Moscow, 2024 (In Russ.)
10. Pakhomov V.P., Dushin A.V. Analysis of the mineral-raw material safety in the Ural Federation District. *Ekonomika regiona* [Economy of Regions], 2008;(15):129–143. (In Russ.)
11. Garkavi M.S., Gorlova O.E., Kolodezhna E.V., Khardin E.S. Determination of the enrichment degree of brown iron ore by the dry method. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: Tezisy dokladov 83-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Current issues of modern science, technology and education. Proceedings of the 83th Cross-Regional Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2025, p. 19. (In Russ.)
12. Gromov M.I., Rybakov V.N. *Podgotovka zhelezorudnogo syria k metallurgicheskomu peredelu* [Preparation of iron

- ore raw materials for metallurgical conversion]. Moscow: Nauka, 1973, pp. 151-161. (In Russ.)
13. Mukhtar A.A., Makashev A.S., Kasymova B.K., Atakhan M.M. Combined processing and dephosphorization of brown iron ore of the Kokbulak deposit. *Obogashchenie Rud* [Ore enrichment], 2025;(2):3-7. (In Russ.)
 14. Pelevin A.E. Iron ore enrichment technologies in Russia and ways to improve their efficiency. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2022;(256):579-592. (In Russ.)
 15. Grishin I.A., Orekhova N.N., Garkavi M.S., Gorlova O.E. Features of the Ural low-titanium magnetite ore processing. *Gornyi Zhurnal* [Mining Journal], 2019;(11):37-43. (In Russ.)
 16. Shadrinova I.V., Kolodezhnaya E.V., Gorlova O.E. Dry processing technology for fluorite ore. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin], 2023;(2):43-57. (In Russ.)
 17. Gorlova O.E., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V., Kolokova M.S., Glagoleva I.V. Providing a rationale for an integrative criterion to predict the potential selective disintegration of technology-related, complex structured raw materials. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023;(3):15-26. (In Russ.)
 18. Vecherkin M.V., Shavakuleva O.P., Romanova I.P. Ferromagnetic component concentration meter in powdered mining and processing materials. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: Tezisy докладов 81-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Current issues of modern science, technology and education. Proceedings of the 81th Cross-Regional Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2023, p. 351. (In Russ.)

Поступила 23.06.2025; принята к публикации 08.09.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 23/06/2025; revised 08/09/2025; published 30/06/2025

Колодежная Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия.

E-mail: kev@uralomega.ru. ORCID 0000 0002 0252 4479.

Горлова Ольга Евгеньевна – доктор технических наук, профессор,

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия; ведущий научный сотрудник,

Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия.

E-mail: gorlova_o_e@mail.ru. ORCID 0000-0003-1142-0652.

Шадрунова Ирина Владимировна – доктор технических наук, профессор,

заведующая отделом горной экологии,

Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия.

E-mail: shadrinova_@mail.ru. ORCID 0000-0002-4410-8182.

Гаркави Михаил Саулович – доктор технических наук, заместитель главного инженера,

ЗАО «Урал-Омега», Магнитогорск, Россия.

E-mail: gms@uralomega.ru. ORCID 0000-0002-1912-5415.

Хардин Игорь Сергеевич – лаборант,

ЗАО «Урал-Омега», Магнитогорск, Россия.

E-mail: kev@uralomega.ru.

Шавакулева Ольга Петровна – кандидат технических наук, доцент,

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

E-mail: shavakuleva@yandex.ru. ORCID 0000-0001-6291-2687.

Ekaterina V. Kolodezhnaya – PhD (Eng.), Lead Researcher,

Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: kev@uralomega.ru. ORCID 0000 0002 0252 4479.

Olga E. Gorlova – DrSc (Eng.), Professor,

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia;

Lead Researcher,

Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: gorlova_o_e@mail.ru. ORCID 0000-0003-1142-0652.

Irina V. Shadrunova – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of the Mining Ecology, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: shadrunova_@mail.ru. ORCID 0000-0002-4410-8182.

Mikhail S. Garkavi – DrSc (Eng.), Deputy Chief Engineer, Ural-Omega CJSC, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: gms@uralomega.ru. ORCID 0000-0002-1912-5415.

Igor S. Khardin – Laboratory Assistant, Ural-Omega CJSC, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: kev@uralomega.ru.

Olga P. Shavakyleva – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

E-mail: shavakylevao@yandex.ru. ORCID 0000-0001-6291-2687.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.221.2
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-17-25



ОБЗОР ПОДХОДОВ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ ВСКРЫТИЯ, ПОРЯДКА ОТРАБОТКИ И ОТВАЛООБРАЗОВАНИЯ МУЛЬДООБРАЗНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЯ

Кисляков В.Е., Шварцкопф А.В., Федотов А.С.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Актуальность работы. На основании данных, находящихся в открытом доступе, о состоянии сырьевой базы страны и экономических результатах ведения горных работ по отчетным периодам определено, что угольная промышленность в стране демонстрирует стремление к развитию. Но современная геополитическая обстановка и связанная с ней санкционная нагрузка негативно сказываются на показателях эффективности и препятствуют зародившемуся развитию угольной промышленности. Уход основных потребителей и перераспределение потоков сбыта значительно сказались на горнодобывающих предприятиях и на конъюнктуре рынка в целом. Поэтому разработка и внедрение новых решений, направленных на повышение эффективности освоения месторождений, является актуальной задачей. **Цель работы.** Провести анализ предложений, находящихся в открытом доступе, результатом которых является повышение рентабельности отработки угольных месторождений за счет оптимизации таких параметров, как схема вскрытия, порядок отработки и отвалообразования, регулирование режима горных работ, и выделить в предложенных решениях слабые стороны, которые оказывают влияние на ведение работ, но в настоящий момент не приняты во внимание. Выбранные направления имеют последовательную взаимосвязь и поэтому рассматриваются совместно. **Результаты работы.** По итогам анализа собранной информации отмечено, что предложения по оптимизации горных работ не учитывают все особенности отработки угольных месторождений открытым способом и в настоящий момент не позволяют решить часть проблем для предприятий, имеющих дефицит выработанного пространства для внутренних отвалов, площадей под внешние отвалы и смежные лицензии других недропользователей, ограничивающие эти площади. По результатам работы определена дальнейшая цель исследования.

Ключевые слова: уголь, угольные месторождения, вскрытие, порядок отработки, режим горных работ, отвалообразование

© Кисляков В.Е., Шварцкопф А.В., Федотов А.С., 2025

Для цитирования

Кисляков В.Е., Шварцкопф А.В., Федотов А.С. Обзор подходов в решении проблем вскрытия, порядка отработки и отвалообразования мультимодальных залежей угля // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 17-25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-17-25>



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

REVIEW OF APPROACHES TO SOLVING PROBLEMS OF OPENING, MINING PROCEDURE AND DUMPING OF SYNCLINAL COAL DEPOSITS

Kislyakov V.E., Shwartskopf A.V., Fedotov A.S.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. Relevance. Based on publicly available data on the state of the country's raw material base and the economic results of mining operations for the reporting periods, it has been determined that the coal industry in the country demonstrates a desire to develop. However, the current geopolitical situation and the associated sanctions burden have a negative impact on performance indicators and hinder the nascent development of the coal industry. The departure of key consumers and the redistribution of sales flows have had little significant on mining enterprises and the market situation as a whole. Therefore, the development and implementation of new solutions aimed at increasing the efficiency of deposit development is an urgent task. **Objectives** are to analyze proposals that are publicly available, the result of which is an increase in the profitability of coal deposit development by optimizing such parameters as the opening scheme, the order of development and dumping, regulation of the mining mode, and to highlight the weaknesses in the proposed solutions that affect the conduct of work, but are currently not taken into account. The selected areas have a consistent interrelation and are therefore considered together. **Result.** Based on the results of the analysis of the collected information, it was noted that the proposals for optimizing mining operations do not take into account all the features of open-pit coal mining and currently do not allow solving some of the problems for enterprises that have a deficit of developed space for internal dumps, areas for external dumps and related licenses of other subsoil users limiting these areas. Based on the results of the work, the further goal of the study was determined.

Keywords: coal, coal deposits, opening, mining procedure, mining mode, waste disposal

For citation

Kislyakov V.E., Shwartskopf A.V., Fedotov A.S. Review of Approaches to Solving Problems of Opening, Mining Procedure and Dumping of Synclinal Coal Deposits. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 17-25. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-17-25>

Введение

Уголь – это одно из самых распространённых и востребованных полезных ископаемых в мире. Твёрдое топливо занимает второе место по востребованности в мире. Общие мировые запасы разведанного угля превышают 1 трлн т. В России уголь относится к первой группе полезных ископаемых, сырьевая база которых способна обеспечить потребности экономики страны в долгосрочной перспективе, без привлечения дополнительных средств на геологоразведочные работы [1].

Российская Федерация входит в ТОП-10 стран по количеству разведанных запасов угля и занимает 4-е место, а по добыче 6-е место среди мировых лидеров. Запасы угля сконцентрированы в 22-х угольных бассейнах и составляют 274 млрд т.

По результатам исследования производственных показателей угледобывающих предприятий, объем угледобычи в России с каждым годом увеличивается и за последние 10 лет рост составил более 40% (рис. 1) [2-4].

Основываясь на данных, приведенных выше, можно сделать вывод о том, что угольная отрасль – развивающееся направление в стране и, как и любая другая развивающаяся сфера, нуждается в постоянной разработке и внедрении принципиально новых решений, которые позволят повысить эффективность

ведения работ, снизить производственные и сопутствующие затраты.

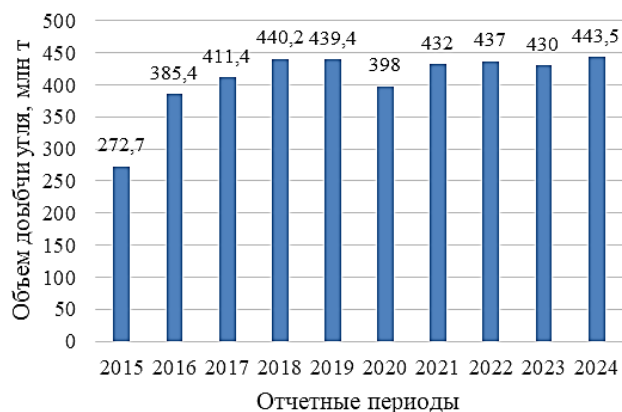


Рис. 1. Объемы добычи угля в РФ за последние 10 лет
Fig. 1. Coal production volumes in the Russian Federation over the past 10 years

Принимая во внимание тот факт, что на протяжении нескольких лет происходит формирование новых центров угледобычи в местности с суровым климатом и горно-геологическими условиями (Арктика, Чукотский АО, полуостров Таймыр), которые осложнены изменчивым рельефом и морфологией залежи,

предварительная апробация новых решений позволит в дальнейшем применять полученный опыт с большей эффективностью при отработке месторождений в указанных регионах.

Наиболее яркими примерами факторов, которые влияют на эффективность освоения таких месторождений, являются: направление развития и режим горных работ [5]; схема вскрытия месторождения [6]; технология ведения работ, технология и порядок отвалообразования [7]. Указанные факторы зависят в первую очередь от геологического строения, которое может быть осложнено изменчивостью угла падения пласта(-ов), их мощностью, формой границ пласта в плане, наличием тектонических сдвигов и прочих ограничивающих факторов (в том числе правоуставляющих).

В связи с тем, что мультислойные залежи угля могут быть представлены несколькими пластами (до 10-ти и более), которые разделены между собой междупластем разной мощности, существуют примеры, когда месторождение вскрывают не на всю глубину сразу (не до нижнего пласта) и ведут развитие горных работ по более мощному пласту, создавая при этом отдельные рабочие зоны, которые могут иметь различную скорость развития и эффективность отработки. Наиболее полно указанная проблема описана в работе [8].

Такой порядок отработки и поэтапного вскрытия месторождения безусловно приносит положительный экономический эффект, особенно на первоначальных этапах эксплуатации, но в то же время создает неблагоприятные условия для дальнейшего развития горных работ. Концентрация работ на верхних пластах не позволяет вести внутреннее отвалообразование из-за наличия нижележащих пластов, отработка которых предусматривается более поздними периодами. А отсутствие возможности строительства внутренних отвалов в совокупности с постоянными ростом расстояния транспортирования по мере развития рабочей зоны повышают затраты на ведение вскрышных работ, которые могут достигнуть критической точки, при которой отработка станет невыгодной. Поэтому при отработке месторождений такого типа необходима тщательная проработка основных этапов (схема вскрытия, порядок отработки, уровень производственной мощности по разным рабочим зонам, распределение грузопотоков на внутренний и внешний отвалы).

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что повышение эффективности освоения месторождений указанного типа возможно за счет обоснования рационального порядка отработки и отвалообразования, режима горных работ и является актуальной задачей, которая позволит не только повысить рентабельность отработки, но и снизить риски ее временного снижения из-за указанных проблем.

Материалы исследований

Для оценки глубины изученности проблем вскрытия, порядка отработки и отвалообразования при отработке угольных месторождений открытым и комбинированным способами был проведен анализ научных трудов и базовой научной литературы, находящихся в открытом доступе на различных информационных ресурсах.

Анализ литературы позволил сделать вывод, что принципиально новых классификаций способов вскрытия исследователями не представлено. Все решения основываются на использовании уже известных классификаций, представленных такими учеными, основоположниками теории вскрытия, как Е.Ф. Шешко, А.И. Арсентьев, В.В. Ржевский.

Используя известные классификации, Арсентьев А.И. предложил оригинальную классификацию способов вскрытия, которая охватывает все возможные типы вскрываемых выработок и условия их использования. Ржевским В.В. была также предложена альтернативная классификация способов вскрытия, которая характеризует способ вскрытия не только по типу выработки, но и по времени существования, наклону, числу обсуживаемых горизонтов и характеру движения транспортных средств.

Следует отметить, что классификации способов вскрытия месторождений не несут информации касемо направлений транспортирования. Описание направления транспортирования вскрышных пород и полезного ископаемого отмечается в классификации систем разработки, представленной Шешко Е.Ф. Для получения представления о степени изученности проблем вскрытия угольных месторождений, а также изученности направлений, имеющих прямую связь со вскрытием (порядок отработки, режим горных работ, отвалообразование), произведен анализ предлагаемых решений.

Результаты анализа и их обсуждение

Уровень производственной мощности предприятия и режим горных работ оказывают прямое влияние на схему вскрытия (количество выработок и места их заложения). Существуют различные научные предложения по управлению режимом горных работ, такие как формирование нерабочего борта разреза и отработка запасов по флангам мульды с меньшим коэффициентом вскрыши, изменение рабочего угла откоса борта за счет изменения системы разработки и регулирование режима горных работ на основании анализа сдерживающих факторов и резервов управления [9-11]. Предложенные варианты в указанных работах позволяют снизить затраты на производство горных работ на многие годы за счет переноса наибольших капиталовложений на более поздние периоды, но не рассматривается дальнейшая отработка уже с учетом сформировавшихся условий, образуя-

щихся в результате реализации предложенных решений, которая может оказаться малоэффективной.

Вопросами уровня производственной мощности также занимаются иностранные исследователи. В работе [12] отмечается прямая зависимость производственной мощности от длины фронта работ и скорости годового подвигания. Зависимость подтверждается на примере одного из месторождений, для которого было рассмотрено несколько вариантов развития и выбран оптимальный.

При проработке вариантов, повышающих эффективность вскрытия, рассматриваются различные варианты типов выработок, мест заложения и их сроков службы. Автором работы [13] рассмотрены четыре группы факторов, определяющих схему вскрытия. В результате работы отмечено, что при выборе рационального варианта объектом исследования должна быть не только схема вскрытия, но и ее параметры, а ее экономическая оценка позволит выявить эффективность схемы вскрытия и принятых параметров, области применения тех или иных схем для рассматриваемых условий в течение интересующего периода.

Расположение выработки со стороны рабочего борта на угольных разрезах с дефицитом выработанного пространства для внутреннего отвалообразования и перераспределение части вскрышного грузопотока на ближайшие отвалы, используя при этом магистральный транспорт, позволяет сократить затраты на 25-30% [14]. Для эффективного применения таких решений требуется определение глубины заложения траншей и рациональная зона использования [15]. Использование такой схемы вскрытия подразумевает применение комбинации автомобильного и конвейерного транспорта. Но, несмотря на эффективность предлагаемых решений, их реализация наиболее целесообразна при наличии свободных площадей под строительство внешнего отвала со стороны рабочего борта.

Эффективность применения комбинированного транспорта также отмечена в работе [16], где в условиях сложного рельефа возникают проблемы в применении автомобильно-железнодорожного транспорта и наиболее целесообразным отмечена комбинация автомобильного и конвейерного транспорта, позволяющая снизить расстояние транспортирования автосамосвалами до перегрузочных пунктов и создать возможность разделения грузопотоков.

Порядок отработки определяется на первоначальных этапах проектирования и поддается изменению с серьезными финансовыми преградами, поэтому верно выбранный порядок отработки является одним из многих факторов, обеспечивающих эффективную отработку.

Учитывая прямую связь схемы вскрытия с порядком отработки месторождения, исследователи предлагают варианты блочной отработки карьерных полей для распределения грузопотоков. Авторами работ [17-19] изучены результаты применения блочного

способа отработки и определена зависимость размеров первого и последующих блоков. На основании зависимости составлен алгоритм определения размера блока, при котором появляется возможность размещать больше вскрышных пород во внутреннем отвале в сравнении с проектными решениями. Предложенные решения позволяют повысить коэффициент использования выработанного пространства и снизить количество площадей, занимаемых внешними отвалами.

Изменение порядка отработки и акцент на добыче более качественных углей позволяет повысить доходность предприятия и сохранить устойчивость разреза в кризисные периоды [20]. Но и такие решения должны быть приняты с учетом дальнейшего развития, так как изменение порядка отработки приводит к частичному изменению схемы вскрытия, и принимаемые решения не должны создавать еще более сложные условия для последующих периодов, а также исключить вероятность выборочной отработки месторождения.

Большое внимание ученые уделяют вопросам вскрытия и перехода на комбинированный способ разработки (открыто-подземный). Так, в работе [21] приведены требования к схеме вскрытия, которые должны быть учтены для реализации перехода на комбинированный способ отработки.

Авторы работы [22] рассматривают возможность сбалансированного развития открытой и подземной отработки, при которой обеспечивается полнота выемки ресурсов, повышение производительности без увеличения нагрузки на окружающую среду. Стоит также учитывать, что при комбинированном способе отработки немаловажным фактором является точное обоснование глубины разработки, при котором должно производиться вскрытие угольных пластов подземными горными выработками [23].

Схемы вскрытия и порядок отработки имеют прямую связь с вопросами отвалообразования, а именно распределение объемов вскрышных пород между внутренними и внешними отвалами с учетом уменьшения объема транспортной работы, эффективность использования выработанного пространства. В работах [24, 25] произведен анализ факторов, влияющих на эффективность внутреннего отвалообразования, и приведена классификация внутренних отвалов с учетом специфики их строительства. В итоге исследования отмечается значимость повышения эффективности освоения угольных месторождений за счет повышения вместимости внутренних отвалов.

Авторами работы [26] рассмотрено влияние схемы вскрытия породных горизонтов на сроки начала формирования внутреннего отвала и определен рациональный порядок их отработки, позволяющий использовать выработанное пространство на ранних этапах отработки. Поэтому необходимо предусматривать такие схемы вскрытия и порядок отработки, при которых в отработку вовлекаются все пласты, что

позволяет обеспечить предприятие выработанным пространством на ранних этапах эксплуатации.

В работе [27] авторами обоснована важность горно-геометрического анализа, на основании которого определено направленное развитие горных работ таким образом, при котором емкость внешнего отвала уменьшается на 47%, что позволяет снизить расстояние транспортирования и площади отчуждаемых земель.

Для определения мест заложения внутренних отвалов в работе [28] предложен гистограммный метод исследования, позволяющий по ряду критериев определить место складирования вскрышных пород, что позволит повысить эффективность отработки месторождений. Наиболее применим указанный подход для месторождений с пластами наклонного и крутого падения, где применяют углубочные системы разработки.

Доказано, что для снижения транспортной работы и соответствующего повышения эффективности транспортирования вскрышных пород следует не только располагать отвал на минимальном расстоянии, но и уделять внимание его форме, которая также оказывает влияние на транспортные затраты [29].

Неоспоримым фактом является то, что внутреннее отвалообразование имеет большую эффективность в сравнении с внешним, но условия ведения работ не всегда позволяют вести внутреннее образование. В таких условиях является эффективным использование выработанного пространства смежных отработанных участков (при их наличии) [30]. Данный способ позволяет снизить количество отчуждаемых земель под отвалы, а также появляется возможность ликвидации горных выработок прошлых лет, что положительно сказывается на экологической обстановке района ведения работ. Также применительно к углубочным системам разработки переход на поперечные системы позволяет в сжатые сроки обеспечить предприятие выработанным пространством, что особенно важно при дефиците площадей под отвалы [31, 32].

Нередки случаи дефицита площадей под отвалообразование. В таком случае возможно использование временных отвалов с точным определением сроков существования таких отвалов. Такое решение позволит уменьшить среднее расстояние транспортирования и наиболее эффективно перераспределять автосамосвалы между забоями [33].

Известны обрабатываемые месторождения, в результате эксплуатации которых выработанное пространство не заполняется полностью до уровня дневной поверхности вскрышными породами. Это связано с неравенством вынимаемого и складированного объемов (объем вскрышных пород в разы меньше объема полезного ископаемого). В связи с этим уделяется внимание таким понятиям, как техногенный ресурс и избыточное выработанное пространство [34, 35], а также возможности его использования. Авторами проведены исследования по определению техноген-

ного ресурса и закономерностям его формирования на различных предприятиях и предложены варианты его использования. Основываясь на упомянутых выше исследованиях по использованию избыточного внутреннего пространства, в работе [36] определена зависимость развития карьерного поля и внешнего отвала, на основании которой определена точка, при достижении которой заполнение избыточного выработанного пространства будет эффективным.

Кроме того, существуют примеры месторождений, когда, наоборот, невозможно разместить весь объем вскрышных пород в выработанном пространстве разреза. В таком случае важно определение момента, при котором возникает дефицит выработанного пространства [37]. Существуют классификации выработанного пространства, где классификационным признаком выбрана форма в профиле и предложено шесть вариантов классификаций. Используя предложенную классификацию, появляется возможность дать предварительную оценку вместимости выработанного пространства, тем самым понять, потребуется ли отчуждение земель под внешние отвалы и в каком количестве [38]. Работа [39] рассматривает зависимость эффективности освоения месторождения от затрат на отвалообразование и ликвидацию экологических последствий.

В итоге работ отмечено, что данному направлению не уделено достаточного внимания и следует более подробно планировать порядок отвалообразования с использованием математических методов. Авторами работ [40, 41] предложен один из методов планирования с применением программирования, в результате применения которого прогнозируется рост чистой прибыли предприятия.

Выводы

Проведенный анализ научных трудов о проблематике вскрытия, порядка отработки угольных месторождений открытым способом и ведения отвалообразования предлагает решение многих комплексных проблем при отработке угольных месторождений различного типа. Предложенные решения позволяют повысить эффективность освоения месторождений за счет изменения схем вскрытия и порядка отработки. Рассматриваются различные, наиболее эффективные варианты ведения отвальных работ, а также способы дальнейшего использования отвалов и выработанного пространства. Но данные подходы не имеют предложений по решению проблем отработки месторождений, имеющих следующие условия:

- отработка групп угольных пластов отдельными рабочими зонами и определение сроков вскрытия этих рабочих зон;
- различные скорости подвигания горных работ в отдельных рабочих зонах и определение скорости подвигания с учетом их взаимного развития;

– отсутствие или минимальное количество площадей для внешнего отвалообразования, при минимальном объеме выработанного пространства;

– наличие смежных лицензий других недропользователей.

Проведенный анализ подтверждает необходимость решения указанных проблем. Для решения выявленных недостатков необходимо обосновать порядок отработки и скорость подвигания горных работ для месторождений или их участков, отрабатываемых отдельными рабочими зонами в увязке с условием, что отвалообразование преимущественно будет осуществляться в выработанном пространстве.

Список источников

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году» / Тетенькин Д.Д., Петров Е.И. и др. М., 2022. С. 622.
2. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за 2022 год // Уголь. 2023. № 3. С. 21-33. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-21-33.
3. Мешков Г.Б., Петренко И.Е., Губанов Д.А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь. 2024. № 3. С. 18-29. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29.
4. Новак А.В. ТЭК России – надежность, устойчивость, развитие // Энергетическая политика. 2025. №1. С. 6-12. DOI: 10.46920/2409-5516_2025_01204_6.
5. Таланин В.В., Бехер В.Г., Казаков В.А. Особенности регулирования режима открытых горных работ в условиях волатильности рынка угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 5. С. 142–154. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_142.
6. Бурмистров К.В., Гавришев С.Е., Калмыков В.Н. Влияние схемы вскрытия на параметры горнотехнической системы при отработке жильных месторождений открытым способом // Современные достижения университетских научных школ: сборник докладов национальной научной школы-конференции, Магнитогорск, 19–20 ноября 2020 года. Вып. 5. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2020. С. 165-168. EDN QYMMFU.
7. Селюков А.В. О технологической значимости внутреннего отвалообразования при открытой разработке угольных месторождений Кемеровской области // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 5. С. 23-34. EDN UNXOIL.
8. Условия и проблемы разработки Бейского месторождения каменного угля / Косолапов А.И., Кисляков В.Е., Федотов А.С., Шварцкопф А.В. // Маркшейдерия и недропользование. 2025. Т. 9. №25(1). С. 25-29. <https://doi.org/10.56195/2079-3332-2025-25-1-25-29>.
9. Черских О.И. Стратегия и параметры развития горных работ на угольном разрезе // ГИАБ. 2016. №5. С. 392-400.
10. Холодников Д.Г., Логинов Е.В. Управление режимом горных работ и углом откоса рабочего борта карьера // ГИАБ. 2015. №2. С.71-74.
11. Григорьев С.Н., Моргунов И.В. Обоснование наиболее эффективного порядка ведения горных работ при разработке мультиморфных залежей средних размеров // ГИАБ. 2015. №2. С. 41-51.
12. Research on production capacity planning method of open-pit coal mine / Liu G., Guo W., Chai S. et al. // Sci Rep 13, 8676 (2023). Pp. 1-16.
13. Колесников В.Ф. Определяющие факторы схем вскрытия разрезов Кузбасса // ГИАБ. 1999. №6. С. 6-9.
14. Формирование схем вскрытия со стороны рабочих бортов карьеров, отрабатывающих угольные месторождения брахисинклинального типа / Супрун В.И., Радченко С.А., Левченко Я.В., Бурцев С.В., Минибаяев Р.Р. // Уголь. 2017. №8 (1097). С. 94-99.
15. Определение параметров и зон использования капитальных траншей, закладываемых со стороны рабочих бортов карьеров / Бурцев С.В., Матвеев А.В., Супрун В.И., Радченко С.А., Левченко Я.В. // Уголь. 2018. №3 (1104). С. 43-49.
16. Колесников В.Ф., Чикишев И.А. Особенности формирования грузопотоков на разрезах южного Кузбасса // Вестник КузГТУ. 2012. №4(92). С. 26-28.
17. Селюков А.В., Герасимов А.В. Проектирование параметров блокового способа открытой угледобычи с применением автотранспортной технологии // Вестник КузГТУ. 2024. №2. С. 68-78.
18. Селюков А.В., Герасимов А.В. Регулирование дисбаланса объемов отвалообразования при блоковом способе отработки карьерных полей угольных разрезов // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2024. №3. С. 313-328.
19. Селюков А.В., Герасимов А.В. Блоковый способ отработки карьерных полей как инструмент снижения воздействия на окружающую среду в условиях интенсификации производства // Известия ТПУ. 2024. №10. С. 178-188.
20. Канзычаков С.В. Обоснование направлений развития и режима горных работ на угольных разрезах в условиях изменчивой внешней среды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2013. № 10. 24 с.
21. Сенкус В.В., Абрамкин Н.И., Сенкус Вал В. Особенности вскрытия угольного месторождения при комбинированной отработке пластов // ГИАБ. 2018. №7. С.47-53.
22. Тюленева Т.А., Шишков Р.И. Совершенствование технологии вскрытия пологих угольных пластов с применением открыто-подземного способа // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. № 4(146). С. 96-110. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-4-96-110.
23. Сенкус Вал В., Малофеев Д.В., Абрамкин Н.И. Оптимизация глубины вскрытия разреза при комбинированной разработке угольного месторождения // ГИАБ. 2018. №6. С. 45-54.
24. Гаврилов В.Л., Ческидов В.И., Хоютанов Е.А. Условия и закономерности формирования внутренних отвалов при открытой разработке угольных месторождений брахисинклинального типа // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 6. С. 112-123. DOI: 10.15372/FTPRPI20220612.
25. Ческидов, В.И., Резник А.В. Особенности внутреннего отвалообразования вскрышных пород при откры-

- той разработке месторождений полезных ископаемых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. № 2. С. 61-68. DOI: 10.15372/FTPRPI20220206.
26. Ракишев Б.Р., Молдабаев С.К. Ресурсосберегающее вскрытие при вовлечении в разработку смежного участка карьерного поля // ГИАБ. 2009. №9. С. 196-209.
 27. Мартыанов В.Л., Колесников В.Ф. Обоснование рационального порядка разработки сложно-структурных угольных месторождений // Вестник КузГТУ. 2016. №6 (117). С. 73-81.
 28. Селюков А.В. Гистограммный способ определения местоположения емкости для внутреннего отвала при открытой угледобыче в Кемеровской области // Вестник МГТУ. 2016. №1-1. С. 40-46.
 29. Оконтуривание карьерных и отвальных полей на основе минимума транспортной работы по перемещению карьерных грузов / Бурцев С.В., Каранов Д.Н., Супрун В.И., Левченко Я.В. // Уголь. 2018. №6 (1107). С.33-39.
 30. Курехин Е.В. Технологические схемы отвалообразования вскрышных пород в карьерной выемке смежного участка // Известия ТПУ. 2017. №5. С. 67-82.
 31. Селюков А.В. Оценивание землеёмкости угольных разрезов видоизменением системы открытой разработки // Известия УГТУ. 2016. №3 (43). С. 82-86.
 32. Селюков А.В. О технологической значимости внутреннего отвалообразования при открытой разработке угольных месторождений Кемеровской области // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 5. С. 23-34.
 33. Литвин Я.О. Обоснование условий временного отвалообразования при поэтапном перемещении вскрышных пород карьерными автосамосвалами на разрезах Кузбасса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово: КузГТУ, 2011. 19 с.
 34. Еременко Е.В. Обоснование направления развития фронта горных работ на основе закономерностей формирования техногенного ресурса // Горная промышленность. 2016. №3 (127). С. 86-88.
 35. Овчинников Е.Н., Остапенко А.В. Инновационный подход управления техногенным ресурсом на предприятиях «СУЭК Красноярск» с применением беспилотника // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. №12. С. 275-277.
 36. Селюков А.В. Контурное развитие карьерного поля и внешнего отвала в задачах сокращения избыточного выработанного пространства разрезов с автотранспортной технологией // Вестник КузГТУ. 2016. №2 (114). С.7-13.
 37. Закономерности формирования отвальных массивов при отработке крупных угольных месторождений / Супрун В.И., Радченко С.А., Левченко Я.В., Ворошилин К.С., Минибаев Р.Р., Морозова Т.А. // Уголь. 2017. №7 (1096). С. 32-38.
 38. Селюков А.В. Выработанное пространство угольных разрезов: развитие классификационных признаков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2017. №3. С.12-17.
 39. Das Ranajit, Topal E., Mardaneh Elham. A review of open pit mine and waste dump schedule planning // Resources Policy. 2023, 85. 104064, pp. 1-8. 10.1016/j.resourpol.2023.104064.
 40. Li Yu, Topal E., Williams David. Waste rock dumping optimisation using mixed integer programming (MIP) // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2013, no. 27, pp. 425-436. 10.1080/17480930.2013.794513.
 41. Fu Zhao, Asad Mohammad, Topal E. A new model for open-pit production and waste-dump scheduling. Engineering Optimization. 2018, no. 51, pp. 1-15. 10.1080/0305215X.2018.1476501.

References

1. Tetenkin D.D., Petrov E.I., et al. State report "On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2021". Moscow, 2022, 622 p. (In Russ.)
2. Petrenko I.E. Results of the coal industry of Russia for 2022. *Ugol* [Coal], 2023;(3):21-33. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-3-21-33. (In Russ.)
3. Meshkov G.B., Petrenko I.E., Gubanov D.A. Results of the coal industry of Russia for 2023. *Ugol* [Coal], 2024;(3):18-29. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-3-18-29. (In Russ.)
4. Novak A.V. Russia's fuel and energy complex - reliability, sustainability, development. *Energeticheskaya politika* [Energy policy], 2025;(1):6-12. DOI: 10.46920/2409-5516_2025_01204_6. (In Russ.)
5. Talanin V.V., Bekher V.G., Kazakov V.A. Features of open-pit mining regulation in the context of coal market volatility. *GIAB* [Mining information and analytical bulletin], 2023;(5):142-154. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_142. (In Russ.)
6. Burmistrov K.V., Gavrishchev S.E., Kalmykov V.N. Influence of the opening scheme on the parameters of the mining and technical system during open-pit mining of lode deposits. *Sovremennye dostizheniya universitetskikh nauchnykh shkol: sbornik dokladov natsionalnoy nauchnoy shkoly-konferentsii* [Modern achievements of university scientific schools. Proceedings of the national scientific school-conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2020, vol. 5, pp. 165-168. EDN QYMMFU. (In Russ.)
7. Selyukov A.V. On the technological significance of internal waste dumping during open-pit mining of coal deposits in the Kemerovo region. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mineral development], 2015;(5):23-34. EDN UNXOIL. (In Russ.)
8. Kosolapov A.I., Kislyakov V.E., Fedotov A.S., Schwarzkopf A.V. Conditions and problems of development of the Beyskoye coal deposit. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine surveying and subsoil use], 2025;9(25(1)):25-29. <https://doi.org/10.56195/2079-3332-2025-25-1-25-29>. (In Russ.)
9. Cherskikh O.I. Strategy and parameters for the development of mining operations at a coal mine. *GIAB* [Mining information and analytical bulletin], 2016;(5):392-400. (In Russ.)
10. Kholodnyakov D.G., Loginov E.V. Management of the mining mode and the slope angle of the quarry working side. *GIAB* [Mining information and analytical bulletin], 2015;(2):71-74. (In Russ.)

11. Grigoriev S.N., Morgunov I.V. Justification of the most efficient order of mining operations in the development of medium-sized synclinal deposits. *GIAB* [Mining information and analytical bulletin], 2015;(2):41-51. (In Russ.)
12. Liu G., Guo W., Chai S. et al. Research on production capacity planning method of open-pit coal mine. *Sci Rep* 13. 8676, 1-16 (2023).
13. Kolesnikov V.F. Determining factors of open-pit mining schemes in Kuzbass. *GIAB* [Mining information and analytical bulletin], 1999;(6):6-9. (In Russ.)
14. Suprun V.I., Radchenko S.A., Levchenko Ya.V., Burtsev S.V., Minibaev R.R. Formation of opening schemes from the side of the working sides of quarries developing brachysynclinal coal deposits. *Ugol* [Coal], 2017;(8(1097)):94-99. (In Russ.)
15. Burtsev S.V., Matveyev A.V., Suprun V.I., Radchenko S.A., Levchenko Ya.V. Determination of parameters and zones of use of capital trenches laid from the side of the working sides of quarries. *Ugol* [Coal], 2018;(3(1104)):43-49. (In Russ.)
16. Kolesnikov V.F., Chikishev I.A. Features of the formation of freight flows in the open pits of southern Kuzbass. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of KuzSTU], 2012;(4(92)):26-28. (In Russ.)
17. Selyukov A.V., Gerasimov A.V. Design of parameters of the block method of open-pit coal mining using motor transport technology. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of KuzSTU], 2024;(2):68-78. (In Russ.)
18. Selyukov A.V., Gerasimov A.V. Regulation of the imbalance of waste formation volumes in the block method of mining quarry fields of coal open pits. *Izvestiya TulaGU. Nauki o Zemle* [Bulletin of Tula State University. Earth Sciences], 2024;(3):313-328. (In Russ.)
19. Selyukov A.V., Gerasimov A.V. Block method of quarry field development as a tool for reducing environmental impact in the context of production intensification. *Izvestiya TPU* [Bulletin of TPU], 2024;(10):178-188. (In Russ.)
20. Kanzhachakov S.V. Justification of development directions and mining mode in open-pit coal mines in a changing external environment. *GIAB (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal. Otdelnye stati (specialniy vypusk))* [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). Selected articles (special issue)], 2013;(10):24 p. (In Russ.)
21. Senkus V.V., Abramkin N.I., Senkus Val V. Features of coal deposit opening during combined seam mining. *GIAB* [Mining information and analytical bulletin], 2018;(7):47-53. (In Russ.)
22. Tyuleneva T.A., Shishkov R.I. Improving the technology of opening flat coal seams using the open-underground method. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2021;(4(146)):96-110. DOI: 10.26730 / 1999-4125-2021-4-96-110. (In Russ.)
23. Senkus Val V., Malofeev D.V., Abramkin N.I. Optimization of open pit coal mine depth limit in hybrid mining method. *GIAB* [Mining information and analytical bulletin], 2018;(6):45-54. (In Russ.)
24. Gavrilov V.L., Cheskidov V.I., Khoyutanov E.A. Conditions and patterns of formation of internal dumps during open pit mining of brachysynclinal coal deposits. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mineral development], 2022;(6):112-123. DOI: 10.15372/FTPRI20220612. (In Russ.)
25. Cheskidov V.I., Reznik A.V. Features of internal dump formation of overburden rocks during open pit mining of mineral deposits. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mineral development], 2022;(2):61-68. DOI: 10.15372/FTPRI20220206. (In Russ.)
26. Rakishev B.R., Moldabaev S.K. Resource-saving strip mining when involving an adjacent section of a quarry field in development. *GIAB* [Mining information and analytical bulletin], 2009;(9):196-209. (In Russ.)
27. Martyanov V.L., Kolesnikov V.F. Justification of a rational order of development of complex-structured coal deposits. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of KuzSTU], 2016;(6(117)):73-81. (In Russ.)
28. Selyukov A.V. Histogram method for determining the location of the internal dump tank during open-pit coal mining in the Kemerovo region. *Vestnik MGTU* [Bulletin of Moscow State Technical University], 2016;(1-1):40-46. (In Russ.)
29. Burtsev S.V., Karanov D.N., Suprun V.I., Levchenko Ya.V. Contouring of quarry and waste fields based on minimum transport work for moving quarry cargo. *Ugol* [Coal], 2018;(6(1107)):33-39. (In Russ.)
30. Kuryokhin E.V. Justification of the technology of waste rock dumping by a dragline in the open pit of an adjacent area. *GIAB* [Mining information and analytical bulletin], 2015;(S1-1):519-535. (In Russ.)
31. Selyukov A.V. Estimation of the earth capacity of coal mines by modifying the open-pit mining system. *Izvestiya UGGU* [Bulletin of the Ural State Mining University], 2016;(3(43)):82-86. (In Russ.)
32. Selyukov A.V. On the technological significance of internal waste dumping during open-pit mining of coal deposits in the Kemerovo region. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mineral development], 2015;(5):23-34. (In Russ.)
33. Litvin Ya.O. Obosnovanie usloviy vremennogo otvalobrazovaniya pri po etapnom peremeshchenii vskryshnykh porod karernymi avtosamosvalami na razrezakh Kuzbassa: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Justification of the conditions of temporary dumping during the stage-by-stage movement of overburden rocks by quarry dump trucks in the open pits of Kuzbass. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Kemerovo: KuzGTU, 2011, 19 p.
34. Eremenko E.V. Justification of the direction of development of the mining front based on the patterns of formation of the technogenic resource. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry], 2016;(3(127)):86-88. (In Russ.)
35. Ovchinnikov E.N., Ostapenko A.V. Innovative approach to managing the technogenic resource at the enterprises of SUEK Krasnoyarsk using a drone. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Current issues of aviation and cosmonautics], 2016;(12):275-277. (In Russ.)
36. Selyukov A.V. Contour development of a quarry field and external dump in the problems of reducing excess mined-out space in open pits with motor transport tech-

- nology. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of KuzSTU], 2016;(2(114)):7-13. (In Russ.)
37. Suprun V.I., Radchenko S.A., Levchenko Ya.V., Voroshilin K.S., Minibaev R.R., Morozova T.A. Regularities in the formation of waste mass during the development of large coal deposits. *Ugol* [Coal], 2017;(7(1096)):32-38. (In Russ.)
38. Selyukov A.V. Mined-out space of coal open pits: development of classification features. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017;(3):12-17. (In Russ.)
39. Das Ranajit, Topal E., Mardaneh Elham. A review of open pit mine and waste dump schedule planning. *Resources Policy*. 2023;85:104064. 10.1016/j.resourpol.2023.104064.
40. Li Yu, Topal E., Williams David. Waste rock dumping optimization using mixed integer programming (MIP). *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2013;27:425-436. 10.1080/17480930.2013.794513.
41. Fu Zhao, Asad Mohammad, Topal E. A new model for open-pit production and waste-dump scheduling. *Engineering Optimization*. 2018;51:1-15. 10.1080/0305215X.2018.1476501.

Поступила 28.02.2025; принята к публикации 08.05.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 28/02/2025; revised 08/05/2025; published 30/09/2025

Кисляков Виктор Евгеньевич – доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры открытых горных работ,
СФУ «Институт цветных металлов», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

Шварцкопф Андрей Валериевич – аспирант,
СФУ «Институт цветных металлов», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.

Федотов Артем Сергеевич – аспирант,
СФУ «Институт цветных металлов», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: ar.fedotow@yandex.ru. ORCID 0009-0005-9552-2956.

Viktor E. Kislyakov – DrSc(Eng.), Professor, Professor of the Department of Open Pit Mining,
SFU “Institute of Non-Ferrous Metals”, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Andrey V. Shwartskopf – Postgraduate Student,
SFU “Institute of Non-Ferrous Metals”, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Artem S. Fedotov – Postgraduate Student,
SFU “Institute of Non-Ferrous Metals”, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: ar.fedotow@yandex.ru. ORCID 0009-0005-9552-2956



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

УДК 622.22

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-26-33

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ НА СРОК БЕЗАВАРИЙНОЙ СЛУЖБЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

Иванов А.Г.¹, Арсентьев Ю.А.², Вильмис А.Л.², Салахова К.Н.², Орехов Д.Д.²

¹АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии», Москва, Россия

²Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания требует применения полимерных обсадных труб, срок эксплуатации которых определяет эффективность технологических скважин. Высокая стоимость сооружения скважин (40–70% от стоимости добытого урана) делает выбор их конструкции критически важным. Однако полимерные трубы подвержены ускоренному старению и имеют высокий коэффициент линейного расширения, что вызывает риски их разрушения.

Цель работы. Обоснование факторов, влияющих на надежность и долговечность полимерных обсадных труб, применяемых при сооружении технологических скважин для добычи урана методом скважинного подземного выщелачивания, и разработка рекомендации по минимизации рисков их разрушения для обеспечения безаварийной эксплуатации скважин в течение проектного срока. **Используемые методы.** Проведен анализ факторов, влияющих на надежность полимерных труб: условия хранения, кольцевое напряжение в стенке трубы, вызванное гидравлическим давлением, замерзанием воды в заколонном пространстве и использованием расширяющихся тампонажных материалов. Определены классификации нагрузок и видов разрушений труб и зависимость их длительной прочности от времени хранения и эксплуатации. **Новизна.** Определен комплекс факторов, влияющих на надежность и долговечность обсадных труб для скважинного подземного выщелачивания, а также установлены зависимости их длительной прочности от продолжительности срока отдельных этапов производственного цикла. **Результаты.** Установлено, что кольцевое напряжение в трубах снижается со временем, а длительное хранение (свыше 6 месяцев на открытых площадках) существенно ухудшает их прочность. Приведены примеры разрушений: вертикальные трещины, выколы и смятие труб под действием внешних нагрузок. Показано, что соблюдение условия (кольцевое напряжение \leq длительная прочность) гарантирует безаварийную эксплуатацию скважин в течение проектного срока. **Практическая значимость.** Установлено, что для обеспечения надежности скважин необходимо применять трубы, соответствующие стандартам, с контролем их качества через аттестованные лаборатории.

Ключевые слова: технологические скважины, полимерные обсадные трубы, кольцевая прочность полимерных материалов, сроки хранения и эксплуатации полимерных труб, расчет конструкции скважин, критическое напряжение, скважинное выщелачивание урана, непластифицированный поливинилхлорид, нарушения целостности эксплуатационной колонны, увеличение безаварийного срока работы скважин

© Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Вильмис А.Л., Салахова К.Н., Орехов Д.Д., 2025

Для цитирования

Влияние фактора времени на срок безаварийной службы технологических скважин подземного выщелачивания урана / Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Вильмис А.Л., Салахова К.Н., Орехов Д.Д. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 26-33. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-26-33>



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

INFLUENCE OF TIME FACTOR ON FAILURE-FREE SERVICE LIFE OF TECHNOLOGICAL WELLS OF IN-SITU URANIUM LEACHING

Ivanov A.G.¹, Arsentiev Yu.A.², Vilmis A.L.², Salakhova K.N.², Orekhov D.D.²

¹Design & Survey and Research & Development Institute of Industrial Technology, Moscow, Russia

²Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

Abstract. Problem statement (Relevance). Uranium mining by in-situ leaching (ISL) requires the use of polymer casing pipes, the service life of which determines the efficiency of technological wells. The high cost of well construction (40-70% of the cost of extracted uranium) makes the choice of their design critical. However, polymer pipes are subject to accelerated aging and have a high coefficient of linear expansion, which causes risks of their destruction. **Objectives.** To substantiate the factors influencing the reliability and durability of polymer casing pipes used in the construction of technological wells for uranium mining by in-situ leaching, and to develop recommendations to minimize the risks of their destruction to ensure trouble-free operation of wells during the design period. **Methods Applied.** The factors influencing the reliability of polymer pipes were analyzed: storage conditions, annular stress in the pipe wall caused by hydraulic pressure, freezing of water in the borehole space and use of expanding plugging materials. Classification of loads and types of pipe failures and dependence of their long-term strength on the time of storage and operation are determined. **Originality.** The complex of factors influencing reliability and durability of casing pipes for downhole in-situ leaching is determined, and also dependences of their long-term durability on duration of time of separate stages of production cycle are established. **Results.** It is established that the annular stress in pipes decreases with time, and long-term storage (more than 6 months at open sites) significantly deteriorates their strength. Examples of failures are given: vertical cracks, punctures and buckling of pipes under the action of external loads. It is shown that observance of the condition (annular stress \leq long-term strength) guarantees accident-free operation of wells during the design period. **Practical Relevance.** We have established that in order to ensure the reliability of wells it is necessary to use pipes that comply with standards, with control of their quality through certified laboratories.

Keywords: technological wells, polymer casing pipes, annular strength of polymer materials, storage and operation terms of polymer pipes, well design calculation, critical stress, in-situ uranium leaching, unplasticized PVC, integrity violations of the production string, increase of accident-free operation term of wells

For citation

Ivanov A.G., Arsentiev Yu.A., Vilmis A.L., Salakhova K.N., Orekhov D.D. Influence of Time Factor on Failure-Free Service Life of Technological Wells of In-Situ Uranium Leaching. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 26-33. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-26-33>

Введение

Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ) растворами кислот требует применения полимерных обсадных труб для оборудования ими технологических скважин [1, 2]. Технологические скважины выполняют роль добычных выработок: по нагнетательным – в продуктивный водоносный горизонт подают выщелачивающие растворы (ВР), а по откачным – на поверхность извлекают продуктивные растворы (ПР), содержащие растворенный металл [3, 4]. В зависимости от горно-геологических условий конкретного месторождения стоимость работ по сооружению скважин составляет от 40 до 70% от стоимости добытого урана [5, 6]. В связи с этим выбор конструкции скважины является весьма ответственным моментом, определяющим период ее эксплуатации.

Особенности условий применения различных видов обсадных труб для оборудования ствола технологической скважины СПВ-урана, включая условия

месторождений, расположенных в криолитозоне, были обозначены в публикациях [7, 8].

Материалы и методы исследования

Предлагаемая к реализации конструкция скважины должна обеспечивать ее безаварийную работу вплоть до окончания срока эксплуатации, включая период выполнения ремонтно-восстановительных работ (РВР), необходимых для поддержания ее проектной (плановой) производительности [1, 9]. При этом следует учитывать, что для формирования эксплуатационной колонны используют полимерные обсадные трубы, которые по сравнению с металлическими трубами имеют высокую скорость старения (рис. 1). Кроме того, они обладают большим коэффициентом линейного расширения α по сравнению с используемыми материалами гидроизоляции колонного пространства (цементным раствором). Так, например, для НПВХ $\alpha = 0,00006$ ед./°С, а для цементного камня $\alpha = 0,00001$ ед./°С.

Основными факторами, определяющими надежность эксплуатационной колонны полимерных обсадных труб, являются условия и длительность их хранения, а также величина кольцевого напряжения в стенке обсадной трубы на стадии сооружения скважины [10, 11]. Условия хранения регламентируются государственными стандартами. Гарантийный срок хранения с даты изготовления для труб специального назначения (к ним относятся обсадные трубы технологических скважин СПВ-урана) составляет 2 года при продолжительности хранения на открытых площадках за этот период не более 6 месяцев (ГОСТ Р 32415 – 2013). Для скважин глубиной до 100 м гарантийный срок хранения составляет 5 лет (ГОСТ Р 71415 – 2024). Этими документами предписаны виды испытаний обсадных труб и их периодичность. Для выполнения указанных работ каждое предприятие-изготовитель трубной продукции обязано располагать аттестованной лабораторией [12, 13].

Все уранодобывающие предприятия в мире применяют обсадные трубы НПВХ, максимально подходящие по своим физико-механическим свойствам практически для любых горно-геологических условий добычи [14]. Основным оценочным параметром, характеризующим длительную прочность поверхности эксплуатационной колонны полимерных обсадных труб, является кольцевое напряжение, величина которого с течением времени снижается по мере хранения и эксплуатации технологической скважины. Зависимость кольцевого напряжения в стенке обсадной трубы от продолжительности хранения и эксплуатации технологической скважины с учетом температуры приведена на **рис. 1**.

Кольцевое напряжение в стенке обсадной трубы в процессе сооружения технологической скважины возникает по следующим причинам:

- из-за потери осевой устойчивости эксплуатационной колонны [15, 16];
- под воздействием гидравлического столба жидкости в заколонном пространстве (промысловая жидкость, цементный раствор и пр.) [17];
- в результате применения для целей гидроизоляции заколонного пространства расширяющихся тампонажных или инертных материалов;
- при замерзании в заколонном пространстве в интервале криолитозоны воды деятельного слоя или пластовых вод, вышележащего над продуктивным водоносным горизонтом.

Поэтому при выборе конструкции скважины, технологии ее сооружения, длительности хранения, температуры вмещающих горных пород и пр. следует принимать технологические решения в соответствии с вышеуказанными причинами. Из приведенного следу-

ет, что чем ниже в стенке трубы кольцевое напряжение на стадии сооружения скважины, тем больше будет продолжительность срока ее эксплуатации [18, 19].

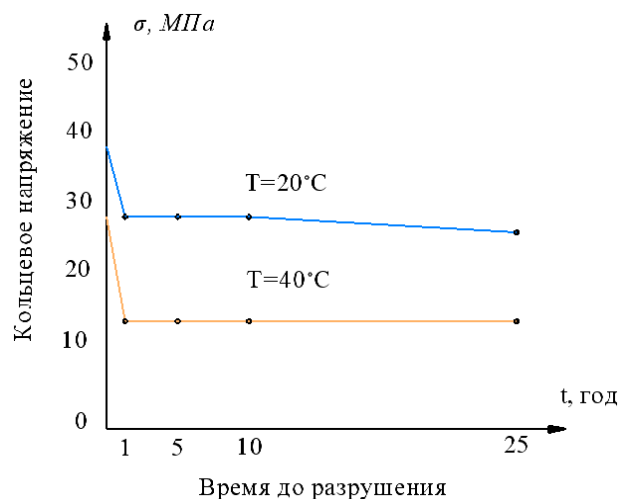


Рис. 1. Зависимость кольцевого напряжения в стенке обсадной трубы от продолжительности хранения и эксплуатации технологической скважины с учетом температуры

Fig. 1. Dependence of the annular stress in the casing wall on the duration of storage and operation of the process well, taking into account the temperature

Важнейшим условием правильного обоснования принимаемых решений является учет нагрузок, действующих на эксплуатационную колонну обсадных труб, при сооружении, проведении РВР и эксплуатации технологической скважины [20, 21]. Представление о видах внешних нагрузок можно получить, изучая разработанную с участием авторов статьи классификацию, приведенную на **рис. 2**.

Результатом действия вышеуказанных видов внешних нагрузок является целый ряд возможных нарушений целостности боковой поверхности эксплуатационной колонны обсадных труб, который представлен в виде классификации на **рис. 3** [22].

На **рис. 4** приведены фотографии различных видов нарушения целостности полимерных обсадных труб, полученные при проведении видеокаротажа в эксплуатационных колоннах технологических скважин СПВ-урана.

Полученные результаты и их обсуждение

На **рис. 5** показана зависимость длительной прочности обсадных труб от продолжительности срока отдельных этапов производственного цикла: хранения, применения и эксплуатации полимерных обсадных труб [23, 24].



Рис. 2. Классификация нагрузок, действующих на эксплуатационную колонну технологической скважины СПВ-урана

Fig. 2. Classification of loads influencing the production string of the technological well of uranium ISL

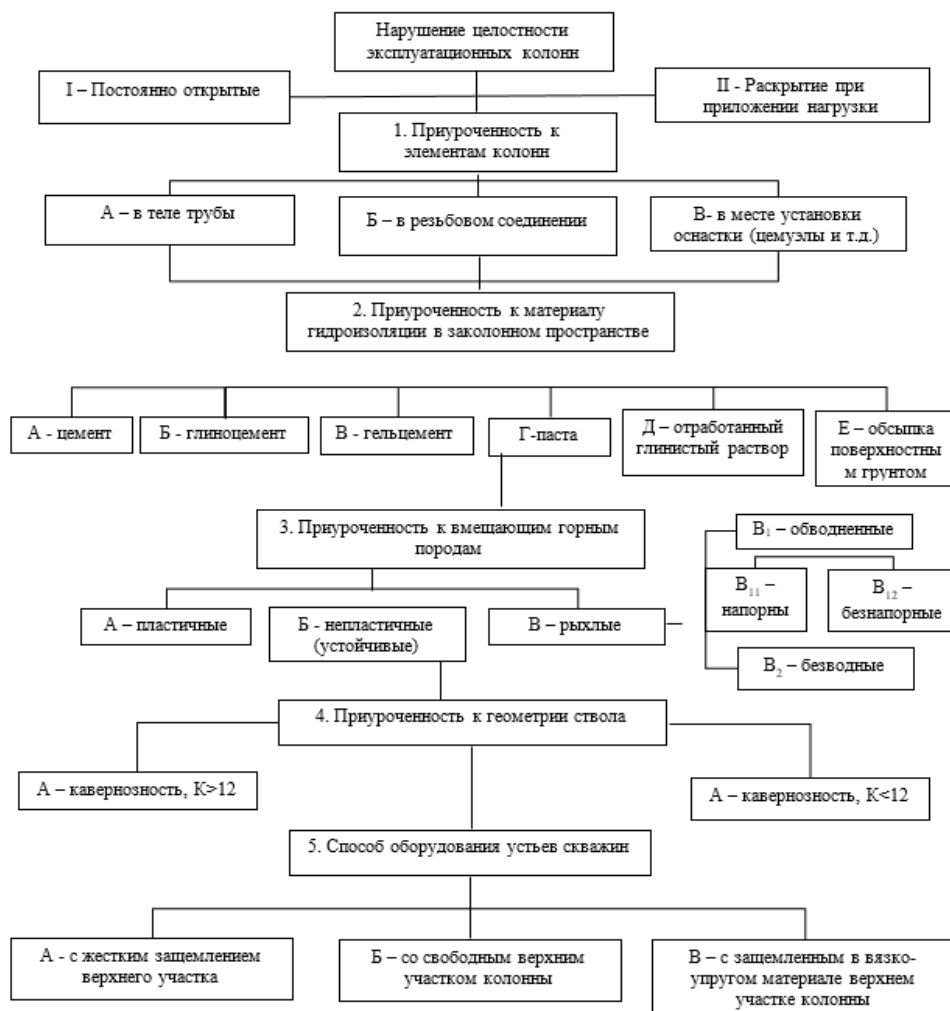


Рис. 3. Классификация видов нарушения целостности эксплуатационной колонны обсадных труб технологической скважины СПВ-урана

Fig. 3. Classification of types of violation of the integrity of the production casing string of the technological well of uranium ISL

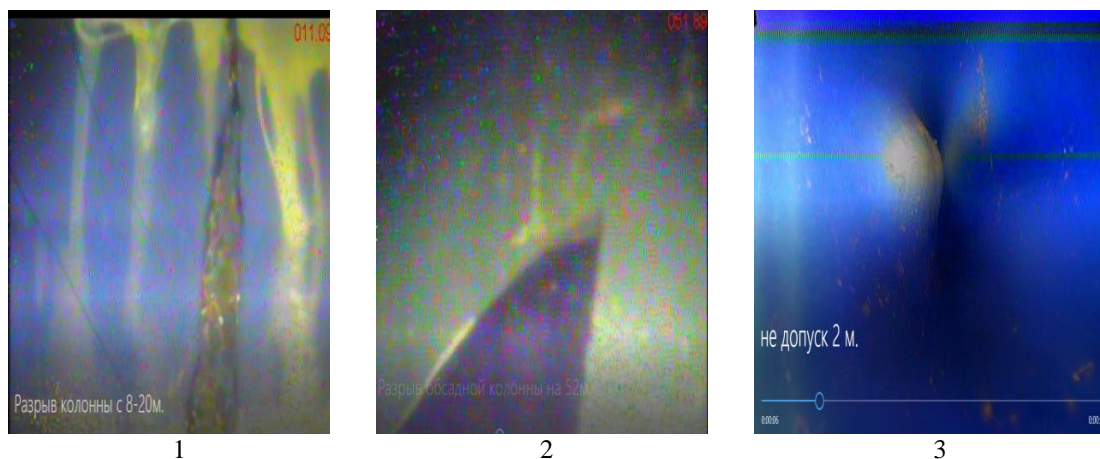


Рис. 4. Примеры разрушения боковой поверхности колонны полимерных обсадных труб на стадии эксплуатации технологической скважины: 1 – вертикальная трещина в двух трубах общей длиной 12 м; 2 – выкол в трубе под действием наружного кольцевого напряжения; 3 – смятие трубы под действием наружного кольцевого напряжения, вызванного замерзанием воды

Fig. 4. Examples of destruction of the lateral surface of the string of polymer casing pipes at the stage of operation of a technological well: 1 is vertical crack in 2 pipes with a total length of 12 m; 2 is puncture in the pipe under external annular stress; 3 is pipe collapse under external annular stress caused by freezing of water

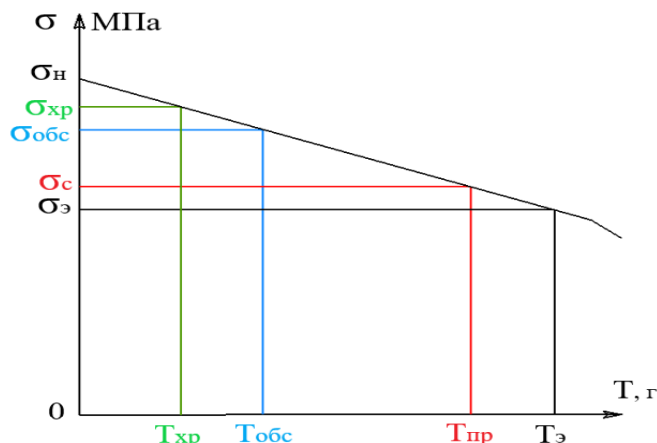


Рис. 5. График зависимости длительной прочности полимерных труб от времени: σ – длительная прочность обсадной трубы; σ_n – начальная величина после изготовления обсадной трубы; $\sigma_{хр}$ – величина на момент окончания хранения обсадной трубы; $\sigma_{обс}$ – величина на момент окончания работ по оборудованию скважины эксплуатационной колонной; σ_c – кольцевое напряжение, возникающее в стенке трубы по достижении разрушающего напряжения; $\sigma_э$ – величина на момент окончания эксплуатации скважины; T – продолжительность хранения / эксплуатации обсадной трубы; $T_{хр}$ – продолжительность хранения; $T_{обс}$ – продолжительность до окончания работ по оборудованию скважины эксплуатационной колонной; $T_{пр}$ – предельный срок службы скважины; $T_э$ – плановый срок вывода скважины из эксплуатации

Fig. 5. Graph of the dependence of the long-term strength of polymer pipes on time: σ is the long-term strength of the casing; σ_n is the initial value after the manufacture of the casing; $\sigma_{хр}$ is the value at the end of storage of the casing; $\sigma_{обс}$ is the value at the end of work on equipping the well with production string; σ_c is the annular stress occurring in the wall upon reaching the destructive stress; $\sigma_э$ is the value at the time of the end of well operation; T is the duration of storage / operation of the casing pipe; $T_{хр}$ is the duration of storage; $T_{обс}$ is the duration until the completion of work on equipping the well with production string; $T_{пр}$ is the maximum service life of the well; $T_э$ is the planned period for decommissioning the well

Из приведенного на рис. 5 графика следует, что длительный срок хранения полимерных обсадных труб $T_{хр}$ приводит к существенному снижению длительной прочности к моменту применения их по назначению. На стадии сооружения технологической

скважины в стенке обсадной трубы должно сформироваться кольцевое напряжение, соответствующее условию целостности боковой поверхности эксплуатационной колонны обсадных труб [25]: $\sigma_c \leq \sigma_э$.

При выполнении этого условия будет обеспечена безаварийная эксплуатация технологической скважины до окончания срока отработки добычной единицы: блока, залежи, участка.

Заключение

Выполненный анализ позволяет сделать следующий основной вывод:

- достижение проектного срока эксплуатации возможно только при применении качественных полимерных труб, соответствующих по своим свойствам требованиям нормативных документов, условиям и срокам хранения, прошедших проверку с определенной периодичностью, выпущенных предприятием-изготовителем, имеющим в своей структуре аттестованную лабораторию;
- применение полимерных труб, не отвечающих вышеперечисленным требованиям и не имеющих маркировку должно быть исключено.

Список источников

1. О расчете эксплуатационных колонн из полимерных материалов для условий многолетнемерзлых пород / Арсентьев Ю.А., Назаров А.П., Забайкин Ю.В., Иванов А.Г. // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики. Российский и зарубежный опыт. Научное обозрение. 2019. С. 27–32.
2. Солодов И.Н., Камнев Е.Н. Геотехнология урана (российский опыт): монография. М.: КДУ; Университетская книга, 2017. 576 с.
3. Uranium speciation and in situ leaching of a sandstone-type deposit from China / Ma Q., Feng Z. G., Liu P., Lin X. K., Li Z. G., Chen M. S. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2017, vol. 311, pp. 2129–2134.
4. Evaluation of Annular Pressure Losses while Casing Drilling. / Dokhani V., Shahri P., Karimi M., Saeed S. // Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA, September 2013. <https://doi.org/10.2118/166103-MS>
5. API Standard 13B-2. Recommended Practice for Cementing of Oil and Gas Wells. 2019. 134 с.
6. Солодова И.Н. Добыча урана подземным выщелачиванием в криолитозоне / под ред. Солодова И.Н. М.: ZetaPrint, 2022. 183 с.
7. Thermal elasto-plastic computation model for a buried oil pipeline in frozen ground / Zhi W., Yu S., Huijin J., Shuangyang L., Guoyu L., Yonghong N. // Cold Regions Science and Technology. 2010, vol. 64, is. 3, pp. 248–255.
8. Иванов А.Г. Анализ целесообразности применения полимерных обсадных труб из различных полимерных материалов для оборудования технологических скважин подземного выщелачивания урана // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30. №4. С. 71–79.
9. ISO 13628-11. Petroleum and Natural Gas Industries – Design and Operation of Subsea Production Systems. 2020. 15 с.
10. Wenjun H., Deli G. A theoretical study of the critical external pressure for casing collapse // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2015, vol. 27, part 1, pp. 290–297.
11. Физико-химическая геотехнология / Арнс В.Ж., Богуславский Э.И., Гридин О.М., Крейнин Е.В., Небера В.П., Рыспанов Н.Б., Фазлуллин М.И., Хрулев А.С., Хчян Г.Х., Шумилова Л.В. М.: Горная книга, 2021. 816 с.
12. Бурение и оборудование геотехнологических скважин / Сергиенко И.А., Мосев А.Ф., Бочко Э.А., Пименов М.К. М.: Недра, 1984. 224 с.
13. Short-term HDPE pipe degradation upon exposure to aggressive environments/ Alimi L., Chaoui K., Ghabeche W., Chaoui W. // Matériaux & Techniques, 2013, 101 7, 701.
14. Slow crack growth and failure induced by manufacturing defects in HDPE-tubes / Schouwenaars R., Jacobo V., Ramos E., Ortiz A. // Engineering Failure Analysis. 2007, vol. 14, is. 6, pp. 1124–1134.
15. Сащенко А.В. Эволюция соединений урана на месторождениях базальных палеодолин и особенности их извлечения способом СПВ: автореф. дис... канд. геол.-минерал. наук: 1.6.10. М., 2024. 23 с.
16. Mechanical behaviour of machined polyethylene filaments subjected to aggressive chemical environments / Souhila R., Wafia K., Mounia K., Chaoui K. // Mechanika. 2018, no. 77, pp. 40–46.
17. Сабитгулин А.А. Сравнительный анализ изменения температур продуктивных растворов при скважинном подземном выщелачивании урана на месторождении «Хиагда» // Физико-химическая геотехнология: инновации и тенденции развития: сборник материалов международной научно-практической конференции. Чита: ЗабГУ, 2021. С. 34–37.
18. Железняк И.И., Стетюха В.А. Расчёт трубы из полимерного материала под действием внешней нагрузки в скважине в массиве многолетнемерзлых пород // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. №3. С. 121–125.
19. Отставнов А.А. О высокоэффективных напорных трубах из ПВХ последнего поколения // Санитарная техника, отопление, канализация. 2019. № 2. С. 16–21.
20. Сушко С.М., Асанов Н.С., Карманов Т.Д. Метод гидроизоляции затрубного пространства при сооружении геотехнологических скважин для подземного выщелачивания продуктивного горизонта // Международный журнал экспериментального образования. 2013. № 11. С. 118–122.
21. Singh Integrated Drilling Optimization Approach Delivers Rxelet Resurs to Improve Drilling Efficiency in Remote Artificial Island / Paila P., Kirby C., Diaz N., Aboulkhair A., Mfhmoud D., Al Kindi R., Kasem Y., Benygzer M., Moreira R., Gesettim M. // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition conference. Abu Dhabi, UAE. 2018, pp. 70–75.
22. Акутин М.С., Тихонов Н.Н., Платонов М.П. Новые композиционные материалы с улучшенной прочностью и стабильными характеристиками в процессе эксплуатации // XIV Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: в 2 т. М.: Наука, 1989. Т. 2. С. 7–14.
23. Зубарев А.Б. Условия работы, обоснование конструкции и технология применения полиэтиленовых обсадных колонн для крепления технологических скважин подземного выщелачивания металлов: автореф. дис... канд. техн. наук. М.: МГРИ, 1983. 24 с.

24. Бурение и оборудование геотехнологических скважин / Сергиенко И.А., Мосев А.Ф., Бочко Э.А., Пименов М.К. М.: Недра, 1984. 224 с.
25. Шалбаев Ж.С. Разработка методики применения альтернативного материала для гидроизоляции затрубного пространства при сооружении скважин // Развитие урановой и редкометалльной промышленности: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. Алматы, 2024. С. 72–74.

References

1. Arsentiev Yu.A., Nazarov A.P., Zabaikin Yu.V., Ivanov A.G. On the calculation of production strings from polymeric materials for the conditions of permafrost rocks. *Aktualnye problemy i perspektivy razvitiya ekonomiki. Rossiyskiy i zarubezhniy opyt. Nauchnoe obozrenie* [Current issues and prospects of economic development. Russian and foreign experience. Scientific Review], 2019:27-32. (In Russ.)
2. Solodov I.N., Kamnev E.N. *Geotekhnologiya urana (rossiyskiy opyt): monografiya* [Uranium geotechnology (Russian experience). Monograph]. Moscow: KDU, University Book, 2017, 576 p. (In Russ.)
3. Ma Q., Feng Z.G., Liu P., Lin X.K., Li Z.G., Chen M.S. Uranium speciation and in situ leaching of a sandstone-type deposit from China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2017;311:2129-2134.
4. Dokhani V., Shahri P., Karimi M., Saeed S. Evaluation of Annular Pressure Losses while Casing Drilling. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. (2013). <https://doi.org/10.2118/166103-MS>
5. API Standard 13B-2. Recommended Practice for Cementing of Oil and Gas Wells. 2019. 134 p.
6. Solodova I.N. Dobycha urana podzemnym vyshchelachivaniem v kriolitozone [Uranium mining by in-situ leaching in cryolithozone]. Moscow: ZetaPrint, 2022, 183 p. (In Russ.)
7. Zhi W., Yu S., Huijin J., Shuangyang L., Guoyu L., Yonghong N. Thermal elasto-plastic computation model for a buried oil pipeline in frozen ground. *Cold Regions Science and Technology*. 2010;64(3):248-255.
8. Ivanov A.G. Analysis of expediency of application of polymer casing pipes from different polymer materials for equipment of technological wells of uranium in-situ leaching. *Vestnik Zabaikalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Transbaikalian State University], 2024;30(4):71-79. (In Russ.)
9. ISO 13628-11. Petroleum and Natural Gas Industries - Design and Operation of Subsea Production Systems. 2020. 15 p.
10. Wenjun H., Deli G., A theoretical study of the critical external pressure for casing col-lapse. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015;27(1):290-297.
11. Arens V.J., Boguslavskiy E.I., Gridin O.M., Kreinin E.V., Nebera V.P., Ryspanov N.B., Fazlullin M.I., Khurlev A.S., Hcheyan G.H., Shumilova L.V. *Fiziko-khimicheskaya geotekhnologiya* [Physico-chemical geotechnology]. Moscow: Gornaya Kniga, 2021, 816 p. (In Russ.)
12. Sergienko I.A., Moshev A.F., Bochko E.A., Pimenov M.K. *Burenie i oborudovanie geotekhnologicheskikh skvazhin* [Drilling and equipment of geotechnological wells]. Moscow: Nedra, 1984, 224 p. (In Russ.)
13. Alimi L., Chaoui K., Ghabeche W., Chaoui W. Short-term HDPE pipe degradation upon exposure to aggressive environments. *Matériaux & Techniques*. 2013;101 7:701.
14. Schouwenaars R., Jacobo V., Ramos E., Ortiz A. Slow crack growth and failure induced by manufacturing defects in HDPE-tubes. *Engineering Failure Analysis*. 2007;14(6):1124-1134.
15. Sashchenko A.V. *Evolutsiya soedineniy urana na mestorozhdeniyah bazal'nykh paleodolin i osobennosti ih izvlecheniya sposobom SPV: avtoreferat dis... kand. geol.-mineral. nauk* [Evolution of uranium compounds on deposits of basal paleodolines and peculiarities of their extraction by the SPV method. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 2024, 23 p.
16. Souhila R., Wafia K., Mounia K., Chaoui K. Mechanical behaviour of machined polyethylene filaments subjected to aggressive chemical environments. *Mechanika*. 2018;77:40-46.
17. Sabigatulin A.A. Comparative analysis of temperature changes in productive solutions during in-situ leaching of uranium at the deposit "Khiagda". *Fiziko-khimicheskaya geotekhnologiya: innovatsii i tendentsii razvitiya: sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Physical and chemical geotechnology: innovations and development trends. Proceedings of the international scientific and practical conference]. Chita: ZabGU, 2021, pp. 34-37. (In Russ.)
18. Zheleznyak I.I., Stetyukha V.A. Calculation of polymer pipe under external load in a borehole in a mass of perennially frozen rocks. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], 2018;(3):121-125. (In Russ.)
19. Otstavnov A.A. About the high-performance pressure pipes from PVC of the last generation. *Sanitarnaya tekhnika, otoplenie, kanalizatsiya* [Sanitary equipment, heating, sewerage], 2019;(2):16-21. (In Russ.)
20. Sushko S. M., Asanov N. S., Karmanov T. D. Method of waterproofing of the annular space in the construction of geotechnological wells for in-situ leaching of the productive horizon. *Mezhdunarodniy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya* [International Journal of Experimental Education], 2013;(11):118-122. (In Russ.)
21. Paila P., Kirby C., Diaz N., Aboulkhair A., Mfhamoud D., Al Kindi R., Kasem Y., Benygzer M., Moreira R., Geset M. Singh Integrated Drilling Optimization Approach Delivers Rxelet Resurs to Improve Drilling Efficiency in Remote Artificial Island. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition conference. 2018:70-75.
22. Akutin M.S., Tikhonov N.N., Platonov M.P. New composite materials with improved strength and stable characteristics during operation. *XIV Mendelevskiy sezd po obshchey i prikladnoy khimii* [XIV Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry]. Moscow: Nauka, 1989, vol. 2, pp. 7-14. (In Russ.)
23. Zubarev A.B. *Usloviya raboty, obosnovanie konstruktivnykh i tekhnologicheskikh skvazhin podzemnogo vyshchelachivaniya metallov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Working conditions, design substantiation and technology of polyethylene casing strings application for fastening of technological wells of the in-situ metal leaching. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 1983, 24 p.

24. Sergienko I.A., Mosev A.F., Bochko E.A., Pimenov M.K. Burenie i oborudovanie geotekhnologicheskikh skvazhin [Drilling and equipment of geotechnological wells]. Moscow: Nedra, 1984, 224 p. (In Russ.)
25. Shalbaev Zh.S. Development of methodology of application of alternative material for waterproofing of annular space during well construction. *Razvitiye uranovoy i redkometal'noy promyshlennosti: materialy XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf* [Development of uranium and rare-metal industry. Proceedings of XI International scientific and practical conference]. Almaty, 2024, pp. 72-74. (In Russ.)

Поступила 17.04.2025; принята к публикации 19.05.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 17/04/2025; revised 19/05/2025; published 30/09/2025

Иванов Александр Георгиевич – кандидат технических наук, член-корреспондент РАЕН, главный специалист,
АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии», Москва, Россия.
Email: ivanov_ag@mail.ru

Арсентьев Юрий Александрович – кандидат технических наук, доцент,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия.
Email: arsentev@yandex.ru

Вильмис Александр Леонидович – доктор технических наук, заведующий кафедрой геотехнологических способов и физических процессов горного производства,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия.
Email: vilmisal@mgri.ru

Салахова Камила Нояновна – студент,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия.
Email: ttlsh@bk.ru

Орехов Данила Дмитриевич – студент,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия.
Email: danya5688@gmail.ru

Alexander G. Ivanov – PhD (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Chief Specialist,
Design & Survey and Research & Development Institute of Industrial Technology, Moscow, Russia.
Email: ivanov_ag@mail.ru

Yuri A. Arsentiev – PhD(Eng.), Associate Professor,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.
Email: arsentev@yandex.ru

Alexander L. Vilms – DrSc(Eng.), Head of the Department of Geotechnological Methods and Physical Processes of Mining Industry,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.
Email: vilmisal@mgri.ru

Kamila N. Salakhova – Student,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.
Email: ttlsh@bk.ru

Danila D. Orekhov – Student,
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.
Email: danya5688@gmail.ru

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

УДК 622.68:621.86

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-34-42



ВАРИАНТ СТРАТЕГИИ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОДЪЕМНИКА ДЛЯ КРУТОПАДАЮЩЕГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Журавлев А.Г., Коньков И.Е., Чендырев М.А., Глебов И.А.

Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Сквозная оптимизация многоэлементной транспортной системы горнодобывающего предприятия с учетом заданной стабильности и качества рудопотока от забоя до готовой продукции (обогащенной руды) позволит повысить эффективность его в целом, а также обеспечит резервы для повышения полноты освоения месторождения за счет высвобождающихся экономических ресурсов. Такая парадигма требует в том числе тщательного отношения к выбору и стратегии применения внутрикарьерного транспорта. Одним из вариантов магистрального внутрикарьерного транспорта при разработке глубокозалегающих месторождений с ограниченными размерами в плане (например, алмазородных, золоторудных и др.) является карьерная наклонная канатная подъемная установка (КНКП), характеризующаяся небольшими размерами перегрузочной площадки, высоким углом наклона подъемника к горизонту, что позволяет разместить его по кратчайшему расстоянию на поверхность, а также существенной экономией эксплуатационных затрат. Современная техника позволяет обеспечить грузоподъемность КНКП до 240 т в расчете как на скип, так и на подъем автосамосвала с указанным грузом. Однако применение КНКП ограничено из-за его особенностей, накладывающих ограничения на ведение горных работ. **Результаты.** В статье рассмотрена разработка рациональной стратегии освоения месторождения с применением комбинированного транспорта: сборочный автотранспорт совместно с КНКП. В качестве горно-геологических условий приняты характерные для алмазородных и некоторых мощных глубокозалегающих золоторудных месторождений параметры. Исследования выполнены на основе горно-геометрического анализа вариантов понижения горных работ с последующей укрупненной технико-экономической оценкой. За базовый принят вариант разработки с применением автомобильного транспорта.

Ключевые слова: карьерная наклонная канатная подъемная установка, режим горных работ, стратегия разработки месторождения, горно-геометрический анализ

Исследования выполнены в рамках государственного задания №075-00410-25-00. Г.р. № 125070908257-0. Тема 1 (2025-2027). Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России (FUWE-2025-0001).

© Журавлев А.Г., Коньков И.Е., Чендырев М.А., Глебов И.А., 2025

Для цитирования

Вариант стратегии освоения месторождения с применением подъемника для крутопадающего месторождения / Журавлев А.Г., Коньков И.Е., Чендырев М.А., Глебов И.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 34-42. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-34-42>



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

VERSION OF THE DEPOSIT DEVELOPMENT STRATEGY USING A LIFT FOR A STEEPLY DEEPING DEPOSIT

Zhuravlev A.G., Konkov I.E., Tchendyrev M.A., Glebov I.A.

Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Relevance. End-to-end optimization of the mining enterprise's multi-element transport system, taking into account the specified stability and quality of the ore flow from the face to the finished product (enriched ore), will increase its overall efficiency, as well as provide reserves to increase the completeness of a deposit development due to the released economic resources. Such a paradigm requires, among other things, careful consideration of the choice and strategy of using in-pit transport. One of the options for mainline in-pit transport in the development of deep-lying deposits with limited dimensions (for example, diamond ore, gold ore, etc.) is a quarry inclined rope lifting unit (QIRL), characterized by the small size of the loading area, a high angle of inclination of the lift to the horizon, which allows it to be placed at the shortest distance to the surface, as well as a significant saving operational costs. Modern technology makes it possible to provide the QIRL with a lifting capacity of up to 240 tons, based on both the skip and the lifting of the dump truck with the specified load. However, the use of QIRL is limited due to its features, which impose restrictions on mining operations. **Results.** The article considers the development of a rational strategy for the deposit development using combined transport: assembly vehicles with the QIRL. The parameters characteristic of diamond ore and some powerful deep-lying gold deposits are accepted as mining and geological conditions. The research was carried out on the basis of a mining and geometric analysis of mining reduction options followed by an integrated technical and economic assessment. A development option using motor transport was adopted as the basic one.

Key words: quarry inclined rope lifting unit, mining mode, deposit development strategy, mining and geometric analysis

The research was carried out within the framework of State Assignment No. 075-00412-25-00. reg. №125070908257-0. Subject 1 (2025-2027). Methodology for substantiating the prospects for technological development of integrated development of mineral and raw materials resources of solid minerals in Russia (FUWE-2025-0001).

For citation

Zhuravlev A.G., Konkov I.E., Tchendyrev M.A., Glebov I.A. Version of the Deposit Development Strategy Using a Lift for a Steeply Deeping Deposit. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 34-42. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-34-42>

Введение

Проектирование освоения месторождения является сложной и комплексной задачей, требующей учета всех элементов технологической цепочки и смежных аспектов [1]. Одним из ключевых процессов открытой добычи полезных ископаемых является технологический транспорт. Соответственно, оптимизация транспорта является важнейшей задачей и требует в современных условиях рассмотрения всех его звеньев – от сборочного в карьере до магистрального, доставляющего руду на обогатительную фабрику. Наиболее современные разработки, направленные на оптимизацию работы обогатительного передела, учитывают функционирование его транспортно-логистической системы в увязке с объемами и качеством готовой продукции. Включение обогатительного передела в единую многоэлементную систему технологического транспорта горнодобывающего предприятия.

Первичным (головным) элементом такой системы является внутрикарьерный транспорт, который определяет до 50% и более от себестоимости товарной руды. Поэтому его оптимизация является важнейшей задачей.

При разработке месторождений открытым способом наиболее распространено вскрытие автомобильными съездами с применением автомобильного транспорта, который при крутом падении залежи используется в качестве единственного сборочно-магистрального транспорта. Это обусловлено тем, что при разработке крутопадающих рудных тел ограничена протяженность фронта горных работ в глубокой зоне карьера и необходимы достаточно высокие скорости его подвигания в условиях ограниченного рабочего пространства.

Однако при значительной высоте подъема и расстоянии транспортирования автомобильный транспорт характеризуется высокими затратами. В настоящее время не найдено универсальных рациональных практических вариантов комбинированного транспорта, обеспечивающих эффективную разработку месторождений глубокими карьерами с крутыми бортами. Примерами таких месторождений могут служить алмазорудные (например, месторождения Западной Якутии), золоторудные (например, Олимпиадинское месторождение), руды цветных металлов. Актуальным является поиск вариантов комбинированного транспорта для указанных горно-

геологических и соответствующих горно-технологических условий.

Одним из видов транспорта, обеспечивающих низкие эксплуатационные затраты и возможность доставки по кратчайшему расстоянию при высоких углах откоса бортов карьера, являются карьерные наклонные канатные подъемные установки (КНКП). Они обеспечивают сокращение парка автосамосвалов и затрат в сравнении с вариантом автомобильного транспорта, снижение загазованности карьера [2]. В то же время высокие капитальные затраты, немалый срок строительства и ввода подъемника в эксплуатацию, а также ограничения по производительности и техническим возможностям [3] требуют для их эффективного применения разработки соответствующей стратегии освоения месторождения.

Для достижения наилучших показателей работы КНКП и обеспечения необходимой производительности предприятия необходимо не только правильно определить глубину заложения нижнего загрузочного пункта подъемника, но и обеспечить достаточный период его производительного функционирования для окупаемости больших капитальных затрат на его возведение.

В связи с вышесказанным целью представленного исследования является разработка стратегии освоения с применением комбинированного транспорта «автотранспорт + КНКП» крутопадающих месторождений с большой глубиной распространения. Учитывая большое количество возможных вариантов месторождений и порядка их разработки, в рамках данной статьи рассмотрено решение вышеуказанной задачи

на примере месторождения со ступенчатой формой залегания рудных тел, что объясняется следующим.

Для организации перегрузочного пункта со сборочного автомобильного транспорта на КНКП необходима площадка, формирование которой возможно либо на рудном целике, который может быть в последующем отработан, либо на площадке, сложенной пустыми породами, которая образуется за счет ступенчатой формы залегания рудных тел. Второй случай более прост и позволяет обосновать основные принципы стратегии освоения месторождения, не прибегая к сложной многоуровневой модели.

Методы исследований

В качестве месторождения принята группа рудных тел, сформированная по обобщенным параметрам алмазородных месторождений Западной Якутии (рис. 1) [4, 5]. Контур карьера определен в два этапа:

1. По граничному коэффициенту вскрыши методом вариантов сформирован прямолинейный огрубленный ступенчатый контур, определяющий границы достижимой глубины освоения месторождения и положение площадки в левой части.

2. Первичный контур уточнен путем нарезания вскрывающих выработок и выработок под транспортные коммуникации, в том числе траншею подъемника, а также берм очистки. Именно этот контур представлен на рис. 1. На левом борту карьера до глубины нижнего загрузочного пункта (НЗП) предусмотрено размещение КНКП. Ниже левый борт сформирован с учетом размещения автомобильных съездов. На правом борту карьера располагается петлевая трасса автосъездов.

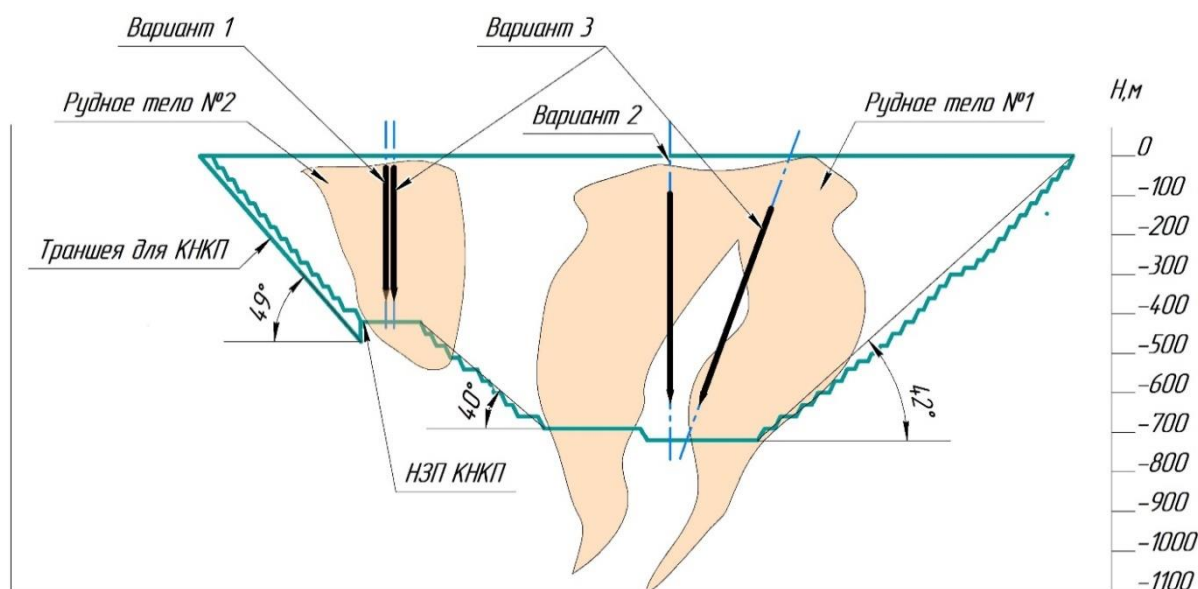


Рис. 1. Схема рассматриваемого месторождения и конечного контура карьера:

НЗП КНКП – нижний загрузочный пункт карьерной наклонной канатной подъемной установки

Fig. 1. Diagram of the deposit under consideration and the final contour of the quarry:

НЗП КНКП is lower loading point of the quarry inclined rope lifting unit

Рассматривались варианты разработки месторождения с применением только автомобильного транспорта (обозначен «Авто») и комбинированного транспорта «Авто+КНКП». В обоих вариантах конечный контур принят идентичным, чтобы исключить влияние данного фактора. Объемы руды и вскрыши, вовлекаемые в разработку, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры исследуемого карьера
Table 1. Parameters of the studied quarry

Параметр	Значение
Наибольшая глубина карьера, м	720
Глубина горизонтальной площадки на уровне НЗП* КНКП, м	420
Размеры карьера по поверхности, м	2214×2012
Размеры карьера по дну, м	340×340
Размер площадки карьера на уровне НЗП* КНКП, м	400×260
Суммарный объем руды, вовлекаемой в разработку, млн т, в том числе:	465,57
– рудного тела №1	267,17
– рудного тела №2	198,40
Объем вскрыши, млн т	2295,13
Плотность руды в целике, т/м ³	2,2
Плотность вскрышных пород в целике, т/м ³	2,5

* НЗП – нижний загрузочный пункт подъемника.

Для определения рационального направления углубки и порядка отработки месторождения выполнялся горно-геометрический анализ по известной методике [6-9]. Метод был усовершенствован в части геометрических построений для повышения точности и учета сложной пространственной формы рудных тел и карьера. Для этого были отстроены модели рудных тел и карьера с помощью программы Mineframe [10] с последующим переводом в КОМПАС-3D. Дальнейшие геометрические построения выполнялись в КОМПАС-3D, в частности, выделялись выемочные слои с углом наклона рабочего борта карьера высотой, равной высоте уступа 15 м, и определялись соответствующие объемы руды и вскрыши. Предварительное выравнивание графиков режима горных работ также осуществлялось по вышеуказанной методике укрупненно с целью сравнения и выбора рационального порядка развития горных работ. Для выбранного по итогам сравнения варианта выравнивание графика режима горных работ выполнялось детально, в том числе с учетом управления формой бортов карьера путем организации временно нерабочих участков бортов карьера и возможности применения накопительного рудного склада.

Из множества рассмотренных вариантов выделим три основных, отличающихся принципиальными моментами (см. рис. 1):

– **Вариант 1.** Направление понижения горных работ принято по рудному телу №2 с целью наиболее быстрого достижения площадки на уровне нижнего загрузочного пункта подъемника (НЗП КНКП) с целью его скорейшего ввода в эксплуатацию.

– **Вариант 2.** Направление понижения горных работ выбрано по центру карьера, что позволяет установить общую закономерность формирования режима горных работ по горно-геологическим условиям. В большей степени этот вариант подходит при разработке с применением только автомобильного транспорта, поскольку на момент достижения горными работами площадки на уровне НЗП КНКП.

– **Вариант 3.** Понижение горных работ предусматривается комбинированно с одновременной углубкой по рудным телам №1 и 2. Такой подход обеспечивает возможность выявить закономерности при поиске паллиативного варианта ведения горных работ, обеспечивающего как скорейший ввод в эксплуатацию КНКП, так и распределение объемов горных работ и в пространстве (в том числе их отдаление от зоны строительства подъемника), и во времени.

После горно-геометрических расчетов варианты оценивались по технико-экономическим показателям:

- стабильность потока руды и потенциал его выравнивания во времени;
- требуемая производительность транспорта по руде и вскрыше, стабильность парка карьерных автосамосвалов;
- укрупненные затраты на выемку горной массы.

Результаты исследований

Первичные расчеты выполнены для вышеуказанных параметров карьера с учетом предельной производительности одного КНКП 13 млн т/год. Во всех случаях в момент достижения горными работами площадки НЗП (нижнего загрузочного пункта будущего подъемника) начинается строительство КНКП, а по его завершении ввод подъемника в эксплуатацию и переход на применение комбинированного транспорта «карьерные автосамосвалы + КНКП». Сопоставление результатов горно-геометрического анализа вариантов направлений углубки (рис. 2, табл. 2) показало следующее:

– при центральной углубке (вариант 2) обеспечивается достаточно равномерное распределение объемов добычи руды по годам, а существенный объем вскрыши относится на вторую треть периода разработки месторождения, однако на этап функционирования КНКП остается чрезмерно малый объем горной массы, что не позволяет окупить затраты на него; это объясняется тем, что понижающимися горными работами площадка НЗП КНКП формируется только при отметке дна промежуточного контура карьера 660 м, что соответствует 90% от конечной глубины при выемке к этому моменту 93% от всего объема горной массы;

– при углубке по рудному телу №2 (вариант 1) возникают сложности с организацией строительства КНКП, так как горные работы ведутся на относительно малом расстоянии от зоны строительно-монтажных работ, а также в период функционирования КНКП наблюдается значительная неравномерность объемов горных работ по годам и их превыше-

ние над производительностью подъемника, что переносит существенную долю грузопотока на магистральный автотранспорт, который должен осуществлять доставку горной массы на поверхность параллельно с КНКП; выравнивание режима горных работ по руде достижимо с применением накопительного рудного склада, но объемы вскрыши имеют пики, что вызывает существенные колебания грузо-транспортной работы и соответствующие изменения в потребном парке карьерных автосамосвалов;

– двунаправленное развитие горных работ (вариант 3) при отсутствии оптимизации характеризуется крайне высокой неравномерностью распределения объема горных работ во времени с пиком в первой трети от общей длительности разработки (как известно, рациональным считается перенос наибольших объемов горных работ на последующие периоды); проработка вариаций данной стратегии показала, что она имеет позитивные перспективы в оптимизации режима горных работ применительно к комбинированному транспорту «Авто+КНКП», но требует выбора рационального распределения во времени графика поэтапной смены направлений.

Таким образом, рациональный вариант стратегии освоения месторождения с применением КНКП может быть разработан при сохранении положительных и нивелировании отрицательных характеристик за счет комбинации 1-го и 3-го из рассмотренных вариантов. Соответствующие исследования с примени-

ем горно-геометрических и технико-экономических расчетов позволили разработать такую стратегию, заключающуюся в следующем (рис. 3):

– **Этап 1.** Формирование пионерного карьера (объем V_1) на глубину заложения перегрузочного пункта H_1 между сборочным автотранспортом и КНКП. К окончанию данного этапа часть горных работ переносится на верхние горизонты в область V с целью скорейшего достижения рудного тела №1 для поддержания производственной мощности по руде в период затухания горных работ в объеме V_1 и строительства КНКП.

– **Этап 2.** Строительство КНКП с нижним перегрузочным пунктом на площадке НЗП (глубина H_1 на рис. 3 или НЗП на рис. 1) и одновременное развитие горных работ в этот период в пределах объема V_2 , обеспечивающие поддержание или наращивание производственной мощности и создание условий для последующего вскрытия запасов в объеме V_3 . Заблаговременное развитие горных работ вблизи V_1 , выполненное на первом этапе, обеспечивает безопасное их удаление от зоны строительно-монтажных работ по возведению КНКП.

– **Этап 3.** Разработка месторождения с применением комбинированного транспорта «Авто+КНКП» до проектной глубины карьера. Руда и по необходимости часть вскрыши транспортируется на поверхность подъемником, остальной объем вывозится автосамосвалами.

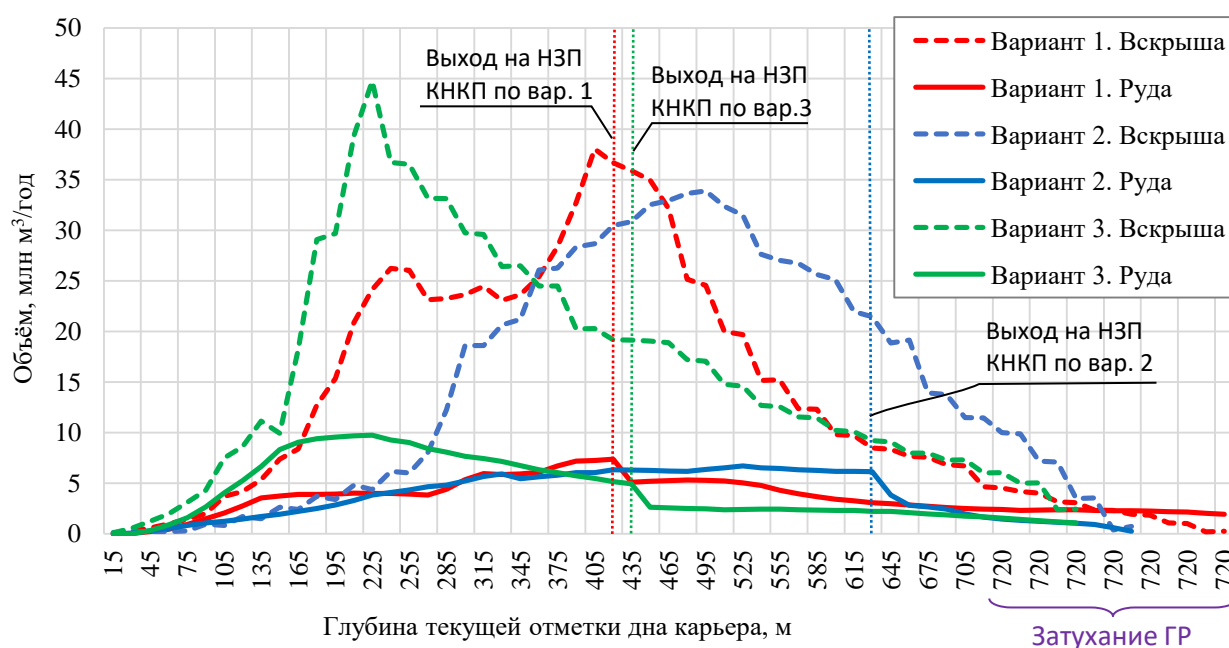


Рис. 2. Изменение требуемых объемов выемки руды и вскрыши от глубины горных работ по результатам горно-геометрического анализа: затухание ГР – период затухания горных работ после достижения проектной отметки дна карьера

Fig. 2. Changes in the required volumes of ore extraction and overburden from the depth of mining operations based on the results of mining geometric analysis: затухание ГР is the period of mining operations attenuation after reaching the design point of the quarry bottom

Таблица 2. Сравнение результатов горно-геометрического анализа
Table 2. Comparison of the results of mining and geometric analysis

Вариант	Индивидуальные характеристики		Общие характеристики
	Преимущества	Недостатки	
1	1) Перенос значительного объема вскрыши на первоначальный период с его минимизацией на завершающем этапе разработки 2) График производительности по вскрыше имеет «плато», что облегчает его выравнивание во времени 3) Значительный объем добычи руды на завершающей стадии разработки	1) Двукратное резкое нарастание производительности по вскрыше, достигающей пика при глубине 405 м 2) Пик вскрыши при 375-520 м затрудняет выравнивание производительности	После ввода КНКП в эксплуатацию предусматривается перевозка руды только им, что ограничивает производительность предприятия по руде
2	1) Наиболее стабильный график добычи руды во времени, что облегчает выравнивание производительности 2) Наиболее стабильный график производительности по руде	1) Значительный объем вскрыши отнесен на завершающий этап разработки 2) Момент ввода в эксплуатацию КНКП выпадает на завершающую стадию разработки 3) Длительный период выхода на проектную мощность по горной массе	
3	1) Короткий период затухания горных работ 2) Плавное убывание производительности по вскрыше к окончанию горных работ, что упрощает выравнивание 3) Минимальный объем вскрыши на завершающем этапе разработки	1) Перенос значительного объема вскрыши на первоначальный период 2) Наибольший из всех вариантов пик производительности по вскрыше 3) Повышенный объем добычи руды в первой трети срока разработки, что затрудняет выравнивание во времени	

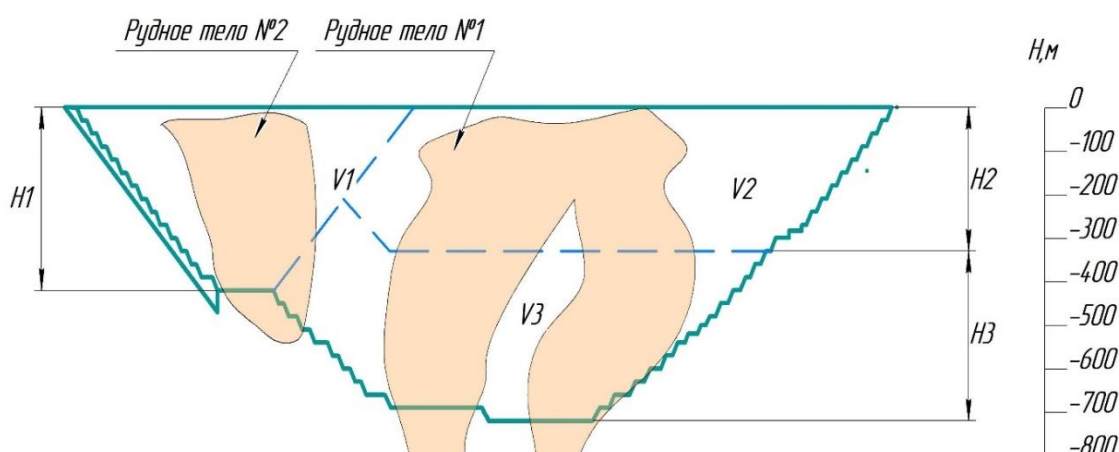


Рис. 3. Схема очередности разработки месторождения: $H1$ – глубина размещения нижнего загрузочного пункта КНКП; $V1$ – объем горной массы, извлекаемый на первом этапе разработки для опережающего ввода КНКП в эксплуатацию; $H2$, $V2$ – соответственно зона карьера по глубине и объем, разрабатываемый с применением только автомобильного транспорта; $H3$, $V3$ – соответственно зона карьера по глубине и объем, разрабатываемый при комбинированном транспорте «Авто+КНКП»

Fig. 3. Scheme of the sequence of deposit development: $H1$ is the depth of the lower loading point of the QIRL; $V1$ is the volume of rock mass extracted at the first stage of development for the early commissioning of the QIRL; $H2$, $V2$ are respectively, the quarry area in terms of depth and the volume developed using only motor transport; $H3$, $V3$ are respectively, the quarry area in terms of depth and the volume, developed with the combined transport "Auto +QIRL"

Горизонтальный характер границы между $V2$ и $V3$, располагаемой на глубине $H2$, объясняется тем, что она определена по предельной высоте подъема горной массы автосамосвалами, более которой выгоднее выполнять подъем горной массы на поверхность комбинированным транспортом «Авто+КНКП» в сравнении с только автомобильным транспортом. Согласно выполненным расчетам, для рассматриваемых горно-геологических условий (см. табл. 1) $H2$

составляет 330 м. Изгиб границы в левой части предусмотрен с учетом того, что по мере удаления забоев от капитальных выездов, размещение которых предусмотрено в правой части карьера, значительное расстояние транспортирования также влияет на снижение экономичности автотранспорта, а расстояние доставки до КНКП, наоборот, снижается. Конкретный характер границы должен определяться для конкретных горно-геологических и горно-

технологических условий с учетом параметров транспорта, режима горных работ, плановых грузопотоков, размещения отвалов, рудных складов и обогащенного производства на поверхности и в рамках данного исследования подробно не рассматривается.

Результаты горно-геометрического анализа вышеуказанного варианта разработки месторождения с переходом на КНКП приведен на **рис. 4** (обозначен как «Авто+КНКП»). Там же для сравнения указан график для варианта разработки с применением только автомобильного транспорта («Авто»), для которого за основу взят вариант 2.

Видно, что предлагаемая стратегия позволяет не только применять для вывоза значительных объемов горной массы более дешевый комбинированный транспорт «Авто+КНКП», но и распределить во времени объемы выемки руды и вскрыши и существенно облегчить выравнивание графика режима горных работ. Для улучшения технико-экономических показателей разработки месторождения дополнительно

предусмотрен второй КНКП, предназначенный для транспортирования вскрыши, а также для возможности вывоза пиковых объемов руды в периоды её неравномерной добычи.

Благодаря высокой «динамичности» и адаптивности автомобильного транспорта к изменяющимся горно-техническим условиям и высокой его производительности вариант разработки только автомобильным транспортом позволяет поддерживать более высокую производительность по руде и вскрыше и, соответственно, меньший срок разработки месторождения.

Стабилизация подачи руды на обогательную фабрику для варианта «Авто+КНКП» осуществлялась в расчете на аккумулирующий рудный склад вместимостью до 91 млн т. На **рис. 5** приведен расчетный график поставки руды на ДОФ. Производительность определена методом вариантов с подбором темпов углубки карьера исходя из объема поставки руды с карьера и со склада, обеспечивающего стабильный поток.

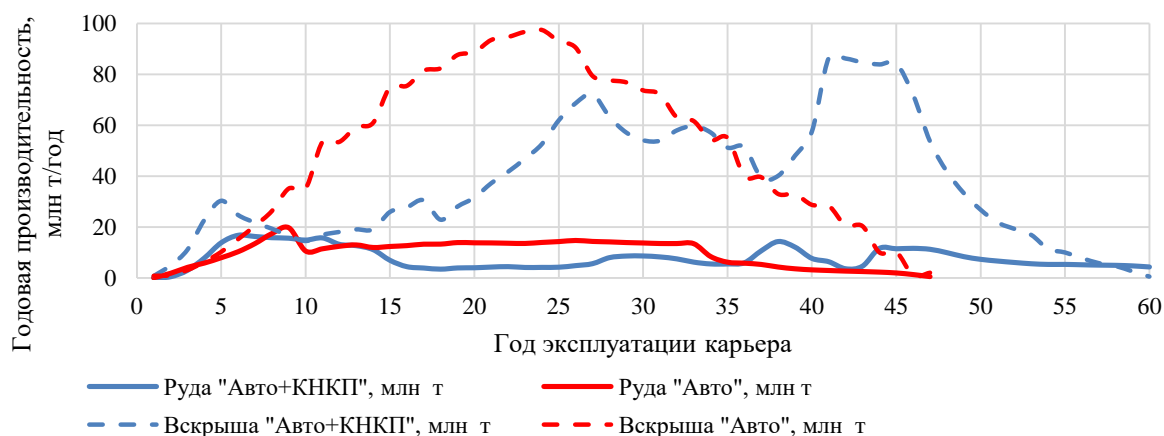


Рис. 4. Динамика производительности карьера по руде и вскрыше по результатам горно-геометрического анализа без выравнивания

Fig. 4. Dynamics of quarry productivity for ore and overburden based on the results of mining and geometric analysis without alignment

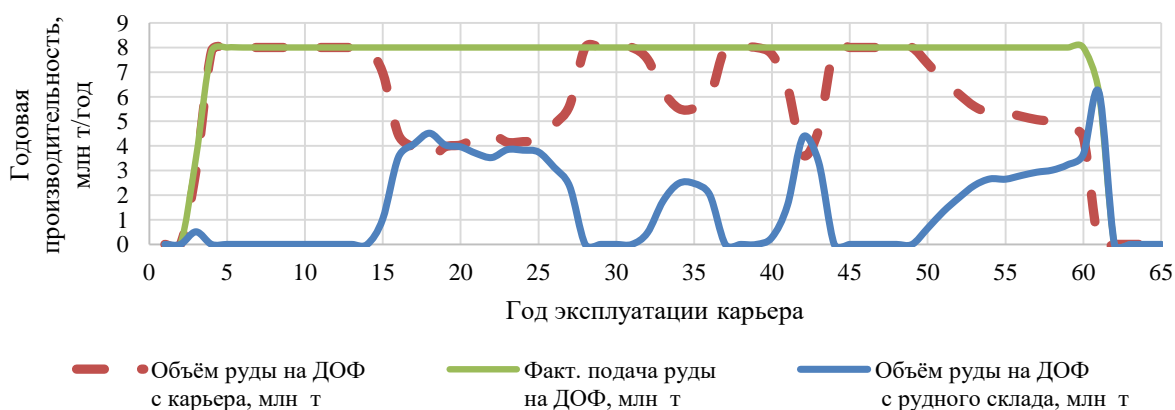


Рис. 5. Стабилизированный график подачи руды на дробильно-обогательную фабрику при разработке месторождения с применением КНКП

Fig. 5. Stabilized graph of ore supply to the crushing and processing plant during the development of the deposit using QIRL

Оценка экономических показателей выполнялась по следующим принципам:

– расходы на транспортирование горной массы рассчитывались методом постатейной калькуляции [11], исходные данные приняты по аналогам [5], а также на основе специальных расчетов [2];

– расходы на экскавацию, буровзрывные работы и прочие общеканьерные расходы приняты по аналогам как постоянная величина, поскольку конечный контур каньера для обоих вариантов одинаков;

– доходная часть оценивалась исходя из объема поставки товарной руды на ДОФ.

Выполненная экономическая оценка вариантов разработки месторождения: базового «Авто» и рассматриваемого «Авто+КНКП» показала, что экономия за счет расходов на транспортирование для «Авто+КНКП» составляет 10% от всех затрат на разработку месторождения. Это существенная сумма, которая показывает целесообразность применения КНКП в специфических условиях.

Заключение

1. Выполненное сопоставление вариантов показало, что для каньера с округлой вытянутой формой наиболее целесообразным является двунаправленное развитие горных работ с первоочередным формированием каньера в зоне строительства КНКП и последующим развитием их к основному объему рудной залежи. Такой подход позволяет перераспределять интенсивность горных работ по зонам, обеспечивая как выравнивание режима горных работ, так и охранную зону для строительно-монтажных работ при ведении подъемника.

2. Установлено, что при разработке технологии ведения горных работ с применением КНКП предпочтительно переносить автомобильные съезды при формировании конечного контура каньера на противоположный и смежные борта с тем, на котором возводится КНКП.

3. Показана эффективность применения КНКП по горно-технологическим и технико-экономическим факторам, это целесообразно для особых условий, когда залегание руды и форма каньера обеспечивают наличие площадки на глубине 300-450 м, где может размещаться нижний грузочный пункт подъемника. Расчетная экономия затрат на разработку месторождения от применения КНКП составляет 10%.

Список источников

1. Lamghari A., Dimitrakopoulos R., Ferland J.A. A hybrid method based on linear programming and variable neighborhood descent for scheduling production in open-pit mines // *Journal of Global Optimization*. 2015, 63 (3), pp. 555-582
2. Чендырев М.А., Журавлев А.Г. Техничко-экономические параметры транспортирования горной массы из каньера автомобильным наклонным каньерным подъемником // *Черная металлургия. Бюллетень*

научно-технической и экономической информации. 2018. № 1(1417). С. 33-37.

3. Чендырев М. А. Обоснование условий эффективно-го применения каньерных канатных подъемных установок // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2024. № 25. С. 141-148.
4. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный: Мирнинская типография, 2013. 568 с.
5. Совершенствование добычи и переработки алмазосодержащих руд / Зырянов И.В., Акишев А.Н., Бондаренко И.Ф. и др. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2020. 720 с.
6. Арсентьев А.И. Производительность каньеров. СПб.: Санкт-Петербургский горный ин-т, 2002. 85 с.
7. Ржевский В.В. Открытые горные работы: учебник для вузов. Ч. II. Технология и комплексная механизация. М.: Недра, 1985. 549 с.
8. Проектирование каньеров: учебник / Трубецкой К.Н., Краснянский Г.Л., Хронин В.В. и др. 3-е изд., перераб. М.: Высш. шк., 2009. 694 с.
9. Планирование открытых горных работ: учебник / Корнилов С.В., Наговицын О.В., Славиковская Ю.О. и др. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2021. 346 с.
10. Наговицын О.В. Развитие горно-геологической информативной системы в современных реалиях российской горнодобывающей отрасли // *Горная промышленность*. 2023. № S5. С. 35-40.
11. Журавлев А.Г. Выбор рациональной грузоподъемности каньерных автосамосвалов для конкретных условий транспортирования // *Транспорт Урала*. 2014. №4. С. 96-101.

References

1. Lamghari A., Dimitrakopoulos R., Ferland J.A. A hybrid method based on linear programming and variable neighborhood descent for scheduling production in open-pit mines. *Journal of Global Optimization*. 2015;63(3): 555-582.
2. Chendyrev M.A., Zhuravlev A.G. Technical and economic parameters of transportation of rock mass from a quarry by an automobile inclined quarry lift. *Chernaya metallurgiya. Bjulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information], 2018;1(1417):33-37. (In Russ.)
3. Chendyrev M.A. Substantiation of the conditions for the effective use of quarry rope lifting units. *Transportnoe, gornoe i stroitelnoe mashinostroyeniye: nauka i proizvodstvo* [Transport, mining and construction engineering: science and production], 2024;25:141-148. (In Russ.)
4. Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V. *Gorno-geologicheskie osobennosti korenykh mestorozhdeniy almazov Yakutii* [Mining and geological features of the indigenous diamond deposits of Yakutia]. Mirny: Mirminskaya printing House, 2013, 568 p. (In Russ.)
5. Zyryanov I.V., Akishev A.N., Bondarenko I.F. et al. *Sovershenstvovanie dobychi i pererabotki almazosoderzhashchih rud* [Improvement of mining and

- processing of diamond-bearing ores]. Yakutsk: NEFU Publishing House, 2020, 720 p. (In Russ.)
6. Arsentiev A.I. *Proizvoditelnost karerov* [Productivity of quarries]. St. Petersburg: St. Petersburg Mining Institute, 2002, 85 p. (In Russ.)
7. Rzhnevsky V.V. *Otkrytye gornye raboty: uchebn. dlja vuzov. Ch. II. Tehnologiya i kompleksnaya mehanizatsiya* [Open-pit mining: textbook for universities. Part II. Technology and complex mechanization]. Moscow: Nedra, 1985, 549 p. (In Russ.)
8. Trubeckoy K.N., Krasnyanskiy G.L., Khronin V.V. et al. *Proektirovanie karerov: uchebnik* [Quarry design: a textbook]. 3rd edition, revised. Moscow: Graduate school, 2009, 694 p. (In Russ.)
9. Kornilkov S.V., Nagovitsyn O.V., Slavikovskaya Yu.O. et al. *Planirovanie otkrytyh gornyh rabot: uchebnik* [Open-pit mining planning: a textbook]. Moscow: AI Art Media, 2021, 346 p. (In Russ.)
10. Nagovitsyn O.V. Development of the mining and geological information system in the modern realities of the Russian mining industry. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry], 2023;(S5):35-40. (In Russ.)
11. Zhuravlev A.G. The choice of rational loading capacity of mining dump trucks for specific transportation conditions. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2014;4:96-101. (In Russ.)

Поступила 16.01.2025; принята к публикации 17.03.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 16/01/2024; revised 17/03/2025; published 30/09/2025

Журавлев Артем Геннадиевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией транспортных систем карьеров и геотехники, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.
Email: juravlev@igduran.ru. ORCID 0000-0001-7643-3994

Коньков Илья Евгеньевич – лаборант, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.
Email: konkov@igduran.ru

Чендырев Михаил Андреевич – научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.
Email: chendyrev@igduran.ru. ORCID 0000-0002-8354-6345

Глебов Игорь Андреевич – научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.
Email: i.glebov@igduran.ru. ORCID 0000-0003-4436-3594

Artyom G. Zhuravlev – PhD (Eng.), Head of the Laboratory of Quarry Transport Systems and Geotechnics, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.
Email: juravlev@igduran.ru. ORCID 0000-0001-7643-3994

Илья Е. Конков – Laboratory Assistant, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.
Email: konkov@igduran.ru

Mikhail A. Chendyrev – Researcher, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.
Email: chendyrev@igduran.ru. ORCID 0000-0002-8354-6345

Igor A. Glebov – Researcher, Institute of Mining, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.
Email: i.glebov@igduran.ru. ORCID 0000-0003-4436-3594



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

УДК 622.271.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-43-51

СОКРАЩЕНИЕ ЗЕМЛЕЁМКОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НЕГЛУБОКИХ РОССЫПЕЙ

Тальгамер Б.Л., Дорош Е.А., Мешков И.А., Рославцева Ю.Г.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Несмотря на постоянное усложнение процесса получения земель в пользование промышленными предприятиями, удельная землеёмкость горных работ в России практически не снижается. Наиболее высокая землеёмкость горных работ (га/млн т) связана с разработкой пластовых месторождений, а максимальные значения этого показателя отмечаются при эксплуатации россыпей. При этом если при разработке глубоких россыпей удельная землеёмкость постепенно уменьшается, то при освоении мелких и неглубоких россыпных месторождений величина землеёмкости остается очень высокой. Последнее во многом связано с использованием внешнего отвалообразования. **Цель работы.** Изыскание технологий разработки неглубоких россыпей с максимальными объемами внутреннего отвалообразования. **Используемые методы.** Разработка технологических схем с внутренним отвалообразованием осуществлялась с использованием патентного поиска, анализа опыта разработки неглубоких россыпей, графоаналитических расчётов параметров горных работ с учетом применения традиционного для данных условий горного оборудования. **Новизна.** Предложены технологические схемы разработки неглубоких россыпей, обеспечивающие практически полное складирование пустых пород и отходов обогащения в выработанное пространство, в том числе в условиях разработки многолетнемерзлых пород, когда для обеспечения естественного оттаивания песков требуется обнажение больших площадей для подготовки запасов к выемке. **Результат.** Использование внутреннего отвалообразования позволяет на 25-40% сократить землеёмкость горных работ, одновременно существенно снизить затраты на рекультивацию и в более короткие сроки восстановить нарушенные земли. **Практическая значимость.** Предложенные технологические схемы могут быть применены на неглубоких средних и узких россыпях, а также на широких многолетнемерзлых месторождениях с использованием механического рыхления торфов и послойным оттаиванием песков.

Ключевые слова: землеёмкость горных работ, россыпи, открытые горные работы, внутреннее отвалообразование, технологическая схема разработки

© Тальгамер Б.Л., Дорош Е.А., Мешков И.А., Рославцева Ю.Г., 2025

Для цитирования

Сокращение землеёмкости горных работ при разработке неглубоких россыпей / Тальгамер Б.Л., Дорош Е.А., Мешков И.А., Рославцева Ю.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 43-51. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-43-51>



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

REDUCING THE LAND INTENSITY OF MINING OPERATIONS DURING THE DEVELOPMENT OF SHALLOW PLACERS

Talgamer B.L., Dorosh E.A., Meshkov I.A., Roslavtseva Yu.G.

Irkutsk National Research Technical University, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Despite the ever-growing complexity of the process for obtaining land for industrial use, the specific land intensity of mining operations in Russia has remained unchanged. The highest land intensity of mining operations (ha / million tons) is associated with the development of stratified deposits. The maximum values of this indicator are observed during exploitation of placers. At the same time, if the specific land intensity gradually decreases during the development of large-scale deep placers, then the land intensity value remains very high during the development of smaller and shallower placer deposits. This is largely due to external waste disposal. **Objectives** are to find technologies for developing shallow placers that have maximum volumes of internal waste disposal. **Methods Applied.** The development of process flowcharts with internal waste disposal was carried out by using a patent search, analyzing the experience of shallow placer development, graphical and analytical calculations for mining parameters, considering the use of conventional mining equipment in these conditions. **Originality.** Technological schemes for developing shallow placer deposits are proposed, providing almost complete storage of mining waste and enrichment waste in mined-out spaces, including in conditions of permafrost development, where natural thaw of sand requires exposure of large areas for preparation of reserves for extraction. **Result.** The use of internal waste disposal allows to reduce land intensity of mining operations by 25-40% while significantly reducing costs of reclaiming and restoring disturbed soils in a shorter period of time. **Practical Relevance.** The proposed technological schemes can be applied to shallow medium and narrow placers, as well as to wide permafrost deposits using mechanical loosening of peat and layer-by-layer thawing of sand.

Keywords: the land intensity of mining operations, placers, open-pit mining, internal waste disposal, technological scheme of development

For citation

Talgamer B.L., Dorosh E.A., Meshkov I.A., Roslavtseva Yu.G. Reducing the Land Intensity of Mining Operations During the Development of Shallow Placers. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 43-51. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-43-51>

Введение

Горнодобывающая отрасль является одной из наиболее землеёмких отраслей промышленности, деятельность которой связана с изъятием и нарушением большого количества земельных ресурсов [1]. Восстановление же нарушенных при разработке месторождений полезных ископаемых земель требует значительных материальных затрат и является весьма длительным процессом, который не всегда завершается успешно [2-4]. При добыче полезных ископаемых под карьеры, отвалы вскрышных и вмещающих пород, а также другие отходы недропользования из земельного фонда России ежегодно изымаются десятки тысяч гектар [5]. В связи с этим в РФ всё более строго относятся к обоснованию площадей, запрашиваемых предприятиями при получении лицензий на недропользование, земельных и горных отводов.

С учетом выхода в последние годы ряда руководящих и нормативных документов в области использования отходов недропользования, в том числе вскрышных и вмещающих пород (Приказ МПРиЭ РФ №247 от 25.04.2023, Постановление Правительства РФ №881 от 31.05.2023), а также новыми Правилами

проведения рекультивации и консервации земель (Постановление Правительства РФ №880 от 10.07.2018) существенно усилились требования к проектным решениям по разработке месторождений полезных ископаемых со стороны Федерального агентства по недропользованию (Роснедра) и Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор). Складирование вскрышных и вмещающих пород за пределами выработанного пространства осложняет согласование проектной документации и повышает затраты предприятия на размещение этих отходов недропользования и последующую рекультивацию нарушенных земель. Таким образом, возросла актуальность изысканий технических решений по разработке месторождений полезных ископаемых с внутренним отвалообразованием.

Несмотря на усиление требований к переводу земель различных категорий в земли промышленности и увеличению арендной платы за их использование из-за усложнения горнотехнических условий эксплуатации месторождений полезных ископаемых земель, ёмкость горных работ в РФ практически не снижается [6]. При разработке месторождений открытым способом значительная доля нарушенных земель прихо-

даться на отвалы вскрышных пород (в среднем около 30-40% [7, 8]). Поэтому одним из основных направлений снижения землеёмкости горных работ является размещение вскрышных пород в выработанном пространстве.

Методы исследований

Показатели землеёмкости горных работ при разработке россыпей устанавливались по результатам статистической обработки проектных показателей при эксплуатации более 100 месторождений.

Изыскания приемлемых технологий разработки неглубоких россыпей производились с использованием патентного поиска и изучения технических решений, изложенных в специальной литературе. Для обоснования параметров горных работ с учетом характеристики неглубоких россыпей и рабочих параметров традиционно используемого при разработке этих месторождений горно-транспортного оборудования выполнялись графоаналитические расчеты.

Расчет эколого-экономических показателей разработки неглубоких россыпей с использованием различных технологий выполнялся на основе фактических данных горнодобывающих предприятий.

Результаты исследований

Одним из показателей степени воздействия горных работ на окружающую среду является их землеёмкость, характеризующая площадь нарушаемых земель при добыче единицы полезного ископаемого (га/млн т) [1]. Удельная землеёмкость горных работ зависит как от вида полезного ископаемого, так и от горнотехнических условий его залегания, а также от способа и технологии разработки месторождения. Из всех типов месторождений полезных ископаемых с наибольшей землеёмкостью разрабатываются пластовые месторождения и в первую очередь россыпи. Если при добыче угля открытым способом удельная землеёмкость колеблется в пределах 10-55 га/млн т [9-11], то при разработке россыпей в среднем 50-100 га/млн т [12]. Наиболее высокие значения удельной землеёмкости связаны с разработкой мелких (до 3 м) и неглубоких (до 12 м) россыпей. Последнее связано в значительной степени с полным размещением вскрышных пород за пределами выработанного пространства.

При разработке глубоких (более 20 м) и средних по глубине (12-20 м) россыпей разработаны технические решения с уменьшением площадей, используемых под внешние отвалы [13], а также со складированием вскрышных пород в выработанное пространство драглайнами после выемки песков экскаваторно-автомобильным комплексом [14]. Имеются технические решения по складированию вскрышных пород и отходов обогащения в выработанное пространство при дражном способе разработки (патенты 1302774, 1788267, 2107164, 2681168). Указанные способы поз-

воляют в 1,3-1,8 раза сократить площади нарушаемых земель. Имеются технические решения с внутренним отвалообразованием при разработке месторождений песчано-гравийных пород (патенты № 2102598, 2490464, 2750445).

Вместе с тем при разработке мелких и неглубоких россыпей традиционная технология предусматривает проведение вскрышных работ бульдозерным способом со сплошными (реже отдельными) выездами и размещением отвалов на бортах карьера, а добычных работ с послойной выемкой песков веерными (реже угловыми) заездами по направлению к промприбору, установленному у борта или в торце блока [15]. Достоинством данной технологии является её простота и достаточно высокая производительность оборудования, недостатками – ограниченная мощность торфов (в основном не более 5 м) и высокая землеёмкость (га/млн т). Внутреннее отвалообразование на неглубоких россыпях не практикуется. Технические решения по разработке неглубоких россыпей с размещением отвалов в выработанном пространстве мало (патент 2254476) и условия их применения весьма ограничены, а рекомендуемое горнодобывающее оборудование является уникальным.

На достаточно широких неглубоких россыпях имеется возможность отработки запасов продольными заходками. После отработки первой заходки вскрышные породы со смежной заходки складировываются в выработанное пространство и осуществляется выемка песков из второй заходки и т.д. Для снижения землеёмкости горных работ торфы от первой заходки могут временно складироваться на поверхность второй заходки и в последующем переэкскавироваться в выработанное пространство первой заходки. Для реализации данной технологической схемы, как правило, необходим экскаватор-драглайн либо комплекс оборудования экскаватор-автотранспорт. Менее приемлем в таких случаях бульдозерный способ выемки торфов, который возможен при использовании на зачистке откоса продуктивного пласта экскаватора – обратная лопата. Недостатком таких технологических схем является необходимость переэкскавации пород.

В 1,5-1,7 раза снизить землеёмкость горных работ на неглубоких россыпях позволяет предлагаемая технологическая схема разработки, показанная на **рис. 1**.

Здесь отработка запасов осуществляется по восстановлению россыпи поперечными заходками. Ширина заходов определяется исходя из мощностей торфов и песков, а также используемого на вскрышных работах оборудования. Широкое применение на россыпях в последние годы получили экскаваторы типа обратная лопата, в том числе фирмы Komatsu. На **рис. 1** приведены средние параметры небольших россыпей с использованием на вскрышных работах экскаватора типа РС-400, а на добыче – бульдозеров. Рабочие параметры экскаватора позволяют размещать вскрышные породы в выработанное пространство без переэкскавации с оставлением в центральной части

траншеи для транспортирования песков к промприбору. На выемке песков и транспортировании их к траншее используется небольшой бульдозер, мощность которого устанавливается исходя из коэффициента вскрыши, производительности экскаватора на выемке торфов и ширины россыпи (или блока). Второй бульдозер используется для транспортирования песков по траншее к промприбору.

При удалении фронта работ от промприбора на значительное расстояние (150-200 м) его стоянка может быть перенесена вверх по траншее с развалкой отвалов для организации новой стоянки промприбора и наращиванием трубопровода водоснабжения. Сброс жидких хвостов обогащения в илоотстойник будет осуществляться по траншее.

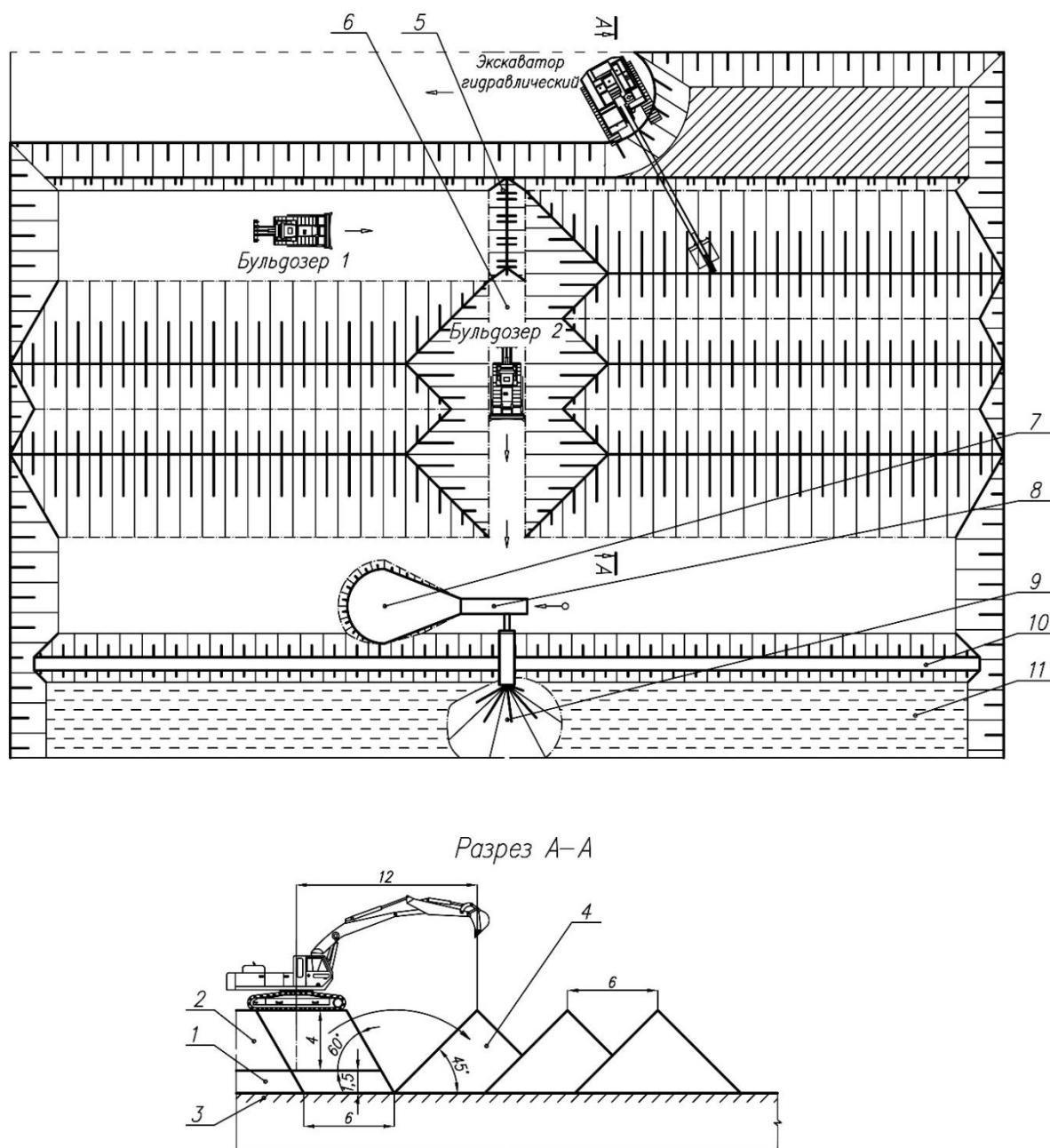


Рис. 1. Технология разработки неглубокой россыпи с внутренним отвалообразованием: 1 – пески; 2 – торфы; 3 – плотик; 4 – внутренние отвалы; 5 – навал песков; 6 – траншея между отвалами; 7 – галечный отвал; 8 – промприбор; 9 – эфельный отвал; 10 – дамба; 11 – илоотстойник
Fig. 1. Technology for developing shallow placer with internal waste disposal: 1 is sands; 2 is peat; 3 is bedrock; 4 is internal dumps; 5 is sand pile; 6 is trench between dumps; 7 is pebble dump; 8 is washing plant; 9 is lixiviation dump; 10 is dam; 11 is mud sump

При увеличении мощности вскрышных пород и ширины россыпи вместо экскаватора типа обратная лопата может использоваться драглайн. При этом ширина заходок может быть увеличена, что позволяет разрабатывать и мерзлые россыпи с послойным оттаиванием песков.

На рис. 2 приведена технологическая схема разработки широкой мерзлой россыпи с использованием на вскрышных работах экскаватора ЭШ 10.70. В данном случае средняя мощность вскрышных пород 1 составляет около 5 м, мощность песков 2 около 1 м, ширина промышленного контура от 200 до 1600 м (в среднем около 950 м).

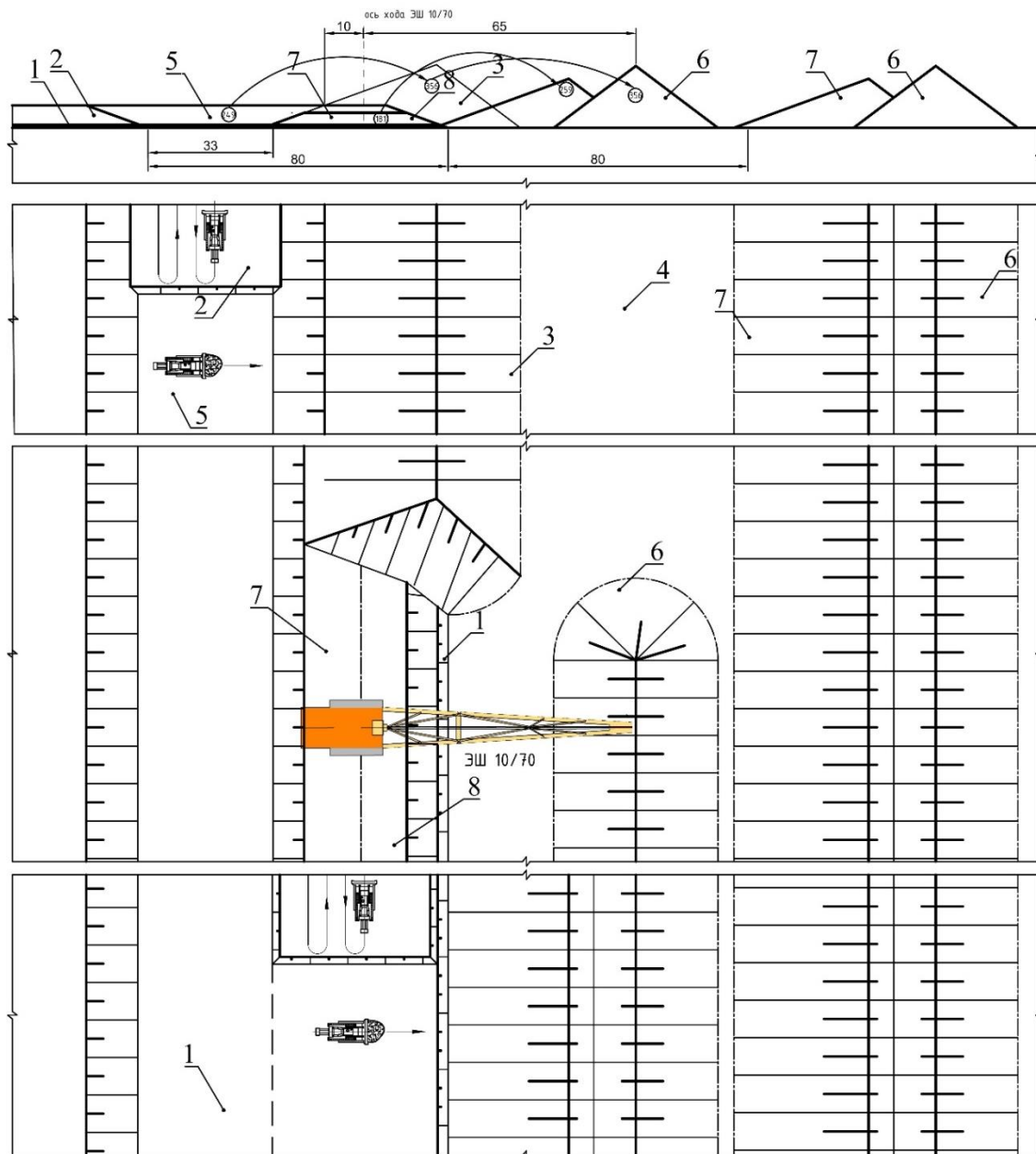


Рис. 2. Технологическая схема разработки мерзлых россыпей с внутренним отвалообразованием: 1 – пески; 2 – торфы; 3 – навал разрыхленных торфов; 4 – выработанное пространство; 5 – пионерная бульдозерная заходка с выемкой торфов, предназначенных для переэкскавации; 6 – внутренний экскаваторный отвал; 7 – внутренний бульдозерный отвал; 8 – оставшаяся часть торфов (целик под ход экскаватора), обрабатываемая бульдозером без переэкскавации

Fig. 2. Technological scheme for the development of frozen placers with internal waste disposal: 1 is sands; 2 is peat; 3 is bulk of loosened peat; 4 is developed area; 5 is bulldozer approach with excavation of peat intended for re-excavation; 6 is internal excavator dump; 7 is internal bulldozer dump; 8 is the remaining part of the peat (for the excavator), processed by a bulldozer without re-excavation

Предлагаемая технология предусматривает предварительную подготовку мерзлых торфов механическим рыхлением мощным бульдозером. После рыхления верхнего слоя мощностью 0,8-1,2 м бульдозер производит выемку разрыхленных торфов и транспортировку их в навал 3 со стороны выработанного пространства 4. После этого производится рыхление и выемка нижележащего слоя с наращиванием навала подготовленных для переэкскавации пород. После удаления с выемочного блока верхней части торфов мощностью 2,5-3,0 м производится выемка оставшегося слоя торфов (2,5-3,0 м) вдоль внешней стороны вскрышной заходки (пионерная бульдозерная заходка 5). Вдоль внутренней стороны вскрышной заходки оставляется целик 8 по оси хода экскаватора-драглайна, так как установка экскаватора на разрыхленные мерзлые торфы в теплый период года может существенно осложнить его передвижение и работу. Оставленный на песках целик из пород вскрыши обеспечивает высокую устойчивость подстилающих пород вдоль хода экскаватора. После создания достаточно большого навала мерзлых пород экскаватором типа драглайн производится перевалка торфов из него во внутренней отвал 6. Затем осуществляется послойное рыхление, выемка и складирование бульдозером в отвал 7 торфов из целика с зачисткой кровли и откоса продуктивного пласта песков.

В зависимости от горнотехнических условий (в первую очередь коэффициента вскрыши), ширины блоков, используемого оборудования и времени года на послойной выемке непосредственно из целика торфов может использоваться и экскаватор-драглайн. Последнее позволит уменьшить коэффициент переэкскавации торфов.

После удаления торфов производится послойная (по мере оттаивания) выемка песков с их укладкой в навал. Выемка песков из навала осуществляется экскаватором (рис. 3) или погрузчиком с последующим их транспортированием к обогащательной установке.

Параметры обрабатываемых блоков устанавливаются исходя из производительности горнотранспортного оборудования, а также времени года. В летний период при глубине суточного оттаивания 0,1-0,15 м площадь блока может уменьшаться, а в осенне-весенний периоды с учетом замедления оттаивания – увеличиваться. При наличии в россыпи вялой мерзлоты и таликовых зон объемы выемки торфов из целика экскаватором могут существенно возрасти.

Предложенная технология, кроме снижения землёмкости горных работ, позволяет исключить использование автотранспорта при удалении вскрышных пород и за счет этого сократить себестоимость добычи полезного ископаемого.

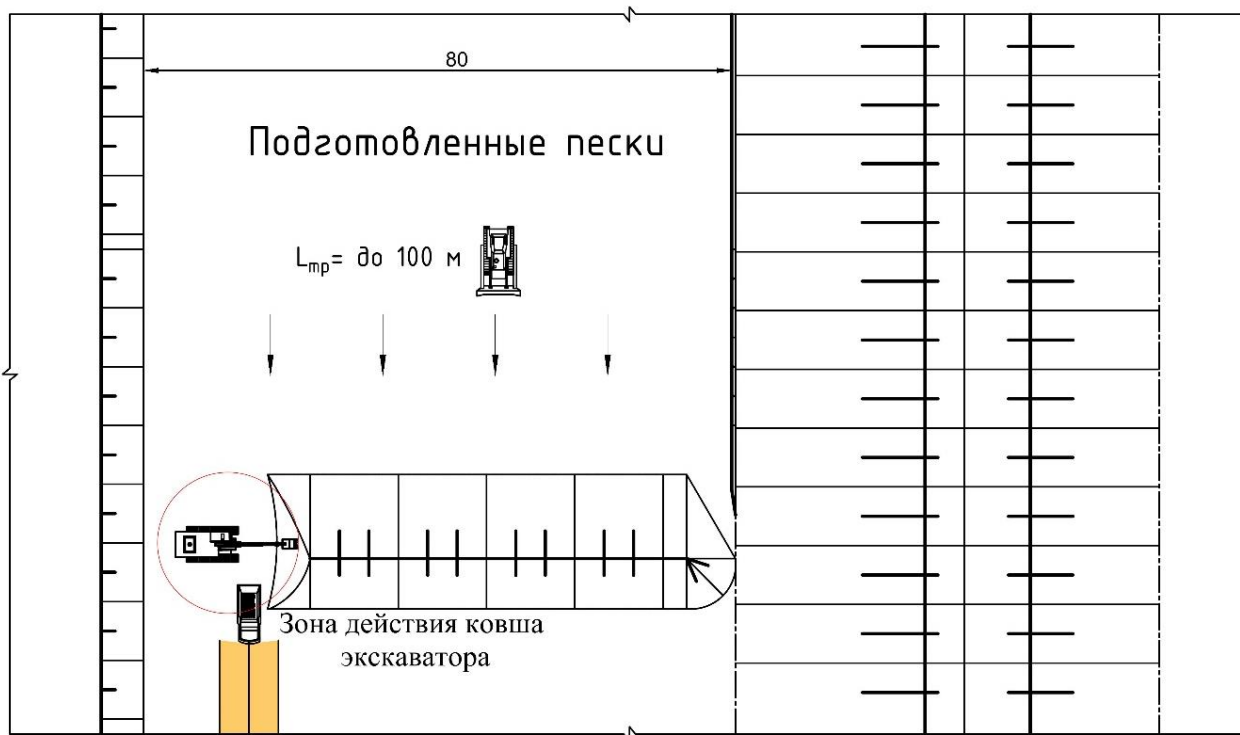


Рис. 3. Технология послойной выемки песков после складирования торфов в выработанное пространство
Fig. 3. The technology of layer-by-layer excavation of sands after peat storage in the developed space

Кроме того, размещение отвалов торфов и отходов обогащения в выработанном пространстве позволяет значительно сократить объемы работ по рекультивации, упростить и удешевить этот процесс. Объем работ по рекультивации для описанных выше условий и внутреннем отвалообразовании уменьшится на 35-55% по сравнению с технологией, предусматривающей складирование торфов во внешние отвалы, а стоимость рекультивации может сократиться в 1,5-2,0 раза.

Заключение

1. Предложенные технологические схемы разработки неглубоких россыпей с отсыпкой внутренних отвалов позволяют почти втрое сократить землеёмкость горных работ по сравнению с традиционными технологиями.

2. Внутреннее отвалообразование существенно упрощает последующую рекультивацию нарушенных земель и применительно к рассмотренным условиям разработки россыпей обеспечивает почти полукратное уменьшение объема земляных работ по восстановлению поверхности.

3. Предложенная технология разработки неглубоких россыпей с использованием на вскрышных работах экскаватора типа обратная лопата и размещением отвалов в выработанном пространстве позволяет до 30% сократить стоимость выемочно-транспортных работ по сравнению с традиционной транспортной технологией и до 40% уменьшить землеёмкость горных работ по сравнению с бульдозерным способом ведения вскрышных работ и размещением отвалов на бортах карьера.

4. Технология вскрышных работ на неглубоких россыпях с использованием комплекса бульдозер-драглайн в настоящее время использована в проекте разработки широкой россыпи в Якутии, что позволило сократить землеёмкость горных работ на 20%, а объемы рекультивации на 25% по сравнению с ранее принятой технологией бестранспортной вскрышки с размещением большей части отвалов на бортах полигона.

Список источников

1. Сафронов В.П., Зайцев Ю.В., Сафронов В.В. Значение критериев «удельная землеёмкость» и «землевание» в обороте земельных ресурсов при разработке месторождений // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2023. Вып.2. –С.313-321.
2. Yuri Litvinov, Yevhen Terekhov, and Volodymyr Fenenko. Improvement of open field development technology as a factor in the formation of quality and market value of reclaimed land // E3S Web of Conferences 123, 0 (2019) Ukrainian School of Mining Engineering – 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301045>
3. Mormul T.M., Terekhov Ye.V. Environmental and economic estimation of technological solutions in terms of land resource conservation in the process of open-cast mining // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Himychoho Universytetu. 2017, no. 3, pp. 122-128.

4. Wilhelm Knabe. Methods and results of strip-mine reclamation in Germany // The Ohio Journal of Science. March, 1964, no. 64(2), pp. 75.
5. Петрова Т.А., Рудзиш Э. Виды мелиорантов для рекультивации техногенно нарушенных территорий горной промышленности // ГИАБ. 2021. №4. С. 100–112.
6. Косолапов О.В., Типизация воздействий, оказываемых на окружающую среду при разработке месторождений полезных ископаемых // Известие Уральского государственного горного университета. 2014. №2(34). С. 54-60.
7. Иванов Е.А., Тальгамер Б.Л. Анализ структуры земель, нарушенных при подземной разработке рудных месторождений // Науки о Земле и недропользование. 2023. № 46(4). С. 413-422. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-4-413-422>. EDN: WULGWZ.
8. Экологические аспекты выбора направления рекультивации при отработке месторождений полезных ископаемых / Корнилов С.В., Антонинова Н.Ю., Шубина А.А., Славикова В.Ю. // ГИАБ. 2021. №5-2. С. 218-230.
9. Селюков А.В. Оценивание землеёмкости угольных разрезов изменением системы открытой разработки // Известия Уральского государственного горного университета. 2016. Вып. 3(43). С. 82-86.
10. Гончаров М.С., Рожков И.М., Ларионова И.А. Добыча и использование горючих ископаемых как краеугольный камень концентрации геоэкологии в России // Экономика промышленности. 2020. Т 13. №4. С. 550-560.
11. Селюков А.В., Лопатин А.В. Организационно-методические аспекты проектирования технологий внутреннего отвалообразования на разрезах центрального и северного Кузбасса // Современные тенденции. 2021. №12. С. 165-171.
12. Тальгамер Б.Л. Экологическая оценка дражных работ // Известия вузов. Горный журнал. 1995. №3-4. С. 27-30.
13. Чебан А.Ю., Секисов А.Г. Комбинированная технология разработки сложноструктурных глубокозалегающих россыпей золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т.21 №1. С. 24-30.
14. Нечаев К.Б. Дудинский Ф.В. Технологии разработки россыпных месторождений драглайнами методом поперечных заходок // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. №03 (118). С. 11-20.
15. Лешков В.Г. Разработка россыпных месторождений. М.: Горная книга, 2007. 906 с.
16. Петин А.Н., Толстомятова О.С., Петина М.А. Проблемы рекультивации земель, нарушенных горнодобывающим комплексом: российский и зарубежный опыт// Earth Sciences. 2017, no. 13, pp. 258-260.

References

1. Safronov V.P., Zaytsev Yu.V., Safronov V.V. The value of the criteria of specific land capacity and land use in the turnover of land resources in the development of mining fields. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle* [Izvestiya Tula State University. Earth sciences], 2023;(2):313-321. (In Russ.)

2. Yurii Litvinov, Yevhen Terekhov, and Volodymyr Fenenko. Improvement of open field development technology as a factor in the formation of quality and market value of reclaimed land. E3S Web of Conferences 123, 0 (2019) Ukrainian School of Mining Engineering (2019). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301045>.
3. Mormul, T.M., Terekhov, Ye.V. Environmental and economic estimation of technological solutions in terms of land resource conservation in the process of open-cast mining. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2017;3:122-128.
4. WILHELM KNABE. Methods and results of strip-mine reclamation in Germany. The Ohio Journal of Science. 1964;64(2):75.
5. Petrova T.A. Rudzish E. Types of soil improvers for reclamation of technologically disturbed lands. GIAB [Mining Information and Analytical Bulletin], 2021;(4):100-112. (In Russ.)
6. Kosolapov O.V. Typification of impacts to the environment from developing of mineral deposits]. *Izvestie Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], 2014;2(34):54-60. (In Russ.)
7. Ivanov E.A. Talgamer B.L. Analysis of the structure of lands disturbed by underground mining of ore deposits. *Nauki o Zemle i nedropolzovanie* [Earth sciences and sub-soil use], 2023;(46(4)):413-422. doi: 10.21285/2686-9993-2023-46-4-413-422. EDN: WULGWZ. (In Russ.)
8. Kornilkov S.V. Antoninova N.Yu. Shubina A.A. Ecological aspects of choosing a recultivation scenario in mineral mining. *GIAB* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2021;5(2):218-230. (In Russ.)
9. Selyukov A.V. Evaluation of ground capacity of coal mines by modification of opencast mining system. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], 2016;(3(43)):82-86. (In Russ.)
10. Goncharov M.S. Rozhkov I.M. Larionova I.A. Extraction and use of fossil fuels as the cornerstone of geoecology concentration in Russia. *Ekonomika promyshlennosti* [Russian Journal of Industrial Economics], 2020;13(4):550-560. (In Russ.)
11. Selyukov A.V. Lopatin A.V. Organizational and methodological aspects of designing technologies for internal dumping in the mines of the central and northern Kuzbass]. *Sovremennye tendentsii* [Current trends], 2021;(12):165-171. (In Russ.)
12. Talgamer B.L. Environmental assessment of dredging operations. *Izvestiya VUZov. Gornyy zhurnal* [Minerals and Mining Engineering], 1995;(3-4):27-30. (In Russ.)
13. Cheban A.Yu. Sekisov A.G. Combined technology for the development of complex structure deep gold placers]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2023;21(1):24-30. (In Russ.)
14. Nechaev K.B. Dudinskiy F.V. Technology development of loose deposits by draglines of cross-trenches. *Vestnik ZabGU* [Transbaikalian state university journal], 2015;(03(118)):11-20. (In Russ.)
15. Leshkov V.G. *Razrabotka rossypnykh mestorozhdeniy* [Development of placer deposits]. Moscow: Gornaya kniga, 2007, 906 p. (In Russ.)
16. Petin A.N. Tolstopyatova O.S. Petina M.A. The problems of reclamation of lands affected by the mining industry: Russian and international experience. *Earth sciences* [Earth sciences], 2017;(13):258-260. (In Russ.)

Поступила 03.02.2025; принята к публикации 13.03.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 03/02/2025; revised 13/03/2025; published 30/09/2025

Тальгамер Борис Леонидович – доктор технических наук, заведующий кафедрой, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: talgamer@ex.istu.edu. ORCID 0000-0003-1201-2693

Дорош Егор Алексеевич – технический директор, ООО «Бодайбинские россыпные месторождения», Иркутск, Россия.
Email: egordoros3@gmail.com. ORCID 0009-0002-9118-5583

Мешков Иван Анатольевич – аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: meshkovia@ex.istu.edu. ORCID 0009-0002-9118-5583

Рославцева Юлия Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: roslavtseva@mail.ru. ORCID 0000-0001-8799-7269

Boris L. Talgamer – DrSc (Eng.), Head of Department,
Professor of the Department of Mineral Deposits Development
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: talgamer@ex.istu.edu. ORCID 0000-0003-1201-2693

Egor A. Dorosh – Technical Director ,
Bodaibinskiye Alluvial Deposits LLC, Irkutsk, Russia.
Email: egordoros3@gmail.com. ORCID 0009-0002-9118-5583

Ivan A. Meshkov – Postgraduate Student of the Department of Mineral Deposits Development
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: meshkovia@ex.istu.edu. ORCID 0009-0002-9118-5583

Yuliya G. Roslavl'tseva – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Mineral Deposits Development
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: roslavl'tseva@mail.ru. ORCID 0000-0001-8799-7269



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

УДК 622.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-52-58

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Ситдикова С.В.¹, Великанов В.С.^{1,3}, Строганов Ю.Н.², Чернухин С.А.^{1,2}

¹Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

³Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Экономическое развитие Российской Федерации во многом определяется ресурсобеспеченностью. Разведанные запасы меди, железной руды, никеля и других твердых полезных ископаемых значительны и достаточны для покрытия внутренних потребностей. Добыча этих полезных ископаемых в основном рентабельна открытым способом с использованием парка карьерной добычной техники и транспорта. Определяющее место в технологической цепочке добычи занимают карьерные гусеничные экскаваторы. Эффективность эксплуатации экскаваторов в условиях современного производства определяется и обеспечивается правильной организацией и проведением комплекса работ по техническому обслуживанию и ремонту, уменьшению количества отказов и длительности простоев. **Используемые методы.** При решении поставленных задач использовался комплексный подход, включающий системный научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований. Для оценки напряженно-деформированного состояния элементов несущих металлоконструкций карьерных экскаваторов применялся метод конечных элементов. **Новизна.** Комплексное использование в экспериментальных исследованиях тензометрирования напряженно-деформированного состояния конструкций и моделирование процесса нагружения для разных параметров забоя и развала горной массы позволило получить необходимый объем данных для рекомендаций по совершенствованию узлов металлоконструкций экскаваторов, технологии их восстановления и ремонта, а также систематизации правил и требований к эксплуатации карьерных экскаваторов в тяжелых горно-геологических условиях. **Практическая значимость.** Разработка рекомендации по оптимальному управлению карьерным экскаватором в итоге позволит снизить количество отказов рабочего оборудования и увеличит его ресурс.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, рабочее оборудование, тензометрирование, полезное ископаемое, распределение напряжений

© Ситдикова С.В., Великанов В.С., Строганов Ю.Н., Чернухин С.А., 2025

Для цитирования

Экспериментальные исследования и анализ процесса нагружения элементов рабочего оборудования карьерных экскаваторов / Ситдикова С.В., Великанов В.С., Строганов Ю.Н., Чернухин С.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 52-58. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-52-58>



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

EXPERIMENTAL STUDIES AND ANALYSIS OF THE LOADING PROCESS OF WORKING EQUIPMENT ELEMENTS OF QUARRY CRAWLER EXCAVATORS

Sitdikova S.V.¹, Velikanov V.S.^{1,3}, Stroganov Y.N.², Chernukhin S.A.^{1,2}

¹Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia;

²Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia;

³Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The economic development of the Russian Federation is largely determined by resource availability. Explored reserves of copper, iron ore, nickel and other solid minerals are significant and sufficient to cover domestic needs. Extraction of these minerals is mainly profitable by open-pit mining using a fleet of quarry mining equipment and transport. Quarry crawler excavators occupy a decisive place in the technological chain of extraction. The efficiency of excavator operation is determined and ensured in the conditions of modern production by the correct organization and implementation of a set of works on technical maintenance and repair, reduction of the number of failures and duration of downtime. **Methods Applied.** When solving the tasks, an integrated approach was used, including: system scientific analysis and generalization of previously published studies. The finite element method was used to assess the stress-strain state of the elements of load-bearing metal structures of quarry excavators. **Originality.** The complex use of strain-gauging of the stress-strain state of structures and modeling of the loading process for different parameters of the face and the collapse of the rock mass in experimental studies made it possible to obtain the necessary amount of data for recommendations on improving the units of metal structures of excavators, the technology of their restoration and repair, as well as systematization of the rules and requirements for the operation of quarry excavators in severe mining and geological conditions. **Practical Relevance.** Development of recommendations for optimal control of a quarry excavator, which will ultimately reduce the number of failures of working equipment and increase its service life.

Keywords: quarry excavator, working equipment, strain-gauging, mineral, stress distribution

For citation

Sitdikova S.V., Velikanov V.S., Stroganov Y.N., Chernukhin S.A. Experimental Studies and Analysis of the Loading Process of Working Equipment Elements of Quarry Crawler Excavators. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 52-58. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-52-58>

Введение

Экономическое развитие нашей страны во многом определяется объемами добычи не только углеводородных природных ресурсов, но и твердых полезных ископаемых, которые принято относить к стратегическим минеральным ресурсам страны, а именно металлические руды – железная руда, медь, никель и др. Разведанные запасы этих руд в Российской Федерации достаточны для покрытия внутренних потребностей, а также имеют высокий потенциал для экспорта при изменениях в мировой экономике [1]. В большинстве случаев они извлекаются из недр открытым способом разработки месторождений. Развитие открытой геотехнологии предполагает не только совершенствование технологий открытой добычи твердых полезных ископаемых с внедрением на горных предприятиях современных мощных машин, в контексте данной публикации – карьерных экскаваторов, но и в повышение эффективности эксплуатации действующего парка карьерных экскаваторов, произведенных и принятых в эксплуатацию во второй половине прошлого века. Технологический и технический уровни основных процессов открытых горных работ зависит от степени механизации и автоматизации производственных процессов и горных машин.

Эффективность эксплуатации действующего парка карьерной техники обеспечивается в условиях современного производства правильной организацией и проведением комплекса работ по техническому обслуживанию и ремонту, уменьшению количества отказов и длительности простоев. За счет этого во многом реализуется непрерывность производства, улучшается качество конечной продукции горного передела, снижаются эксплуатационные расходы на оборудование [2]. Техническое обслуживание оборудования настолько важно, что в горнодобывающей промышленности на него тратится от 35 до 50% годового бюджета, а в строительной – около 30% [3, 4]. За последнее десятилетие техническое обслуживание в горнодобывающей и строительной отраслях претерпело значительные изменения благодаря доступности данных в режиме реального времени. К горнодобывающей технике можно применять четыре распространенных подхода к техническому обслуживанию: реактивный, профилактический, основанный на состоянии и предписывающий [5].

В отчетных материалах Федеральной службы государственной статистики указывается, что за 2019–2024 годы износ машин и оборудования предприятий горной отрасли составил 64,6%, транспортных средств

– 60,4%. Значительная часть парка карьерных экскаваторов (68%) находится в эксплуатации 23 года и более, при заявленном сроке службы в 21 год [6, 7]. Следует отметить, что в сложившихся реалиях государственная политика относительно данной проблемы направлена на представление субсидий горнодобывающим предприятиям, так из публикации в «Коммерсантъ» [8] следует, что: «Минпромторг предлагает субсидировать до 20% от стоимости новых отечественных карьерных экскаваторов при их покупке на замену такой же техники, отработавшей свой срок службы и не соответствующей современным требованиям безопасности. Причем технику нужно будет сдать на утилизацию. Согласно проекту соответствующего постановления, новый карьерный экскаватор должен быть предназначен для проведения выемочных работ при открытом способе добычи полезных ископаемых, иметь объем ковша не менее 10 кубических метров, а также иметь подтверждение о соответствии требованиям 719-го постановления о локализации. Необходимый объем финансирования этой субсидии на 2021 год оценивался в 0,3 млрд руб., на период с 2022 по 2024 годы – 1 млрд руб.».

Материалы и методы исследования

Классическое определение термина «надежность» заключается в том, что это вероятность того, что машина, оборудование или устройство будет выполнять функции, для которых оно предназначено, в условиях, указанных для его эксплуатации, в течение определенного периода времени. Когда устройство не выполняет свою предполагаемую функцию, можно говорить, что оно отказало. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи теории надежности горных машин подробно изучены и освещены в трудах как советских, так и российских ученых, а также их иностранных коллег. Особое место занимают работы корифеев горной науки Подэрни Р.Ю., Коха П. И., Солода В.И., Солода Г.И., Гетопанова В. Н., Тропа А.Е., Голубева А.Е., Шпильберга И.Л. и других замечательных ученых. Изучение значительного объема научно-технической литературы позволило авторам прийти к заключению, что проблематика исследований теории надежности сводится к пониманию закономерностей, по которым случаются отказы горно-транспортной техники в разнообразных условиях эксплуатации и постоянная неопределенность времени возникновения отказов.

В рамках данной публикации кратко охарактеризуем понятие отказа. Отказ может быть любым инцидентом или условием, которое приводит к тому, что произведенный продукт, процесс, машина, материал или услуга ухудшаются или становятся непригодными для удовлетворительной, безопасной, надежной и экономической эффективной работы [9]. Причем в некоторых случаях достоверность полученных данных об отказах карьерного электромеханического оборудования вызывает нарекания и сомнения. Это обстоятельство можно объяснить следующими факторами: дей-

ствующие нормативные документы не способствуют качественному учету условий возникновения отказов; некорректное и недостоверное представление отчетов диспетчерских и механических служб об отказах и проведенных ремонтных воздействиях. В работе [13] представлен анализ характерных дефектов карьерных экскаваторов ЭКГ-10 на примере состояния одного из парков экскаваторной техники, и в исследованиях [1, 14] карьерных экскаваторов ЭКГ-5А приведена их фотофиксация (см. таблицу).

Таблица. Выявленные дефекты карьерных экскаваторов
Table. Defects of quarry excavators identified

Фотофиксация дефекта	Элементы рабочего оборудования
ЭКГ-10	
Стрела	
	Трещины по основному металлу проушин крепления нижней секции стрелы на платформе
	Трещины по основному металлу и сварным швам нижней секции в районе сопряжения с поперечиной
Ковш	
	Трещины на коромысле
	Трещины на корпусе уравнительного блока
ЭКГ-5А	
Ковш	
	Износ звена цепи, а также трещины в зоне крепления зубьев, трещины передней стенки, трещины, проходящие через проушины крепления ковша к рукояти
	Неправильное соединение коромысла ковша

В качестве объекта исследований нами выбран экскаватор ЭКГ-15, который позиционировался как замена экскаваторам ЭКГ-8И и ЭКГ-12,5. Экскаваторы ЭКГ-10 и ЭКГ-15М, как традиционные модификации ижорских экскаваторов, отличаются вариациями с удлиненным рабочим оборудованием – это ЭКГ-5У, ЭКГ-8УС (модификации ЭКГ-10) и ЭКГ-8У, 12УС (модификации ЭКГ-15) (рис. 1) [10].

К основным задачам, проводимым в рамках данной публикации, можно отнести следующие: анализ и систематизация теоретических и экспериментальных материалов по отказам карьерных экскаваторов; сбор и обработка статистической информации, характеризующей фактические значения ресурса узлов карьерных экскаваторов; разработка плана работ по проведению лабораторных экспериментальных исследований на действующем макете карьерного экскаватора; разработка 3D-модели элементов рабочего оборудования карьерного экскаватора для установления напряженно-деформированного состояния для развалов горных пород с разными физико-механическими свойствами.

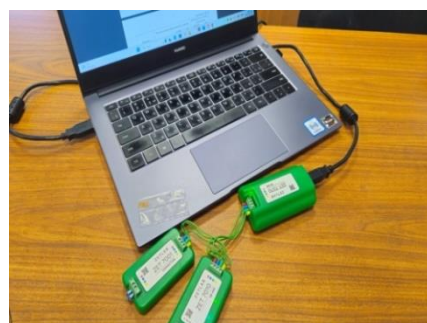


Рис. 1. Общий вид ЭКГ-15М в забое [10]
Fig. 1. General view of EKG-15M (quarry excavator) at the face [10]

Конструктивное исполнение современного карьерного экскаватора не особо изменилось со второй половины XX века, оно включает следующие базовые элементы и механизмы:



а



б

Рис. 2. Визуализация лабораторных экспериментальных исследований: а – действующая модель карьерного экскаватора (кафедра ГМК ФГБОУ ВО «УГТУ»); б – программно-аппаратный комплекс

Fig. 2. Visualization of laboratory experimental studies: а is working model of a quarry excavator (Department of Mining and Metallurgy, Ural State Mining University); б is software and hardware complex

1) стрела и рукоять с ковшом, их принято относить к элементам рабочего оборудования, известно два технических решения: с реечным напором и моноблочной стрелой, установленной на платформе под углом 45° (фирмами-производители «Харнишвегер» (США) и ОАО «Уралмаш» (РФ)), и с канатными приводами механизмов подъёма, напора ковша и шарнирно сочлененной стрелой, также установленной на платформе под углом 45° (фирмы-производители «Бюсайрус Эри» (США) и ОАО «Ижорские заводы» (РФ)) [12];

- 2) поворотная платформа с механизмами;
- 3) ходовая тележка.

Результаты и их обсуждение

Методы регистрации и контроля деформаций металлоконструкций достаточно подробно описаны и изучены. Широко в исследованиях применяются, как правило, неразрушающие или натурные экспериментальные методы диагностики. Для проведения лабораторного эксперимента для оценки нагруженности элементов металлоконструкций карьерных экскаваторов авторами использован тензометрический метод экспериментальной диагностики. Это связано с его универсальностью и относительно невысокой стоимостью, при этом метод позволяет длительное время проводить контроль деформаций в конструкциях, осуществлять оценку эксплуатационных режимов [15].

В составе программно-аппаратного комплекса, используемого в лабораторном эксперименте, задействованы: первичные преобразователи – размещаются на исследуемых элементах и преобразуют измеряемую физическую величину в сигнал; модули сбора и обработки данных – являются промежуточными измерительными преобразователями и предназначены для приема и обработки информации с ПП, усиления и передачи её на ЭВМ; источник питания; устройства и линии связи для обеспечения обмена информацией и командами между устройствами и подсистемами; персональный компьютер с программным обеспечением для регистрации, визуализации и анализа данных (рис. 2).

Фиксация и запись измеренных сигналов осуществлялась с помощью интеллектуальных цифровых датчиков и программного обеспечения российской фирмы Zetlab [16]. В программе MatLab экспериментальные данные были обработаны, результаты приведены на **рис. 3**. Фиксировались временные промежутки, характерные для операций цикла экскавации горной массы, пиковые участки диаграммы характеризуют работу ковша в момент черпания и объясняются изменением сопротивления взорванной горной массы процессу копания, обусловленным неоднородностью ее физико-механических свойств – кусковатости и коэффициента разрыхления, причем это характерно до завершения процесса черпания, который в неблагоприятных условиях может повториться несколько раз. В качестве объекта воздействия использовался развал щебня с разным фракционным составом, а именно 5–20, 20–40 и частично 40–70 мм, варьировались режимы управления экскаватором посредством изменения предельных скоростей при перемещении ковша в разные фазы процесса экскавации.

Для оценки результатов экспериментальных исследований нами в программе трехмерного проектирования КОМПАС-3D 21.0.1.1172 (64-разрядная версия) компании ООО «АСКОН-Системы проектирования» создана по геометрическим размерам 3D-модель элементов рабочего оборудования (подсистема рукоять-ковш), параметры нагружения моделировались для развалов горных пород с разными физико-механическими свойствами, отдельные результаты представлены на **рис. 4**. Результаты сопоставимы и адекватны данным, полученным в ходе исследований [17], и коррелируются с данными работы [15] (**рис. 4**).

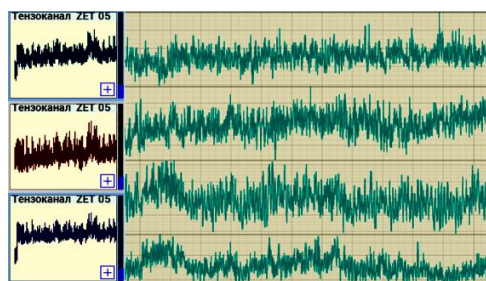


Рис. 3. PtSC-записи аппаратуры ZETLAB по оценке точек напряженно-деформированного состояния в элементах рабочего оборудования

Fig. 3. PtSC records of ZETLAB equipment for assessing stress-strain state in elements of working equipment

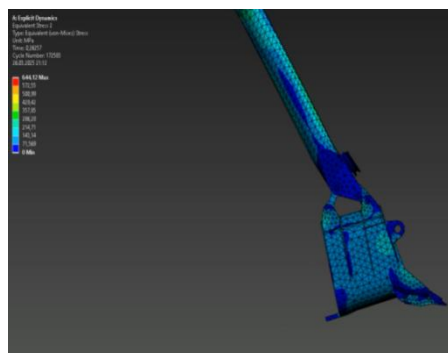
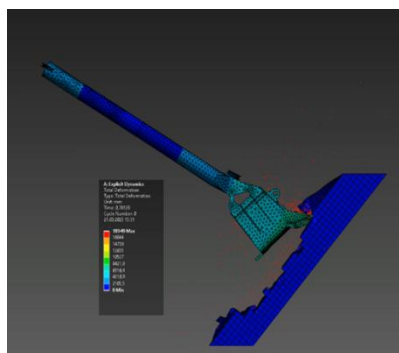


Рис. 4. Исследование напряженно-деформированного состояния элементов рабочего оборудования

Fig. 4. Study of the stress-strain state of the elements of working equipment

Заключение

Одним из определяющих факторов, оказывающих влияние на работу карьерного экскаватора при разработке горных пород, выступают физико-механические характеристики разрабатываемого массива. Прежде всего следует отметить твердость породы, от которой напрямую зависит необходимое усилие резания, уровень износа рабочего оборудования и продолжительность рабочего цикла экскавации. Лабораторные тензометрические измерения нагрузок в ходе проведенных экспериментов показали, что предельные нагрузки, возникающие при черпании горной массы, зависят от физико-механических свойств горных пород и от скоростных режимов подъема ковша, определяемых наряду с квалификацией машиниста карьерного экскаватора равномерностью кускового состава подготовленной горной массы.

Изменчивость гранулометрического состава создает неравномерное сопротивление при копании, что затрудняет стабильную работу карьерного экскаватора, снижает коэффициент заполнения ковша и в итоге влияет на показатели надежности электромеханического оборудования экскаватора.

Таким образом, результаты настоящего исследования могут быть использованы для обоснования и разработки рекомендаций по совершенствованию узлов металлоконструкций экскаваторов, технологии их восстановления и ремонта, а также систематизации правил и требований к эксплуатации карьерных экскаваторов в тяжелых горно-геологических условиях.

Список источников

- О влиянии granulometрии взорванной горной массы на распределение напряжений в рабочем оборудовании карьерного экскаватора / Великанов В.С., Чернухин С. А., Тельминов Н.С., Дреммин А.В., Ломовцева Н. В., Ситдикова С. В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 30–43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-30-43>.
- Maruszewska E., Tkocz-Wolny K. Accounting in making investment decisions in the field of fixed assets // Scientific Papers of the Silesian University of Technology Organization and Management. 2004, no. 22, Gliwice.
- Christiansen B. Exploring Biggest Maintenance Challenges in the Mining Industry. Available online: <https://www.mining.com/web/exploring-biggest-maintenance-challenges-mining-industry/#:~:text=Mining%20equipment%20maintenance%20is%20so,equipment%20maintenance%20and%20repair%20alone.&text=Deploying%20such%20technology%20in%20maintenance,can%20significant> (accessed on 30 July 2018).
- Norris G. The True Cost of Unplanned Equipment Downtime. Available online: <https://www.forconstructionpros.com/equipment-management/article/21104195/the-true-cost-of-unplanned-equipment-downtime>.
- Provencher M.A Guide to Predictive Maintenance for Smart Mine. Available online: <https://www.mining.com/a-guide-to-predictive-maintenance-for-the-smart-mine>.
- Федеральная служба государственной статистики. Российский статистический ежегодник. 2019 г. URL: <https://www.gks.ru/>.
- Москвичев В.В., Ковалев М.А. Оценка показателей эксплуатационной надежности карьерных гидравлических экскаваторов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2020. 13(6). С. 745–756. DOI: 10.17516/1999-494X-0263.
- <https://www.kommersant.ru/daily>
- Witherell C. E. Mechanical Failure Avoidance: Strategies and Techniques, Publisher: McGraw-Hill, 1994, p. 265.
- <https://infomach.ru/excavator-ecg-15/>
- Анализ отказов механического оборудования и металлоконструкций экскаваторов / Москвичев В.В., Доронин С.В., Утехин С.А. Эбич В.Р. Красноярск: ВЦ СО АН СССР, 1989. 33 с.
- Ананин В.Г., Эмилов А.Б. Анализ эксплуатационных показателей карьерных гидравлических экскаваторов и экскаваторов с механическим приводом // Вестник ТГАСУ. 2015. № 4. С.212-218
- Дефекты металлоконструкции карьерных экскаваторов / Богданов А. П. [и др.]. // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн. 2015. № 11 (22). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/2775>
- Великанов В.С., Тельминов Н.С., Дреммин А.В. Возможные варианты дефектов и неправильных ремонтных воздействий на элементы рабочего оборудования ЭКГ // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта : сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 95-летию кафедры подъемно-транспортных машин и роботов, Екатеринбург, 13 декабря 2024 года. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2025. С. 157–159. EDN BHPXIC.
- Великанов В.С. Научные основы системы снижения рисков отказов при управлении карьерным экскаватором: специальность 05.05.06 «Горные машины»: дис. ... д-ра техн. наук / Великанов Владимир Семенович. Екатеринбург, 2020. 292 с. EDN IFCXZX.
- Режим доступа: <http://www.zetlab.ru/>
- Лагунова Ю.А., Макарова В.В., Набиуллин Р.И. Анализ методов диагностирования состояния металлоконструкций на примере экскаваторостроения // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 6 (164). С. 17–25. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-17-25

References

- Velikanov V.S., Chernukhin S.A., Telminov N.S., Dremmin A.V., Lomovtseva N.V., Sitdikova S.V. On the influence of granulometry of blasted rock mass on the distribution of stresses in the working equipment of a quarry excavator. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2024;22(4):30-43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-30-43> (In Russ.)
- Maruszewska E., Tkocz-Wolny K. Accounting in making investment decisions in the field of fixed assets. *Scientific Papers of the Silesian University of Technology Organization and Management*. 2004;(22).
- Christiansen B. Exploring Biggest Maintenance Challenges in the Mining Industry. Available at: <https://www.mining.com/web/exploring-biggest-maintenance-challenges-mining-industry/#:~:text=Mining%20equipment%20maintenance%20is%20so,equipment%20maintenance%20and%20repair%20alone.&text=Deploying%20such%20technology%20in%20maintenance,can%20significant> (Accessed July 30, 2018).
- Norris G. The True Cost of Unplanned Equipment Downtime. Available at: <https://www.forconstructionpros.com/equipment-management/article/21104195/the-true-cost-of-unplanned-equipment-downtime>
- Provencher M.A Guide to Predictive Maintenance for Smart Mine. Available at: <https://www.mining.com/a-guide-to-predictive-maintenance-for-the-smart-mine>
- Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki. Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik* [Federal State Statistics Service. Russian Statistical Yearbook], 2019. Available at: <https://www.gks.ru/>.
- Moskvichev V.V., Kovalev M.A. Assessment of operational reliability indicators of quarry hydraulic excavators. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of SFE. Engineering&Technologies], 2020;13(6):745-756. DOI: 10.17516/1999-494X-0263 (In Russ.)
- Available at: <https://www.kommersant.ru/daily>
- Witherell C.E. Mechanical Failure Avoidance: Strategies and Techniques, McGraw-Hill. 265 (1994).
- Available at: <https://infomach.ru/excavator-ecg-15/>
- Moskvichev V.V., Doronin S.V., Utekhin S.A., Ebich V.R. *Analiz otkazov mekhanicheskogo oborudovaniya i metal-*

- lokonstruktsiy ekskavatorov* [Analysis of failures of mechanical equipment and metal structures of excavators]. Krasnoyarsk: Computing Center of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1989, 33 p. (In Russ.)
12. Ananin V.G., Emilov A.B. Analysis of operational indicators of quarry hydraulic excavators and excavators with mechanical drive. *Vestnik TGASU* [Journal of Construction and Architecture], 2015;(4): 212-218 (In Russ.)
 13. Bogdanov A.P., et al. Defects in the metal structure of quarry excavators. *Universum: Tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn.* [Universum: Technical sciences: electronic scientific journal], 2015;(11(22)). Available at: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/2775>
 14. Velikanov V.S., Telminov N.S., Dremmin A.V. Possible variants of defects and incorrect repair actions on elements of the working equipment of the EKG. *Innovatsionnoe razvitie tekhniki i tekhnologii nazemnogo transporta: sbornik statey VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 95-letnemu yubileyu kafedry podemno-transportnykh mashin i robotov* [Innova-
 - tive development of equipment and technologies of land transport. Proceedings of the VI All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 95th anniversary of the department of lifting and transport machines and robots]. Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2025, pp. 157-159. EDN BHPXIC. (In Russ.)
 15. Velikanov V.S. *Nauchnye osnovy sistemy snizheniya riskov otkazov pri upravlenii karemykh ekskavatorom: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific foundations of the system for reducing the risks of failures when operating a quarry excavator. Doctoral dissertation]. Yekaterinburg, 2020, 292 p. EDN IFCXZX.
 16. Available at: <http://www.zetlab.ru/>
 17. Lagunova Yu.A., Makarova V.V., Nabiullin R.Sh. Analysis of methods for diagnosing the condition of metal structures using the example of excavator construction. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2022;(6(164)):17-25. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-17-25 (In Russ.)

Поступила 27.05.2025; принята к публикации 23.07.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 27/05/2025; revised 23/07/2025; published 30/09/2025

Ситдикова Светлана Валерьевна – старший преподаватель,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: siriniti.86@mail.ru

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия;
Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: rzhik_00@mail.ru ORCID 0000-0001-5581-2733

Строганов Юрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: iu.n.stroganov@urfu.ru ORCID 0009-0007-4203-6748

Чернухин Станислав Алексеевич – кандидат технических наук, доцент,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург;
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: Stas_chernuhin@mail.ru. ORCID 0000-0003-3423-6129

Svetlana V. Sitdikova – Senior Lecturer,
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.
Email: siriniti.86@mail.ru

Vladimir S. Velikanov – DrSc(Eng.), Professor,
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia;
Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia;
Email: rzhik_00@mail.ru 0000-0001-5581-2733

Yuri N. Stroganov – PhD(Eng.), Associate Professor,
Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: iu.n.stroganov@urfu.ru ORCID 0009-0007-4203-6748

Stanislav A. Chernukhin – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia;
Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: Stas_chernuhin@mail.ru. ORCID 0000-0003-3423-6129

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

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

УДК 66.092-977

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-59-68



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА БУРОВОГО ШЛАМА

Валеева А.Р.^{1,2}, Хазиахмедова Р.М.¹, Валиуллина А.И.¹, Забелкин С.А.^{1,2},
Грачев А.Н.^{1,2}, Киселев Д.Ю.^{1,2}

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

²ООО «ТУ БИО», Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Рост объемов бурового шлама, образующегося при добыче нефти и газа, требует разработки эффективных методов его утилизации. Традиционные способы, такие как захоронение и инъекция в глубинные горизонты, сопряжены с экологическими рисками. Одним из перспективных методов переработки является пиролиз, обеспечивающий снижение токсичности отходов и извлечение ценных продуктов. **Цель работы.** Изучение процесса пиролиза бурового шлама и характеристика полученных продуктов. **Используемые методы.** В ходе экспериментов проведен анализ исходного сырья, выполнены термический анализ, пиролиз в лабораторной установке с неподвижным слоем при температуре 550°C, а также исследование состава и свойств продуктов пиролиза. Получены данные о материальном балансе, выходе жидкой и твердой фракций, а также газообразных продуктов. **Новизна работы.** Заключается в детальном исследовании химического состава пиролизной жидкости методом ГХМС, а также в оценке свойств твердого остатка. **Результаты.** Установлено, что органическая часть пиролизной жидкости на 62% состоит из алканов, что делает её пригодной для использования в качестве топлива. Твердый остаток, содержащий преимущественно минеральную часть шлама, может применяться в строительстве или в качестве сорбента. **Практическая значимость.** Данные, полученные в ходе исследования, подтверждают, что пиролиз является эффективным методом переработки бурового шлама с возможностью извлечения полезных продуктов, что способствует снижению экологического ущерба и оптимизации процессов нефтегазовой отрасли.

Ключевые слова: буровой шлам, пиролиз, утилизация отходов, термическая деструкция, вторичные продукты

© Валеева А.Р., Хазиахмедова Р.М., Валиуллина А.И., Забелкин С.А., Грачев А.Н., Киселев Д.Ю., 2025

Для цитирования

Исследование продуктов пиролиза бурового шлама / Валеева А.Р., Хазиахмедова Р.М., Валиуллина А.И., Забелкин С.А., Грачев А.Н., Киселев Д.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 59-68. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-59-68>



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

STUDY OF PYROLYSIS PRODUCTS OF BORING SLUDGE

Valeeva A.R.^{1,2}, Khaziakhmedova R.M.¹, Valiullina A.I.¹, Zabelkin S.A.^{1,2},
Grachev A.N.^{1,2}, Kiselev D.Y.^{1,2}

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

²TO BIO LLC, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The growing volume of boring sludge generated during oil and gas production requires the development of effective methods for its disposal. Traditional methods such as burial and injection into deep horizons are associated with environmental risks. One of the promising methods of waste recycling is pyrolysis, which reduces the toxicity of waste and allows to obtain valuable products. **Objectives** are to study the pyrolysis process of boring sludge and the characteristics of the resulting products. **Methods Applied.** During the experiments, the analysis of raw materials, thermal analysis, pyrolysis in a laboratory unit with a fixed layer at a temperature of 550°C, as well as the study of the composition and properties of pyrolysis products were carried out. Data on the material balance, the output of liquid and solid fractions, as well as gaseous products were obtained. **Originality.** It consists in a detailed study of the chemical composition of the pyrolysis liquid by gas chromatography, as well as in evaluating the properties of the solid residue. **Result.** It was found that the organic part of the pyrolysis liquid consists of 62% alkanes, which makes it suitable for use as a fuel. The solid residue, containing mainly the mineral part of the sludge, can be used in construction or as a sorbent. **Practical Relevance.** The data obtained during the study confirm that pyrolysis is an effective method of processing boring sludge with the possibility of extracting useful products, which helps reduce environmental damage and optimize the processes of the oil and gas industry.

Keywords: boring sludge, pyrolysis, waste utilization, thermal degradation, secondary products.

For citation

Valeeva A.R., Khaziakhmedova R.M., Valiullina A.I., Zabelkin S.A., Grachev A.N., Kiselev D.Y. Study of Pyrolysis Products of Boring Sludge. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 59-68. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-59-68>

Введение

На сегодняшний день нефтяная промышленность является неотъемлемой частью современной цивилизации. Однако при добыче нефти кроме ценных ресурсов выделяются большие объемы побочных продуктов, а именно буровых шламов. Согласно определению отраслевого стандарта (ОСТ 51.01-06-85), буровой шлам – это измельченная выбуренная порода, загрязненная остатками бурового раствора (ОБР). Данный вид отходов образуется в процессе бурения нефтяных и газовых скважин. Объемы этих отходов постоянно растут вместе с увеличением активности в нефтегазовой промышленности, что требует разработки эффективных методов их утилизации. Буровые шламы, как побочный продукт добычи нефти и газа, представляют проблему для экологии и человека. Потенциальное загрязняющее действие на окружающую среду в основном обусловлено содержанием токсичных компонентов. Большую часть бурового шлама составляют малоопасные компоненты, как правило, имеющие IV класс опасности, пластовые флюиды и выбуренная порода. Токсичность бурового шлама может сильно варьироваться от месторождения нефти. Различные месторождения содержат различный химический состав, что влияет на состав и характеристики бурового шлама. Опасность бурового шлама обусловлена наличием в его составе тяжелых металлов и опасных химических соединений, таких

как бензол, толуол, которые могут оказывать негативное влияние на здоровье человека [1, 2].

Традиционные методы утилизации буровых шламов, такие как складирование или инъекция в глубинные скважины, часто не обеспечивают полной очистки и могут привести к нежелательным экологическим последствиям, включая загрязнение почвы, воды и атмосферного воздуха. Поэтому важной задачей современной индустрии является поиск более эффективных методов утилизации и переработки данного вида отхода.

Для более глубокого понимания проблемы утилизации буровых шламов и поиска оптимальных решений были рассмотрены другие существующие подходы и методы. На сегодняшний день существует множество различных способов утилизации шлама, краткий обзор которых представлен в табл. 1.

Можно предполагать, что сжигание и пиролиз обеспечивают более высокую степень обезвреживания, но требуют значительных затрат. Биологические методы могут быть менее затратными, но их эффективность ограничена условиями окружающей среды. Переработка через смешивание с торфом или солидификацию может найти полезное применение в качестве производства строительных материалов, но требует контроля за выбросами вредных веществ. Захоронение является наиболее популярным и доступным методом, однако негативное воздействие на окружающую среду максимальное.

Таблица 1. Методы утилизации буровых шламов
Table 1. Boring sludge utilization methods

Методы утилизации	Разновидность метода
Термические	Сжигание в печах различной конструкции [3]
	Сушка, прогрев в печах различной конструкции [4]
	Высокотемпературный обжиг в печах различной конструкции [5]
Физические	Захоронение в специально отведённых местах, в глубоководные горизонты, в земляные амбары, шламохранилища и т.д. [6]
	Закачка в глубоководные горизонты, в образованные гидроразрывом пласта трещины [7]
Химические и физико-химические	Отверждение с применением неорганических (цемент, жидкое стекло, окись алюминия и др.) и органических (фенолформальдегидные смолы и др.) добавок с получением отверждённой смеси [8]
	Гидрофобизация поверхности шлама с помощью органических или растворимых высокомолекулярных соединений (сополимер малеиновый ангидрид с акриламидом, сополимер малеиновый ангидрид со стиролом) с последующим действием электролитов [9]
	Перемешивание бурового шлама с реагентом капсулирования [10]
	Смешение бурового шлама с торфом, песком, навозом, гипсом, портландцементом, известью, карбамидными и формальдегидными смолами и др. [11–13]
	Биодеструкция загрязняющих компонентов буровых отходов с помощью микроорганизмов (биоремедиация) [14]
Биологические	Рекультивация нарушенных земель [15]
	Смешение бурового шлама с гуминоминеральными концентратами [16]
	Безамбарное бурение [17, 18]
Комплексные	Переработка буровых шламов с максимальным учётом химических, физико-механических свойств и использованием всех составляющих, в результате которой отходы становятся сырьём, реагентами или наполнителями в процессе производства продукции и не оказывают отрицательного воздействия на окружающую природную среду [14]

Пиролизная переработка шламов привлекает пристальное внимание из-за наиболее полного удаления нежелательных компонентов, значительного уменьшения объёмов и возможности извлечения ресурсов. Метод пиролиза основан на нагреве органического материала, в данном случае бурового шлама, в отсутствие кислорода. Под воздействием высокой температуры органические вещества переходят в парогазовое состояние или разлагаются на более простые соединения с последующим переходом в парогаз [19, 20]. Далее часть парогазовой смеси конденсируется с получением жидкого продукта. Этот процесс проис-

ходит в специальных реакторах или печах. Полученные газы и жидкости могут быть использованы как топливо или химическое сырьё, а твёрдые продукты могут использоваться в различных областях либо могут быть утилизированы с меньшими затратами и меньшим негативным воздействием [21–23].

Цюаньвэй в своем исследовании [24] отметил, что выход газа увеличивается с 2,55 до 6,75% при повышении температуры с 450 до 600°C. Важно отметить, что выход нефти достигает максимума (14,94%) при температуре 500°C, а затем снижается до 12,10% при 600°C. На основании полученных результатов было решено проводить пиролиз органической биомассы при температуре 500°C для оптимизации выхода нефтепродуктов.

В другом своем исследовании Цюаньвэй и др. [25] обратили внимание на влияние температуры и использование катализаторов на процесс пиролиза бурового шлама, в частности на извлечение нефти. Результаты подтвердили, что температура пиролиза играет ключевую роль в формировании конечных продуктов, и оптимальная температура составляет 500°C для достижения максимального выхода нефти. Кроме того, обнаружили, что каталитический пиролиз, особенно при использовании катализатора, такого как CaO, приводит к увеличению содержания нефтепродуктов и значительному улучшению их качества. Это проявляется в увеличении содержания алканов и снижении гетероатомных соединений в нефти. Особый интерес вызывает увеличение содержания лёгких углеводородов после каталитического пиролиза с добавлением CaO, что делает нефть более перспективным в качестве топлива.

Исследователи из Казахстана провели определение элементного состава твёрдого остатка пиролиза бурового шлама. Из полученных данных видно, что основой служат карбонаты, такие как карбонат кальция. Содержание в составе остатка твёрдых металлов не обнаружено, что подтверждает низкий класс опасности твёрдых продуктов пиролиза. Также в своем исследовании они указали возможность использования твёрдого остатка в качестве адсорбента за счёт неплохих показателей площади удельной поверхности и крупных размеров пор [26].

Студенты ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» в своей работе выяснили, что пиролиз бурового шлама при температуре 450–600°C позволит получить до 6,3% углеводородных фракций, на 95% состоящих из парафино-нафтеновых углеводородов. Твёрдые продукты пиролиза являются нетоксичными и не содержат тяжёлых металлов. Всё это в совокупности показывает перспективность процесса пиролиза как метода утилизации бурового шлама. Максимальный предел удаления углеводородов из проб бурового шлама достигается при температурах выше 450°C и далее их количество изменяется незначительно [27].

Цзебан Ся и др. исследовали совместный пиролиз ПВХ и бурового шлама. Результаты анализа продуктов пиролиза показали, что добавление отходов ПВХ увеличивает долю углеводородов в продуктах пиролиза бурового шлама, особенно при производстве алканов. Кроме того, добавление отходов ПВХ может в определенной степени снизить образование SO_2 в пиролизном газе бурового шлама [28].

Сянгле Чен и др. исследовали влияние твердых продуктов пиролиза бурового шлама на здоровье человека. Содержание золы составило 84,38%, а содержание углеводородов нефти превышало контрольные значения, что представляет потенциальную опасность для здоровья человека. Обнаружены также высокие уровни тяжелых металлов, включая свинец, хром, цинк, медь и мышьяк, превышающие фоновые значения почвы, особенно остро выделялся цинк. Однако при использовании остатков пиролиза для строительных целей был выявлен низкий уровень экологического риска, хотя для детей могут существовать неканцерогенные риски, особенно связанные с содержанием свинца [29].

Метод пиролиза привлекает всё больше внимания как потенциально перспективный способ утилизации буровых шламов. Пиролиз может позволить преобразовать отходы в полезные жидкие и твердые продукты, которые могут быть использованы в других областях. Также преимуществом данного метода является минимизация негативного воздействия на окружающую среду.

Таким образом, данная статья направлена на рассмотрение метода пиролиза как способа утилизации бурового шлама, оценку потенциала этого метода для решения актуальной проблемы в нефтегазовой промышленности.

Материалы и методы исследования

Буровой шлам представляет собой густую текучую коричневую мелкозернистую жидкость - смесь породы и бурового раствора. Исследуемый буровой шлам был образован на Уренгойском месторождении. При хранении расслаивается и на поверхности образуется маслянистый слой раствора.

Был проведён анализ свойств бурового шлама. Влажность образцов измерялась при помощи волюмометрического титратора серии V20, марки Mettler Toledo, результатом измерений является массовая доля воды в образце, выражающаяся в процентах. Теплота сгорания определялась при помощи калориметра марки ИКА серии 5000.

Зольность шлама определялась согласно ГОСТ Р 55661-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение зольности». Навеска массой 1 г помещалась в заранее прокаленные при 815°C тигли, после чего помещалась в муфельную печь и равномерно в течение 60 мин нагревалась до 500°C с последующей выдержкой при этой температуре в течение 30 мин. После этого повышали температуру до 815°C и выдерживали в течение 1 ч при достижении температуры.

Определение содержания летучих веществ и нелетучего углерода проводилось согласно ГОСТ Р 55660-2013 «Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ». Навеска массой 1 г помещалась в заранее прокаленные тигли с притёртыми крышками и помещалась в муфельную печь, нагретую до 900°C , и выдерживалась в течение 7 мин. После чего доставалась из печи, охлаждалась в течение 5 мин и помещалась в эксикатор.

Для оценки параметров термического разложения сырья был проведён его термический анализ. Для этого использовался термоанализатор NETZSCH STA 449 C. Для исследования образцов использовались керамические тигли. Эксперименты проводились в среде аргона, скорость нагрева составляла $10^\circ\text{C}/\text{мин}$. Предварительно образец выдерживался при температуре 30°C до достижения состояния равновесия. Для этого в течение 5 мин поддерживался изотермический режим. После этого температура с заданной скоростью повышалась до 900°C . Затем вновь в течение 5 мин поддерживался изотермический режим. Скорость подачи газа составляла 100 мл/мин.

Химический состав жидких продуктов пиролиза определялся методом газовой хроматографии – масс-спектрометрии ГХМС на установке GCMS-QP2010 фирмы «Shimadzu» на колонке HP-1 MS.

Пиролиз проводился на лабораторной установке с неподвижным слоем. Установка состоит из реторты, муфельной печи, холодильника и приёмной колбы (рис. 1). Стенд состоит из муфельной печи 1, имеющей камеру нагрева 3, реторту 4, табло 2 и регулятор нагрева 5, сборника пиролизной жидкости 6 и гидрозатвора 7.

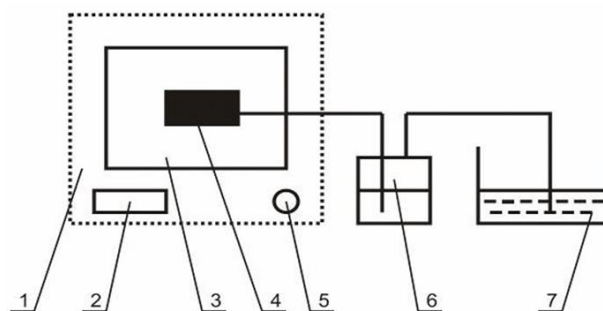


Рис. 1. Схема лабораторной установки пиролиза
Fig. 1. Schematic diagram of the laboratory pyrolysis unit

Исследования термического разложения бурового шлама проходили следующим образом. Предварительно выдержанный при комнатной температуре и хорошо перемешанный образец помещался в цилиндрическую металлическую реторту. Реторта устанавливалась в муфельную печь при комнатной температуре и нагревалась до 550°C со скоростью $5^\circ\text{C}/\text{мин}$ до прекращения конденсации пиролизной жидкости и до практически полного выделения газа. Выходной патрубок реторты присоединялся к водяному холодильнику, на котором была установлена приёмная

колба. После холодильника устанавливалась ловушка для сбора пролетевших паров. При нагреве образцов начинается процесс термического разложения с образованием парогазовой смеси. Далее парогазовая смесь проходит через холодильник, где происходит конденсация жидких продуктов пиролиза. В результате эксперимента был сделан замер выхода жидких и твёрдых продуктов, выход газообразных продуктов рассчитывался по остатку. Для расчета выхода продуктов пиролиза бурового шлама использовались данные 7-ми циклов пиролизом при одинаковых условиях.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты анализа свойств исходного бурового шлама представлены в **табл. 2**. Как видно из данных, буровой шлам в большей степени состоит из минеральной части, о чем свидетельствует высокий процент зольности.

Таблица 2. Свойства исходного бурового шлама
Table 2. Properties of initial boring sludge

Показатель	Значение
Влажность, %	5,9
Зольность, %	65,3
Летучие вещества, %	25,7
Нелетучий углерод, %	9
Остаток при 815°C	74,1
Остаток при 900°C	74
Теплота сгорания, кДж/кг	9020

В ходе исследования были получены продукты пиролиза – пиролизная жидкость и твёрдые продукты. Пиролизная жидкость имеет два слоя: нижний слой – прозрачный светло-жёлтый, верхний слой – мутный темно-жёлтый. Со временем верхняя часть пиролизной жидкости темнеет и становится красновато-коричневого цвета в связи с процессами окисления (**рис. 2, а**).

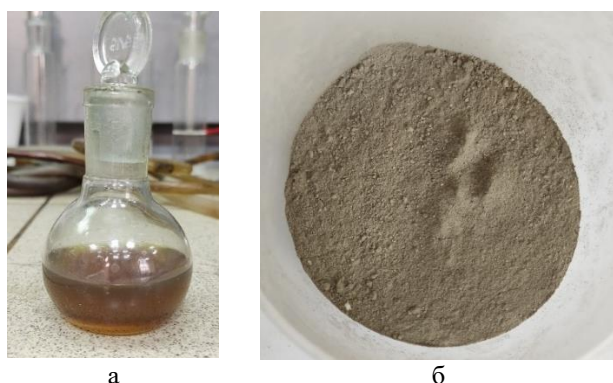


Рис. 2. Продукты пиролиза бурового шлама:
а – пиролизная жидкость;
б – твёрдые продукты

Fig. 2. Boring sludge pyrolysis products: a is pyrolysis liquid; b is solid products

Твёрдый остаток представляет собой мелкодисперсный порошок серого цвета. В процессе пиролиза сильно налипает на стенки реторты, что представляет собой сложность для качественного вычищения реактора после пиролиза.

Был составлен усредненный материальный баланс процесса пиролиза бурового шлама (**табл. 3**).

Таблица 3. Материальный баланс пиролиза бурового шлама

Table 3. Material balance of boring sludge pyrolysis process

Образец	Выход продуктов пиролиза, %		
	Твёрдые продукты	Пиролизная жидкость	Газ (по остатку)
Буровой шлам	74,13	23,44	2,42

Пиролизная жидкость образца была разделена на фракции (верхнюю и нижнюю) для определения процентного соотношения верхней и нижней фракции в пиролизной жидкости. Верхняя фракция составила 81,59% массы пиролизной жидкости, нижняя – 18,40%.

Была измерена влажность каждой фракции и теплота сгорания верхней фракции (**табл. 4**).

Таблица 4. Свойства пиролизной жидкости бурового шлама

Table 4. Properties of pyrolysis fluid of boring sludge

Образец	Влажность, %		Теплота сгорания, Дж/г
	Нижняя фракция	Верхняя фракция	Верхняя фракция
Жидкий продукт пиролиза бурового шлама	94,05	0,21	44 276

Теплота сгорания нижней фракции не замерялась из-за высокого содержания воды.

Результаты анализа химического состава органической части жидких продуктов пиролиза буровых шламов методом ГХМС представлены на **рис. 3**.

Из представленной таблицы видно, что буровой шлам содержит разнообразные углеводороды преимущественно алканового ряда (62,46%), в меньшей степени представлены углеводороды класса циклоалканов (2,17%) и алкенов (2,49%). Также отмечается незначительное содержание ароматических углеводородов (толуол, нафталин), жирные кислоты и стероиды.

Согласно данным ГХМС (**рис. 3**), наибольшее содержание имеет тридекан, 6-метил – 21,6%, октан, 2,4,6-триметил – 10,23% и гептокозан – 9,2%.

Также проведен технический анализ угля бурового шлама. Полученные результаты представлены в **табл. 5**.

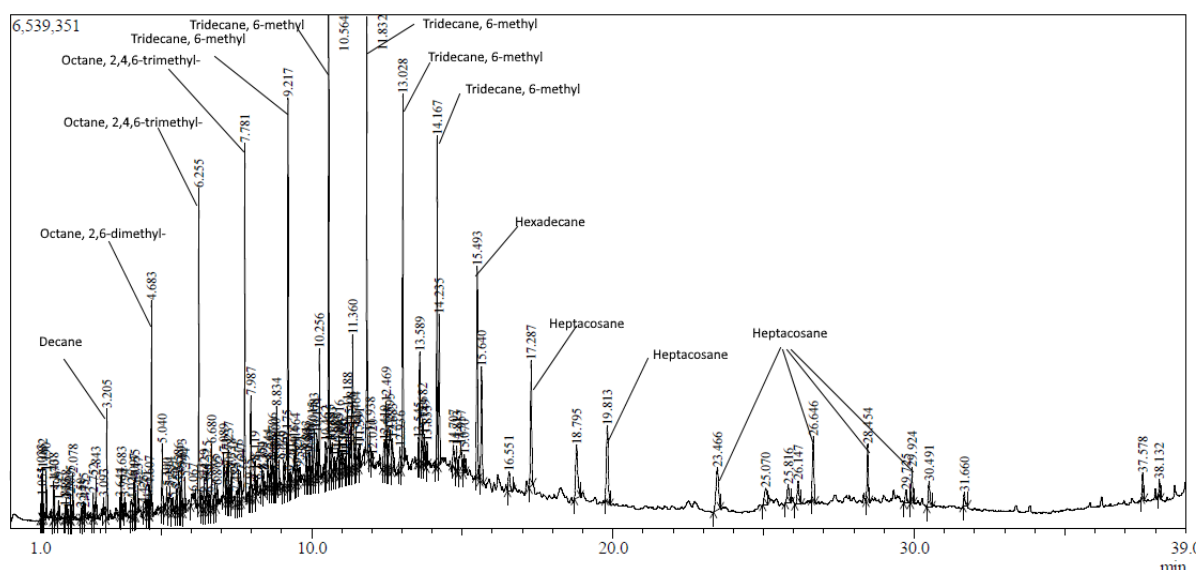


Рис. 3. Химический состав верхней органической части пиролизной жидкости бурового шлама
Fig. 3. Chemical composition of the upper organic part of the pyrolysis fluid of boring sludge

Таблица 5. Свойства твердого продукта пиролиза бурового шлама
Table 5. Properties of solid product of boring sludge pyrolysis

Показатель	Значение
Зольность	92,89
Летучие вещества, %	6,38
Нелетучий углерод, %	0,72

На основании этих результатов можно сделать выводы, что жидкий продукт пиролиза бурового шлама с выходом 23,39% содержит достаточно широкий спектр углеводородов, что указывает на его потенциал в качестве источника сырья для различных промышленных процессов. Высокое содержание длинноцепочечных алканов предполагает возможность использования органической части пиролизной жидкости бурового шлама в качестве топлива, что подтверждается высоким значением теплоты сгорания верхней органической части.

Твёрдый продукт пиролиза является основным продуктом процесса (75,24%), не имеет запаха, достаточно инертен, в виду температурной обработки не содержит патогенных компонентов. Можно предположить, что зола твердого продукта пиролиза бурового шлама в основном состоит из минеральной части выбуренной породы и не является инородным токсичным веществом для почв.

Закключение

В лабораторных условиях был проведен пиролиз бурового шлама, в ходе которого были получены и отобраны жидкие и твёрдые продукты. Пиролизная жидкость состоит на более чем 80% из органических соединений, из которых 61% составляют углеводоро-

ды класса алканов. Данная органическая часть предлагается для использования в качестве топлива для запуска и поддержания процесса пиролиза, что позволяет промышленной установке пиролиза работать автономно на местах бурения скважин. Неорганическая нижняя часть пиролизной жидкости на более чем 94 % состоит из воды, которую можно повторно применять при приготовлении буровых растворов.

Твёрдые продукты пиролиза буровых шламов могут быть использованы в различных областях, например в строительстве, в качестве добавок к строительным материалам, таким как бетон или асфальт. В сельском хозяйстве они могут использоваться как удобрения или почвообразующие материалы благодаря содержанию питательных веществ и минералов, но только после оценки содержания токсичных соединений и тяжёлых металлов. Помимо этого, простое захоронение твёрдых продуктов пиролиза буровых шламов несёт в себе значительно меньшую нагрузку на окружающую среду, так как является инертным элементом выбуренной породы.

Различные методы утилизации буровых шламов имеют свои преимущества и ограничения. Пиролиз бурового шлама представляет собой перспективный способ переработки, позволяющий получить вторичные продукты с высокой эффективностью. Помимо этого, пиролиз позволяет значительно снизить объём отхода и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. Процесс пиролиза может быть экономически оправдан за счёт возможности использования жидких продуктов для поддержания процесса или для выработки энергии для других целей.

Для дальнейших исследований и практического применения метода пиролиза для утилизации буровых шламов планируется фронт работ, связанных с подбором оптимальных условий пиролиза для повы-

шения выхода ценных продуктов. Важно провести оценку содержания тяжёлых металлов в твёрдом продукте и присвоения класса опасности. Также требуется дать более точную оценку экономической эффективности процесса пиролиза и разработать модели для оценки затрат и потенциальной прибыли, исследовать возможности использования полученных продуктов в различных отраслях промышленности, таких как энергетика, строительство и химическая промышленность.

Список источников

1. Оценка токсичности буровых шламов / Л.П. Капелькина, М.В. Чугунова, Т.В. Бардина и др. // Токсикологический вестник. 2013. №6 (123). С. 46-51.
2. Климова А.А., Язиков Е.Г., Азарова С.В. Содержание химических элементов и оценка токсичности бурового шлама нефтяных месторождений Томской области // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах: материалы III Международной школы-семинара молодых исследователей. Тюмень: Тюменский государственный университет, 2018. С. 353-356.
3. Картушина Ю.Н., Кваша К.А., Аракчеева А.Н. Утилизация буровых шламов с использованием минеральных сорбентов // Инновации и инвестиции. 2023. №6. С. 156-159. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-burovyh-shlamov-s-ispolzovaniem-mineralnyh-sorbentov> (дата обращения: 02.04.2024).
4. Пат. 48979 Российская Федерация, МПК C02F 11/00. Установка для сушки и обжига бурового шлама / С.А. Шакиров; заявитель и правообладатель «Шакиров Салават Ахатович». № 2005120407/22; заявл. 30.06.2005; опубл. 10.11.2005.
5. Пат. 87107 Российская Федерация, МПК B09B 3/00. Комплекс двойного обезвреживания и утилизации бурового шлама / В.М. Горин, М.К. Кабанова, И.К. Казмалы [и др.]; заявитель и патентообладатель ЗАО «НИИКерамзит». № 2009122099/22; заявл. 10.06.2009; опубл. 27.09.2009.
6. Пат. 2422347 Российская Федерация, МПК B65G 5/00. Способ подземного захоронения буровых отходов в многолетнемерзлых породах / Н.А. Гафаров, А.А. Рябokonь, О.И. Савич [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО «Подземгазпром». № 2009148161/03; заявл. 25.12.2009; опубл. 27.06.2011.
7. Прогнозное моделирование гидравлического разрыва пласта алюмосиликатными пропантантами, изготовленными на основе буровых шламов / Третьяк А.А., Яценко Е.А., Доронин С.В., Борисов К.А., Кузнецова А.В. // Известия ТПУ. 2023. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proгнозное-modelirovanie-gidravlichesкого-razryva-plasta-alyumosilikatnymi-propantami-izgotovlennymi-na-osnove-burovyh-shlamov> (дата обращения: 02.04.2024).
8. Малиновская Л.В., Перевалов С.Н. Комплексный подход к обезвреживанию высокоминерализованных отходов бурения // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 3. С. 27-31.
9. Пичугин Е.А. Закономерности получения стабилизированных геоэкологически устойчивых грунтовых смесей на основе буровых шламов: дис. ... канд. тех. наук. Пермь, 2019. 183 с.
10. Воробьева С.Ю., Шпинькова М.С., Мерициди И.А. Переработка нефтешламов, буровых шламов, нефтезагрязненных грунтов методом реагентного капсулирования // Территория Нефтегаз. 2011. №2. С. 68-71. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pererabotka-nefteshlamov-burovyh-shlamov-neftezagryaznennyh-gruntov-metodom-reagentnogo-kapsulirovaniya> (дата обращения: 02.04.2024).
11. An effective treatment method for shale gas drilling cuttings solidified body / Liu DS, Wang CQ, Mei XD, Qian-Huang, Ding SM // Environ Sci Pollut. 2019, no. 26(17), pp. 17853-17857. DOI: 10.1007/s11356-019-05273-0
12. Utilization of oil-based mud drilling cuttings wastes from shale gas extraction for cement clinker production / Lai H, Lv S, Lai Z, Liu L, Lu Z. // Environ Sci Pollut. 2020, no. 27(26), pp. 33075-33084. DOI: 10.1007/s11356-020-09541-2.
13. The use of oil-based mud cuttings as an alternative raw material to produce high sulfate-resistant oil well cement / Abdul-Wahab S. A. et al. // Journal of cleaner production. 2020, 269, 122207.
14. Оценка воздействия на компоненты окружающей среды буровых шламов, накопленных на нефтегазовых месторождениях, и прогноз изменения качества окружающей среды при их утилизации: отчет о НИР / Б.Е. Шенфельд, В.Е. Шапкин, Н.В. Костылева и др. Пермь: ФГБУ УралНИИ «Экология». 2014. 282 с.
15. Пат. 2491135 Российская Федерация, МПК B09B 1/00. Смесь почвенная шламово-грунтовая (варианты) для рекультивации нарушенных земель и способ рекультивации карьеров и нарушенных земель / И.Н. Кольцов, Н.Г. Митрофанов, В.С. Петухова, Л.Н. Скипин; патентообладатель ООО «Салым Петролеум Девелопмент». № 2011152564/13; заявл. 23.12.2011; опубл. 27.08.2013.
16. Мельник И. В., Чиник И. И. Детоксикация отработанных буровых растворов и буровых шламов // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2008. № 3. С. 166-169.
17. Чуктуров Г.К., Санников Р.Х., Багаутдинов Р.Р. Безамбарное бурение как способ решения экологических проблем // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2012. № 11. С. 36-40.
18. Комплексная система обработки и утилизации буровых шламов при помощи фильтрующих оболочек / Н.А. Сафонова, О.В. Тупицына, К.Л. Чертес и др. // Экология и промышленность России. 2013. № 7. С. 11-17.
19. Синтез и свойства фенолоформальдегидных смол из продуктов термической переработки древесины / Валиуллина А.И., Грачев А.Н., Валеева А.Р. и др. // Клеи. Герметики. Технологии. 2022. № 5. С. 2-11. DOI: 10.31044/1813-7008-2022-0-5-2-111
20. Переработка отходов скорлупы фундука методом быстрого абляционного пиролиза / А.И. Валиуллина, А.Р. Валеева, С.А. Забелкин и др. // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 3(55). С. 111-115. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-3-111-115

21. Effect of molar ratios of phenol, formaldehyde, and catalyst on the properties of phenol-formaldehyde resin with partial replacement of synthetic phenol with depolymerized lignocellulose biomass / A.I. Valiullina, A.R. Valeeva, S.A. Zabelkin [et al.] // Biomass Conversion and Biorefinery. 2021. DOI: 10.1007/s13399-021-02071-y.
22. Валеева А.Р. Применение жидких продуктов быстрого пиролиза древесных отходов в качестве компонента фенолоформальдегидных смол: специальность 05.21.03 «Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины»: дис. ... канд. техн. наук / Валеева Айгуль Раисовна. Казань, 2022. 155 с.
23. The Use of Biopolyols Obtained from Liquid Birch Sawdust Pyrolysis Products as a Renewable Component in the Production of Rigid Polyurethane Foams / A.I. Valiullina, A.N. Grachev, A.R. Valeeva [et al.] // Polymer Science, Series D. 2022, vol. 15, no. 2, pp. 300-305. DOI: 10.1134/S1995421222020307.
24. Catalytic pyrolysis of oil-based drill cuttings over metal oxides: the product properties and environmental risk assessment of heavy metals in char / Lv Q. et al. // Process Safety and Environmental Protection. 2022. T. 159. С. 354-361.
25. Lv Q. et al. Pyrolysis of oil-based drill cuttings from shale gas field: Kinetic, thermodynamic, and product properties // Fuel. 2022, vol. 323, pp. 124332.
26. Ержанова Н.С., Кузьмина Р.И., Кунашева З.Х. Исследование свойств твердого остатка пиролиза бурового шлама // Вестник Технологического университета. 2021. Т. 24, № 6. С. 64-68.
27. Иванов А.В., Вильдяйкин С.Н., Истомин Ю.А. Оценка возможности утилизации бурового шлама пиролизом // Молодой ученый года – 2022: сборник статей II Международного научно-исследовательского конкурса. Пенза: Наука и Просвещение, 2022. С. 18-22.
28. Co-pyrolysis of waste polyvinyl chloride and oil-based drilling cuttings: Pyrolysis process and product characteristics analysis / Xia Z. et al. // Journal of Cleaner Production. 2021, vol. 318, pp. 128521.
29. Oil-based drilling cuttings pyrolysis residues at a typical shale gas drilling field in Chongqing: pollution characteristics and environmental risk assessment / Chen X. et al. // Environmental Geochemistry and Health. 2023, vol. 45, no. 6, pp. 2949-2962.
3. Kartushina Yu.N., Kvasha K.A., Arakcheeva A.N. Utilization of drilling waste using mineral sorbents. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and Investments], 2023;(6):156-159. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-burovyh-shlamov-s-ispolzovaniem-mineralnyh-sorbentov> (Accessed April 2, 2024). (In Russ.)
4. Shakirov S.A. *Ustanovka dlya sushki i obzhiga burovogo shlama* [Installation for drying and calcining drilling waste]. Patent RF, no. 48979, 2005.
5. Gorin V.M., Kabanova M.K., Kazmaly I.K., et al. *Kompleks dvoynogo obezvrezhivaniya i utilizatsii burovogo shlama* [Complex for dual detoxification and utilization of drilling waste]. Patent RF, no. 87107, 2009
6. Gafarov N.A., Ryabokon A.A., Savich O.I., et al. *Sposob podzemnogo zakhoroneniya burovyykh otkhodov v mnogoletemerzlykh porodakh* [Method of underground disposal of drilling waste in permafrost]. Patent RF, no. 2422347, 2011.
7. Tretyak A.A., Yatsenko E.A., Doronin S.V., Borisov K.A., Kuznetsova A.V. Predictive modeling of hydraulic fracturing with aluminosilicate proppants made from drilling waste. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2023;3. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/proгнозноe-modelirovanie-gidravlicheskogo-razryva-plastalyumosilikatnymi-propantami-izgotovlennymi-na-osnove-burovyh-shlamov> (Accessed April 2, 2024). (In Russ.)
8. Malinovskaya L.V., Perevalov S.N. Comprehensive approach to the detoxification of highly mineralized drilling waste. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental Protection in the Oil and Gas Complex], 2015;3:27-31. (In Russ.)
9. Pichugin E.A. *Zakonomernosti polucheniya stabilizirovannykh geoeologicheskii ustoichivyykh gruntovykh smesei na osnove burovyykh shlamov*: diss. ... kand. tekhn. nauk [Patterns of obtaining stabilized geocologically stable soil mixtures based on drilling waste. Ph.D. dissertation]. Perm, 2019, 183 p. (In Russ.)
10. Vorobyeva S.Yu., Shpinkova M.S., Meritsidi I.A. Processing of oil sludge, drilling waste, and oil-contaminated soil by reagent encapsulation. *Territoriya Neftegaz* [Oil and Gas Territory], 2011;2:68-71. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/pererabotka-nefteshlamov-burovyh-shlamov-neftezagryaznennyh-gruntov-metodom-reagentnogo-kapsulirovaniya> (Accessed April 2, 2024). (In Russ.)
11. Liu D.S., Wang C.Q., Mei X.D., Qian-Huang, Ding S.M. An effective treatment method for shale gas drilling cuttings solidified body. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2019;26(17):17853-17857. DOI: 10.1007/s11356-019-05273-0.
12. Lai H., Lv S., Lai Z., Liu L., Lu Z. Utilization of oil-based mud drilling cuttings wastes from shale gas extraction for cement clinker production. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2020;27(26):33075-33084. DOI:10.1007/s11356-020-09541-2.
13. Abdul-Wahab S.A. et al. The use of oil-based mud cuttings as an alternative raw material to produce high sulfate-resistant oil well cement. *Journal of Cleaner Production*. 2020;269:122207.

References

1. Kapelkina L.P., Chugunova M.V., Bardina T.V., et al. Toxicity assessment of drilling waste. *Toksikologicheskii vestnik* [Toxicological Bulletin], 2013;6(123):46-51. (In Russ.)
2. Klimova A.A., Yazikov E.G., Azarova S.V. Chemical element content and toxicity assessment of drilling waste from oil fields in the Tomsk region. *Biogekhimiya khimicheskikh elementov i soedinenii v prirodnykh sredakh: materialy III Mezhdunarodnoi shkoly-seminara molodykh issledovatelei* [Biogeochemistry of Chemical Elements and Compounds in Natural Environments. Proceedings of the 3rd International School-Seminar for Young Researchers]. Tyumen: Tyumen State University, 2018, pp. 353-356. (In Russ.)

14. Shenfeld B.E., Shapkin V.E., Kostyleva N.V., et al. Otsenka vozeistviya na komponenty okruzhayushchey sredy burovnykh shlamov, nakoplenykh na neftegazovykh mestorozhdeniyakh, i prognoz izmeneniya kachestva okruzhayushchei sredy pri ikh utilizatsii [Assessment of the impact of drilling waste accumulated at oil and gas fields on environmental components and forecast of environmental quality changes during their utilization]. Perm: FGBU UralNII "Ekologiya", 2014, 282 p. (In Russ.)
15. Koltsov I.N., Mitrofanov N.G., Petukhova V.S., Skipin L.N. Smes pochvennaya shlamovo-gruntovaya (varianty) dlya rekultivatsii narushennykh zemel i sposob rekultivatsii karerov i narushennykh zemel [Soil-sludge mixture (variants) for reclamation of disturbed lands and method of quarry and disturbed land reclamation]. Patent RF, no. 2491135, 2013.
16. Melnik I.V., Chinik I.I. Detoxification of spent drilling fluids and drilling waste. *Neftegazovye tekhnologii i ekologicheskaya bezopasnost* [Oil and Gas Technologies and Environmental Safety], 2008;3:166-169. (In Russ.)
17. Chukturov G.K., Sannikov R.Kh., Bagautdinov R.R. Zero-discharge drilling as a solution to environmental problems. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more* [Construction of Oil and Gas Wells on Land and at Sea], 2012;(11):36-40. (In Russ.)
18. Safonova N.A., Tupitsyna O.V., Chertes K.L., et al. Comprehensive system for processing and disposal of drilling waste using filter shells. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2013;(7):11-17. EDN QDFEJH. (In Russ.)
19. Valiullina A.I., Grachev A.N., Valeeva A.R., et al. Synthesis and properties of phenol-formaldehyde resins from wood thermal processing products. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. [Adhesives. Sealants. Technologies], 2022;(5): 2-11. DOI: 10.31044/1813-7008-2022-0-5-2-111. (In Russ.)
20. Valiullina A.I., Valeeva A.R., Zabelkin S.A., et al. Processing of hazelnut shell waste by rapid ablative pyrolysis. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. [System. Methods. Technologies], 2022;3(55):111-115. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-3-111-115. (In Russ.)
21. Valiullina A.I., Valeeva A.R., Zabelkin S.A., et al. Effect of molar ratios of phenol, formaldehyde, and catalyst on the properties of phenol-formaldehyde resin with partial replacement of synthetic phenol with depolymerized ligno-cellulose biomass. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2021. DOI 10.1007/s13399-021-02071-y.
22. Valeeva A.R. Primenenie zhidkikh produktov bystrogo piroliza drevesnykh othodov v kachestve komponenta fenoloformaldegidnykh smol: dis. ... kand. tekhn. nauk [Application of liquid products of rapid pyrolysis of wood waste as a component of phenol-formaldehyde resins. Ph.D. dissertation]. Kazan, 2022, 155 p.
23. Valiullina A.I., Grachev A.N., Valeeva A.R., et al. The Use of Biopolyols Obtained from Liquid Birch Sawdust Pyrolysis Products as a Renewable Component in the Production of Rigid Polyurethane Foams. *Polymer Science, Series D*. 2022;15(2):300-305. DOI: 10.1134/S1995421222020307.
24. Lv Q., et al. Catalytic pyrolysis of oil-based drill cuttings over metal oxides: the product properties and environmental risk assessment of heavy metals in char. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022;159:354-361.
25. Lv Q., et al. Pyrolysis of oil-based drill cuttings from shale gas field: Kinetic, thermodynamic, and product properties. *Fuel*. 2022;323:124332.
26. Erzhanova N.S., Kuzmina R.I., Kunasheva Z.Kh. Study of the properties of solid residue from pyrolysis of drilling waste. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2021;24(6):64-68. EDN CRULFS. (In Russ.)
27. Ivanov A.V., Vildyaykin S.N., Istomin Yu.A. Assessment of the possibility of drilling waste disposal by pyrolysis. *Molodoy ucheniy goda 2022: Sbornik statei II Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa* [Young Scientist of the Year 2022. Proceedings of the 2nd International Scientific Research Competition]. Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2022, pp. 18-22. EDN SMWEMR. (In Russ.)
28. Xia Z., et al. Co-pyrolysis of waste polyvinyl chloride and oil-based drilling cuttings: Pyrolysis process and product characteristics analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2021;318:128521.
29. Chen X., et al. Oil-based drilling cuttings pyrolysis residues at a typical shale gas drilling field in Chongqing: pollution characteristics and environmental risk assessment. *Environmental Geochemistry and Health*. 2023;45(6):2949-2962.

Поступила 07.03.2025; принята к публикации 05.05.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 07/03/2025; revised 05/05/2025; published 30/09/2025

Валеева Айгуль Раисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры ХТД,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия;
ООО «ТУ БИО», Москва, Россия.
Email: a8695v@yandex.ru. ORCID 0000-0002-8656-7643

Хазиахмедова Римма Маратовна – старший преподаватель кафедры ХТД,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.
Email: rimmo4ka_0694@mail.ru. ORCID 0000-0002-9278-816X

Валиуллина Альмира Иршатовна – старший преподаватель кафедры ХТД,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.
Email: almi.sabirzyanova@yandex.ru. ORCID 0000-0003-0909-9126

Забелкин Сергей Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ХТД,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия;
ООО «ТУ БИО», Москва, Россия.
Email: szabelkin86@gmail.com. ORCID 0000-0003-1349-6669

Грачев Андрей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры ХТД
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия;
ООО «ТУ БИО», Москва, Россия.
Email: energolesprom@gmail.com. ORCID 0000-0001-9790-4564

Киселев Дмитрий Юрьевич – инженер кафедры ХТД,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия;
ООО «ТУ БИО», Москва, Россия.
Email: dmskkiselev@gmail.com.

Aigul R. Valeeva – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Wood,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
TO BIO LLC, Moscow, Russia.
Email: a8695v@yandex.ru. ORCID 0000-0002-8656-7643

Rimma M. Khaziakhmedova – Senior Lecturer of the Department of Chemical Technology of Wood,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
Email: rimmo4ka_0694@mail.ru. ORCID 0000-0002-9278-816X

Almira I. Valiullina – Senior Lecturer of the Department of Chemical Technology of Wood,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.
Email: almi.sabirzyanova@yandex.ru. ORCID 0000-0003-0909-9126

Sergey A. Zabelkin – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Wood,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia;
TO BIO LLC, Moscow, Russia.
Email: szabelkin86@gmail.com. ORCID 0000-0003-1349-6669

Andrey N. Grachev – DrSc(Eng.), Professor of the Department of Chemical Technology of Wood,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia;
TO BIO LLC, Moscow, Russia.
Email: energolesprom@gmail.com. ORCID 0000-0001-9790-4564

Dmitry Y. Kiselev – Engineer of the Department of Chemical Technology of Wood,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia;
TO BIO LLC Moscow, Russia.
Email: dmskkiselev@gmail.com.



О РАЗРАБОТКЕ И ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ НАУЧНОГО ПОДХОДА К ПРИМЕНЕНИЮ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ В ЛИТЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Грачев А.Н., Леушин И.О., Манцеров С.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Литейное производство отличается значительным потреблением ресурсов. Использование для его нужд дорогих материалов, преимущественно импортных, значительно повышает себестоимость отливок. Вместе с тем в литейных технологиях до сих пор мало востребованы промышленные отходы, составы которых позволяют им выступать недорогой альтернативой широко применяемым. Значительный объем работ на данную тематику не затрагивает вопросы разработки обобщенного порядка работы с отходами для нужд литейного производства. **Цель работы.** Создание научных принципов применения промышленных отходов в литейных технологиях и их практическая реализация для ряда примеров. **Используемые методы.** В ходе работы применялись методы общенаучного познания (наблюдение, сравнение, эксперимент, анализ, синтез, обобщение, формализация, аналогия, моделирование, гипотеза), математические операции над множествами, методики определения свойств отходов и изделий, полученных из них. **Результат.** Впервые разработан научный подход к применению промышленных отходов в литейных технологиях на основе системного анализа. **Практическая значимость.** Разработана база данных с примерами использования промышленных отходов в литейных технологиях и программы для ЭВМ («Выбор методик определения свойств отходов для применения в литейных технологиях», «Выбор направлений применения отходов в литейных технологиях»). Разработанный научный подход проверен на примерах использования в литейных технологиях: алюмошлака, шлама производства поливинилхлорида, абразивной пыли, боя керамических оболочек стального литья по выплавляемым моделям, шлама соляных закалочных ванн, шлама селитровых ванн, шлама закалочных баков, полупродукта переработки шламов селитровых ванн.

Ключевые слова: промышленные отходы, научный подход, утилизация, рециклинг, литейные технологии, система «промышленные отходы – литейные технологии», графическая модель, программы для ЭВМ, примеры реализации

© Грачев А.Н., Леушин И.О., Манцеров С.А., 2025

Для цитирования

Грачев А.Н., Леушин И.О., Манцеров С.А. О разработке и практической реализации научного подхода к применению промышленных отходов в литейных технологиях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 69-78. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-69-78>



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

ON THE DEVELOPMENT AND PRACTICAL IMPLEMENTATION OF A SCIENTIFIC APPROACH TO THE USE OF INDUSTRIAL WASTE IN FOUNDRY TECHNOLOGIES

Grachev A.N., Leushin I.O., Mantserov S.A.

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Problem statement (relevance). Foundry production is characterized by significant consumption of resources. The use of expensive materials for its needs, mainly imported, significantly increases the cost of castings. At the same time, industrial waste is still in little demand in foundry technologies, the compositions of which allow them to act as an inexpensive alternative to widely used ones. A significant amount of work on this topic does not affect the development of a generalized procedure for working with waste for the needs of foundry. **Objectives** are creating scientific principles for the use of industrial waste in foundry technologies and their practical implementation for a number of examples. **Methods Applied.** In the course of the work, methods of general scientific knowledge (observation, comparison, experiment, analysis, synthesis, generalization, formalization, analogy, modeling, hypothesis), mathematical operations on sets, methods for determining the properties of waste and products obtained from them were used. **Result.** For the first time, a scientific approach to the use of industrial waste in foundry technologies based on system analysis has been developed. **Practical Relevance.** A database with examples of the use of industrial waste in foundry technologies and computer programs (Selection of methods for determining the properties of waste for use in foundry technologies, Selection of directions for application of waste in foundry technologies) were developed. The developed scientific approach was tested using examples of use in foundry technologies: aluminum slag, sludge from the production of polyvinyl chloride, abrasive dust, breakage of ceramic casings of steel casting by molten models, sludge from salt quenching baths, sludge from nitrate baths, sludge from quenching tanks, intermediate product for processing sludge from nitrate baths.

Keywords: industrial waste, scientific approach, recycling, casting technologies, industrial waste – casting technologies system, graphic model, computer programs, implementation examples

For citation

Grachev A.N., Leushin I.O., Mantserov S.A. On the Development and Practical Implementation of a Scientific Approach to the Use of Industrial Waste in Foundry Technologies. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 69-78. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-69-78>

Введение

В настоящее время вопрос утилизации отходов производства продолжает оставаться актуальным в связи с тем, что подавляющее их большинство до сих пор вывозится на свалочные полигоны. Оплата услуг лицензированных организаций за вывоз отходов, штрафы за несанкционированное захоронение, расходы на расширение границ свалочных полигонов ежегодно составляют ощутимую часть бюджета промышленных предприятий. Другим немаловажным фактом является возможное содержание в захороняемых отходах полезных для повторного использования в различных отраслях промышленности компонентов.

Литейные технологии (ЛТ) как основу заготовительной базы машиностроения отличает значительное потребление ресурсов и, в частности, расходных материалов. Использование последних, преимущественно зарубежного производства, особенно в условиях параллельного импорта, значительно повышает стоимость отливки. В дешевых и функциональных материалах нуждаются процессы получения металли-

ческих расплавов, составы формовочных, стержневых и специальных смесей, покрытия различного назначения. Отметим, что составы некоторых промышленных отходов позволяют им выступать недорогой альтернативой широко применяемым в литейном производстве материалам, даже с учетом затрат на подготовку.

В начале работы был проведен информационно-аналитический обзор состояния вопроса, показавший актуальность выбранной темы. В частности, было отмечено ее соответствие концепциям охраны природы, ресурсосбережения и обращения с отходами, а также направлению «Внедрение наилучших доступных технологий» национального проекта «Экология». Помимо этого, в научных публикациях выявлен значительный интерес к ограничению образования техногенных отходов, разработке схем и способов получения из них вторичных материалов, рециклингу, утилизации. Особый интерес в трудах литейной тематики представляют подготовка к использованию и многочисленные примеры применения промышленных отходов в литейном производстве, организаци-

онные вопросы и пути их решения. Вместе с тем информационно-аналитический обзор выявил и основной недостаток работ по тематике применения отходов в литейном производстве в виде отсутствия системного подхода (классификаций, обобщенных схем, методик, порядка работы, рекомендаций, комплексных критериев и т.д.).

Публикации отечественных ученых ориентированы, прежде всего, на примеры использования конкретных отходов в литейном производстве [1–7] и их переработку [8].

В зарубежных публикациях тематике применения отходов литейного производства также уделяется большое внимание. В работе [9] описывается применение картирования технологических операций для сокращения отходов литейной промышленности. В статье [10] описывается управление отходами с позиции устойчивого развития и производства с нулевыми отходами, которое может поддерживаться рециркуляцией и многократным использованием отходов в другом процессе. Его целью является полная переработка отходов. В работе [11] говорится о необходимости перестройки литейной промышленности для максимального предотвращения загрязнений.

Материалы и методы исследования

В ходе выполнения информационно-аналитического обзора отмечено, что единый научный подход к выбору и применению промышленных отходов в ЛТ практически отсутствует, а в каждом конкретном примере задачи литейного производства были решены на основе глубоких теоретических знаний, практического опыта и научной интуиции исследователей.

В период проведения информационного поиска была сформирована база данных по примерам использования промышленных отходов в ЛТ. Ее использование позволяет экономить время на проведение литературного обзора при выполнении прикладных работ аналогичной тематики, а также избежать нежелательного плагиата при поиске новых технологических решений.

По причине многообразия промышленных отходов и отсутствия оригинальных методик исследования их свойств следующим этапом разрабатываемой научной темы стала формулировка рекомендаций по выбору методологической базы. В частности, для решения данной задачи рассмотрена применимость общенаучных методов, а также приведена попытка рекомендовать выбор конкретных методик на основе агрегатного состояния, принципах преобладания определенного элемента или соединения, функциональной принадлежности при использовании в ЛТ. В результате была разработана программа для ЭВМ «Выбор методик определения свойств отходов для применения в литейных технологиях».

В работе были сформулированы предпосылки для разработки новых авторских методик исследования

свойств отходов: достаточно большой объем; стабильный, качественный и узкоинтервальный количественный состав; материал не может быть соотнесен с известными, на определение свойств которых имеются стандартные методики; технологический процесс, дающий образование отходов, относительно стабилен, задействует одинаковые режимы и неизменный перечень сырья и расходных материалов.

Далее в ходе выполнения работы был рассмотрен объект «промышленные отходы – ЛТ». Отмечено, что с точки зрения процесса применения промышленных отходов в литейном производстве он является системой: открытой (по степени связи с внешней средой); искусственной (по происхождению); экономической (по виду отражаемого объекта); динамической (по отношению к движению); сложной; стохастической (по разворачиванию во времени последовательности реакции на внешние воздействия); целенаправленной (по наличию внутренних целей); технологической; большой (по размерности и множеству состояний).

Дальнейшая работа с системой «промышленные отходы – ЛТ» заключалась в моделировании, являющемся одним из наиболее распространенных способов их изучения [12]. Одной из разновидностей моделей являются графические, к которым относятся, в частности, блок-схемы. В рамках исследования разработана графическая модель системы «промышленные отходы – литейные технологии» (рис. 1).

На рис. 1: 1 – блок промышленных отходов; 1-1 – название и состояние отхода (1-1 – шлак; 1-2 – эмульсия, суспензия, пульпа, шлам; 1-3 – листы, куски, стружка, лом; 1-4 – пыль, щебень, гранулы); 1-5 и 1-6 – качественный и количественный анализы состава отхода соответственно; 1-7 – отнесение отхода к классу опасности (К.О.) для окружающей среды (по 89-ФЗ); 1-8 – выбор средств индивидуальной защиты при работе с отходом; 1-9 – условие «отход относится к витоопасному и экоопасному по ГОСТ 30772-2001, а также к I-му и II-му К.О.» (по 89-ФЗ); 1-10 – определение вредных веществ (В.В.) из перечня ГН 2.2.5.352-18, содержащихся в отходе и их К.О. по ГОСТ 12.1.007-76; 1-11 – условие «в отходе содержатся полезные для ЛТ компоненты» с учетом 2-4; 1-12 – условие «в отходе содержатся В.В. 1-го и 2-го К.О., не применяемые в ЛТ»; 1-13 – оценка показателей веществ, содержащихся в отходе, по ГОСТ 12.1.007-76; 1-14 условие «вещества в отходе обеспечивают допустимые значения показателей по ГОСТ 12.1.007-76»; 1-15 – разработка мероприятий по снижению содержания в отходе веществ, обеспечивающих недопустимые значения показателей 1-13; 1-16 – условие «мероприятия 1-15 осуществимы»; 1-17 – оценка затрат на реализацию мероприятий 1-15; 1-18 – условие «мероприятия 1-15 экономически эффективны»; 1-19 – реализация мероприятий 1-15; 1-20 – вывод о принципиальной возможности использования отхода в ЛТ; 1-21 – выявление функциональной принадлежности полезных компонентов отхода для ЛТ и формирование их предварительного перечня;

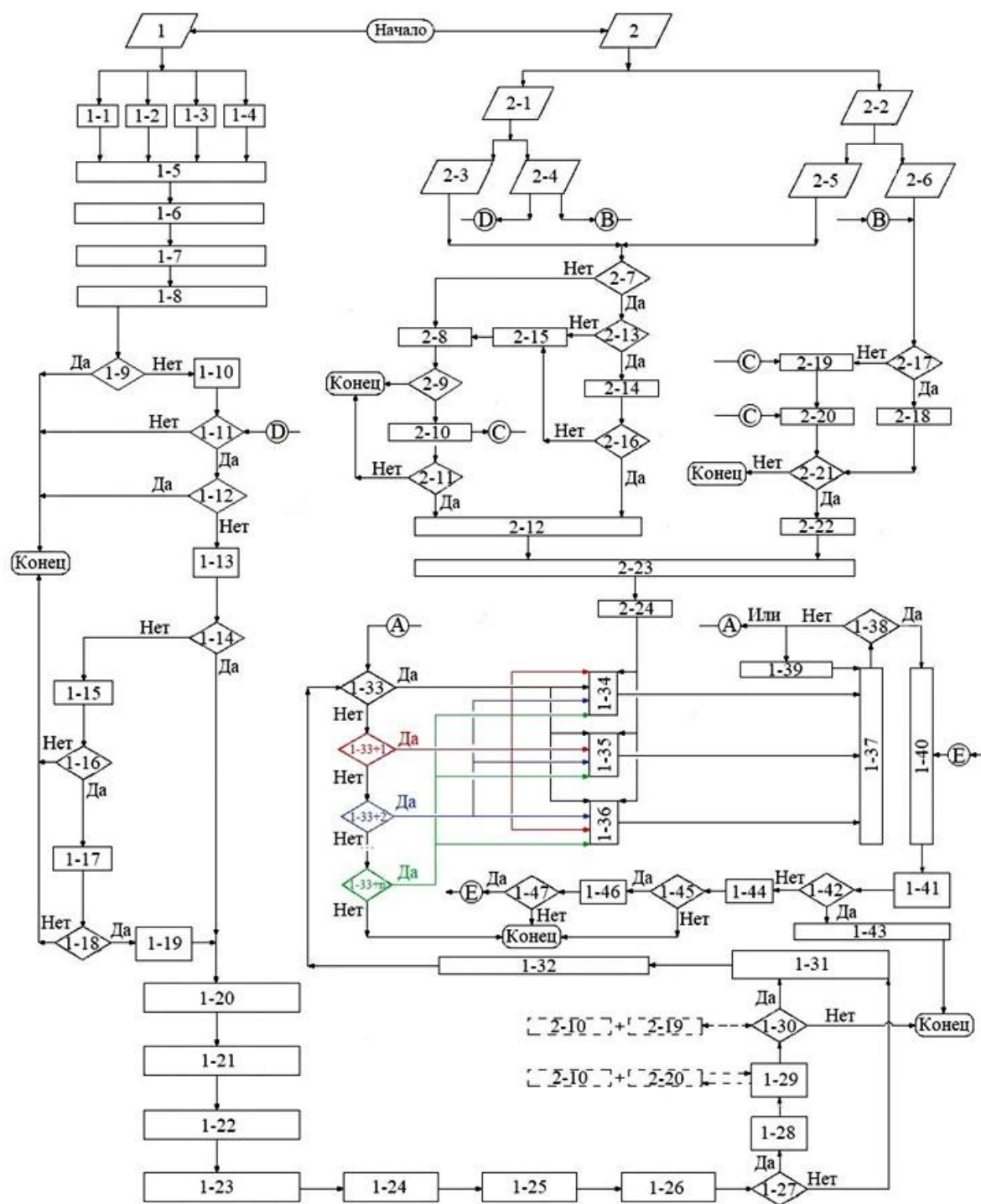


Рис. 1. Графическая модель системы «промышленные отходы – литейные технологии» – блок-схема применения промышленных отходов в литейных технологиях

Fig. 1. Graphic model of the industrial waste – casting technologies system – block diagram of the use of industrial waste in casting technologies

1-22 – выбор конкретной ЛТ для использования отхода на основе запросов производства; 1-23 – выявление механизмов работы в ЛТ полезных компонентов отхода; 1-24 – лабораторные испытания или расчеты свойств отхода; 1-25 – термодинамическая оценка

возможных физико-химических процессов при использовании отхода в ЛТ; 1-26 – разработка механизма работы отхода в выбранной ЛТ с учетом 1-24 и 1-25; 1-27 – условие «применение отхода не требует подготовки»; 1-28 – разработка мероприятий по под-

готовке отхода для использования в ЛТ; 1-29 – оценка затрат на реализацию ЛТ с использованием материалов, полученных из отхода 1-29 = (2-10 + 2-20); 1-30 – условие «затраты на реализацию ЛТ с применением отхода меньше, чем с традиционными материалами»; 1-31 – уточненный выбор ЛТ на основе анализа мероприятий по подготовке отхода; 1-32 – уточнение количественного вещественного состава отхода после подготовки к использованию в ЛТ; 1-33 – (1-33 + n) (где 1, 2, n – компоненты) – последовательная проверка наличия в готовом к использованию отходе компонентов в количествах, эффективных для ЛТ; 1-34 – 1-36 – выбор объектов исследования (1-34 – металлургические расплавы, 1-35 – смеси, 1-36 – покрытия) для применения подготовленного отхода; 1-37 – блок лабораторных испытаний материалов и/или изделий для ЛТ, полученных из отхода и опытных отливок; 1-38 – условие «результат достигнут»; 1-39 – корректировка ЛТ; 1-40 – промышленное опробование; 1-41 – определение содержания В.В. в воздухе рабочей зоны цеха; 1-42 – условие «содержание В.В. в воздухе рабочей зоны не превышает ПДК»; 1-43 – разработка рекомендована к внедрению; 1-44 – разработка мероприятий по снижению содержания В.В. в воздухе рабочей зоны до ПДК; 1-45 – условие «мероприятия 1-44 осуществимы»; 1-46 – оценка затрат на реализацию мероприятий 1-44; 1-47 – условие «реализация мероприятий 1-44 экономически эффективна»; 2 – блок ЛТ; 2-1 – существующие ЛТ; 2-2 – состояние базы предприятия-потребителя для реализации ЛТ; 2-3 – перечень оборудования для реализации ЛТ; 2-4 – перечни материалов для ЛТ и их состояние перед применением; 2-5 – перечень имеющегося на предприятии оборудования; 2-6 – применяемые в условиях производства материалы для ЛТ; 2-7 – условие «оборудование для реализации ЛТ имеется на производстве»; 2-8 – оценка стоимости приобретения оборудования; 2-9 – условие «затраты на приобретение оборудования и срок окупаемости приемлемы для предприятия»; 2-10 – оценка расходов на содержание и эксплуатацию оборудования; 2-11 – условие «затраты на содержание и эксплуатацию оборудования приемлемы»; 2-12 – решение о необходимости освоения ЛТ на предприятии с позиции обеспечения оборудованием; 2-13 – условие «имеющееся оборудование встраивается в процесс осваиваемой ЛТ»; 2-14 – расчет затрат на ввод имеющегося оборудования в технологический процесс осваиваемой ЛТ; 2-15 – решение о приобретении нового оборудования; 2-16 – условие «затраты 2-14 приемлемы для предприятия»; 2-17 – условие «предприятие применяет материалы, используемые в ЛТ»; 2-18 – решение о необходимости увеличения количества закупаемых материалов для освоения ЛТ; 2-19 – оценка затрат на традиционные материалы для реализации ЛТ; 2-20 – оценка затрат на материалы из отхода для реализации ЛТ; 2-21 – условие «затраты на реализацию ЛТ с применением

отхода меньше, чем с традиционными материалами»; 2-22 – решение о необходимости освоения ЛТ с применением отхода с точки зрения обеспеченности материалами; 2-23 – положительное решение об освоении ЛТ с применением отхода; 2-24 – выбор ЛТ для реализации на производстве.

В приведенном пояснении к **рис. 1** описание блоков ориентировано на порядок действий при движении:

– 1 – «от промышленного отхода», то есть когда поставлена задача использовать вполне конкретный отход для нужд литейного производства без привязки к какому-либо предприятию;

– 2 – «от литейной технологии», то есть когда поставлена задача на конкретном предприятии при реализации ЛТ для удешевления процесса производства литых заготовок использовать в качестве исходных материалов отходы или полученные из них продукты или вторичные материалы.

Приведенная схема, несмотря на громоздкость, с высокой долей вероятности может считаться универсальной, так как охватывает практически все возможные случаи оценки применения промышленных отходов в ЛТ с исключением витаопасных и экоопасных по ГОСТ 30772-2001. При этом возможны как положительные, так и отрицательные результаты.

На **рис. 2** представлен упрощенный вид графической модели «промышленные отходы – ЛТ», составленный из укрупненных элементов.

Соотношения элементов полного и упрощенного видов блок-схемы применения промышленных отходов в ЛТ приведены в **таблице**.

Следует отметить, что при оценке возможности применения промышленных отходов в литейном производстве данная блок-схема может быть использована частично в виде сочетаний отдельных блоков.

Это зависит от условий проведения работ и организационно-технической возможности их реализации на отдельных позициях блок-схемы.

Для оценки возможности применения промышленных отходов в ЛТ сформулированы и систематизированы известные требования к традиционно используемым для этих целей материалам.

Общие требования к материалам, используемым в ЛТ: 1) минимальная токсичность; 2) отсутствие или содержание влаги в технологически допустимых пределах; 3) минимальная гигроскопичность; 4) соответствие химического состава к применяемой ЛТ; 5) стабильность и однородность химического состава; 6) отсутствие или минимальное количество вредных примесей и нежелательных веществ; 7) отсутствие или содержание в технологически допустимых пределах посторонних включений; 8) отсутствие или содержание в технологически обоснованных и допустимых пределах органических веществ; 9) необходимый технически и технологически обоснованный размер частиц материалов.

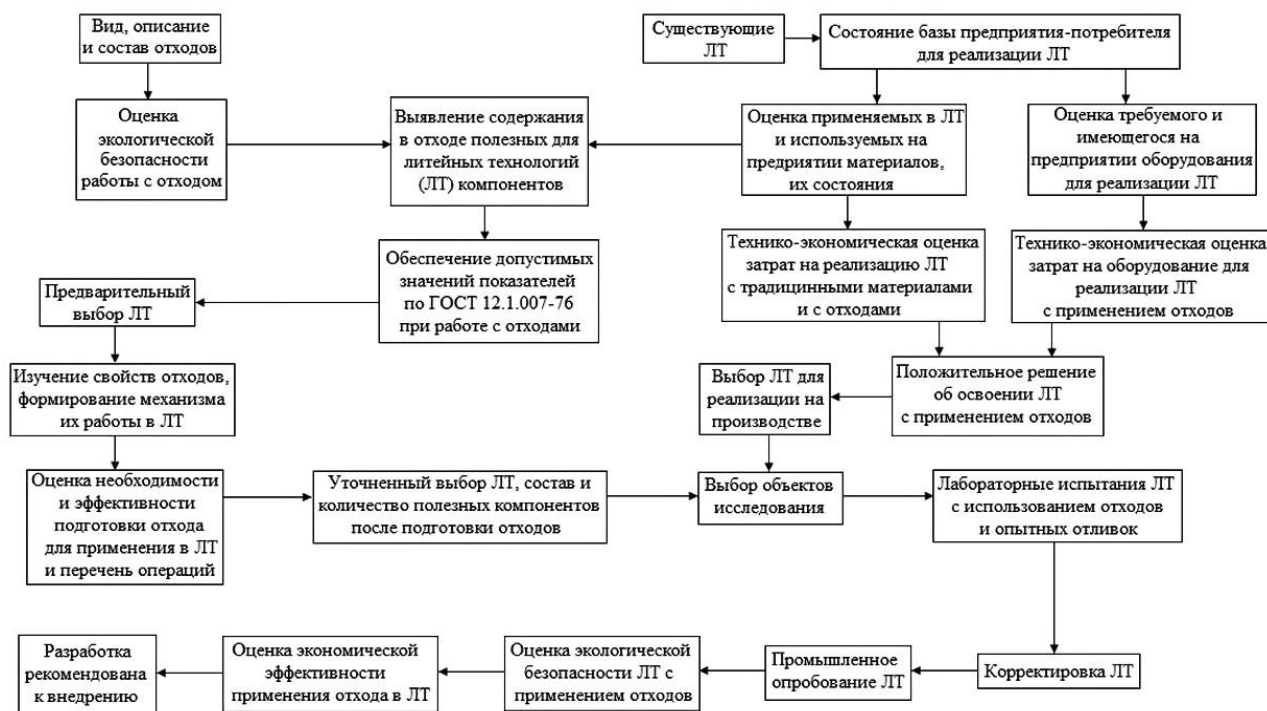


Рис. 2. Упрощенный вид блок-схемы применения промышленных отходов в литейных технологиях
Fig. 2. Simplified block diagram of industrial waste application in casting technologies

Таблица. Соотношения элементов на видах блок-схемы применения промышленных отходов в литейных технологиях

Table. Ratios of elements in the types of block diagram of the use of industrial waste in casting technologies

Элемент рис. 1	Элемент рис. 2
1-1 – 1-6	Вид, описание и состав отходов
1-7 – 1-10, 1-12	Оценка экологической безопасности работы с отходами
1-11	Выявление содержания в отходе полезных для ЛТ компонентов
1-13 – 1-19	Обеспечение допустимых значений показателей по ГОСТ 12.1.007-76 при работе с отходами
1-20 – 1-22	Предварительный выбор ЛТ
1-23 – 1-26	Изучение свойств отходов, формирование механизма их работы в ЛТ
1-27 – 1-30	Оценка необходимости и эффективности подготовки отхода для применения в ЛТ и перечень операций
1-31 – 1-33	Уточненный выбор ЛТ, состав и количество полезных компонентов после подготовки отходов
1-34 – 1-36	Выбор объектов исследования
1-37	Лабораторные испытания ЛТ с использованием отходов и опытных отливок
1-38 – 1-39	Корректировка ЛТ
1-40	Промышленное опробование ЛТ
1-41 – 1-42, 1-44 – 1-45	Оценка экологической безопасности ЛТ с применением отходов
1-43	Разработка рекомендаций к внедрению
1-46 – 1-47	Оценка экономической эффективности применения отхода в ЛТ
2-1	Существующие ЛТ
2-2	Состояние базы предприятия-потребителя для реализации ЛТ
2-3, 2-5, 2-7	Оценка требуемого и имеющегося на предприятии оборудования для реализации ЛТ
2-4, 2-6	Оценка применяемых в ЛТ и используемых на предприятии материалов, их состояния
2-8 – 2-16	Технико-экономическая оценка затрат на оборудование для реализации ЛТ с применением отходов
2-17 – 2-22	Технико-экономическая оценка затрат на реализацию ЛТ с традиционными материалами и с отходами
2-23	Положительное решение об освоении ЛТ с применением отхода
2-24	Выбор ЛТ для реализации на производстве

Так как основные направления потребления материалов в литейном производстве связаны с подготовкой металлического расплава и литейной формы, то специальные требования были сформулированы

для материалов, применяемых в них: для металлических шихтовых материалов, для карбюризаторов, для модификаторов-инокуляторов, для модификаторов – поверхностно-активных веществ, для флюсов, для

наполнителей формовочных и стержневых смесей, для связующих, для добавок (к растворителям, клеям, разделительным покрытиям, замазкам), к теплоизоляционным материалам и смесям, экзотермическим смесям, смесям с высокой теплопроводностью, к внешним и внутренним холодильникам.

Приведенные требования к материалам, применяемым в литейном производстве, используются в разработанном научном подходе для сравнения с аналогичными характеристиками исследуемых промышленных отходов. Их совпадение в первом приближении позволяет наметить возможность применения отходов взамен традиционно используемых материалов с известными механизмами работы. Несовпадение требований к материалам и характеристик отходов не означает, что отход не может быть использован, так как возможно, что следование блок-схеме позволит выявить особый, отличный от известных механизм работы.

Для того чтобы в начале выполнения подобных работ избежать лишних затрат на изучение, исследования и испытания, были сформулированы рекомендуемые критерии выбора отходов для ЛТ, в которых помимо реализованных в блок-схеме (см. **рис. 2**) отмечены: стабильность состава; происхождение и химическая активность; приборное и инструментальное сопровождение; удобство подготовки. Все критерии сопровождаются пояснениями и соотнесены с позициями блок-схемы на **рис. 2**.

Особое внимание в работе уделено изучению состава отходов для применения в ЛТ, предусматривающему поэлементный, покомпонентный и минералогический анализ в случаях: 1) поставки с предприятия-изготовителя сразу же после образования; 2) поставки со свалочных полигонов («лежалых отходов»); 3) после подготовки к использованию; 4) в процессе использования; 5) после использования (если эффект от применения отходов сохранился или получил дальнейшее развитие).

При получении отходов с предприятия-изготовителя следует уточнить состояние поставки (свежеобразованные или «лежалые»), так как они могут иметь разный состав и, следовательно, свойства. В случае работы с «лежалыми» отходами следует руководствоваться картами захоронений с указанием состава свалочных полигонов по площади и глубине. Обычно они составляются по предписанию служб экологического надзора, а также при поиске перспективных направлений использования отходов.

При захоронении на открытом воздухе отходы подвергаются выветриванию. Отходы испытывают физическое, химическое, биогенное и радиационное разрушения. При этом возможность протекания химических реакций в каждом конкретном случае следует оценивать методами термодинамики. В случаях 3–5 возможно образование дополнительных веществ. Образованные вещества для ЛТ могут: стать основой механизма работы отхода; усилить заложенный ис-

ходным составом отходов результат; оказать дополнительное положительное действие. При этом если после использования (случай 5) материал сохранил положительные качества для ЛТ, то цепочка 3–5 может быть зациклена до тех пор, пока применение отхода не перестанет быть экономически обоснованным.

Поэлементный анализ можно использовать для выявления перспективного для ЛТ элемента.

Покомпонентный анализ рассматривается, если «полезный» для ЛТ элемент отходов: 1) не встречается в свободном виде в природе и технике; 2) не может быть введен в чистом виде в силу высокой химической активности, более высокой температуры плавления, чем основной элемент обрабатываемого расплава и низкой скорости растворения в обрабатываемом расплаве; 3) в соединении обеспечивает больший комплексный эффект в ЛТ. В рамках покомпонентного анализа предполагается рассматривать наличие в отходах химических соединений простых и сложных, органических и неорганических, простых минералов и их механических смесей, в том числе стехиометрического состава.

Минералогический анализ состава отходов следует выделять при наличии особых условий их образования: высокие значения температуры, давления; специальные среды – окислительная, восстановительная, вакуум. В этом случае знание соотношений компонентов в отходах помогает предположительно выявить формулы минералов и в первом приближении оценить их свойства. Это важно, так как свойства минералов отличаются от свойств механической смеси их компонентов. Определить конкретные виды минералов позволяют морфологический анализ отходов с помощью микроскопии, текстурно-структурный, рентгенофазовый и рентгеноструктурный методы.

Важной составляющей блок-схемы применения промышленных отходов в ЛТ является изучение перечня применяемых в них материалов. Это соответствует позиции 2–4. В рамках проведенного анализа была систематизирована и представлена информация о материалах, используемых в ЛТ по элементам, соединениям и минералам. Соотнесение этой информации с данными по составу отходов (поэлементному, покомпонентному, минералогическому) позволяет выбрать полезные с точки зрения применения в ЛТ компоненты. Эта процедура была реализована в виде разработанной программы для ЭВМ «Выбор направлений применения отходов в литейных технологиях». Основой для разработки программы стали понятия математических множеств и операций над ними, в частности разности и пересечения. Данный подход может быть расширен для решения аналогичной задачи, но с учетом, например, технических, технологических и экономических ограничений. В работе также показаны схемы работы с множествами для таких вариантов.

Полученные результаты и их обсуждение

Практическая часть работы была посвящена реализации разработанного научного подхода к применению промышленных отходов в ЛТ.

Для проверки работоспособности блок-схемы (см. **рис. 1**) были использованы отходы: алюмошлак (код по федеральному классификационному каталогу отходов (ФККО) 3 55 220 01 29 4 – «Шлак печей переплава алюминиевого производства»), шлак производства поливинилхлорида (ПВХ) (код ФККО 2 32 210 02 39 5 – «Глинисто-солевые шламы»), абразивная пыль (код ФККО 3 61 221 02 42 4 – «Пыль (порошок) абразивные от шлифования черных металлов с содержанием металла менее 50%»), бой керамических оболочек стального литья по выплавляемым моделям (код ФККО 3 57 150 02 29 4 – «Керамические формы от литья черных металлов отработанные»), шлак соляных закалочных ванн (код ФККО 3 61 051 15 20 3 – «Отходы расплава хлоридов бария, калия и натрия закалочных ванн при термической обработке металлических поверхностей»), шлак селитровых ванн (код 3 61 051 32 20 4 – «Отходы расплава нитратов натрия и калия закалочных ванн при термической обработке металлических поверхностей»), шлак закалочных баков (код 3 61 058 12 39 3 «Отходы зачистки масляных закалочных ванн при термической обработке металлических поверхностей»), полупродукт переработки шламов селитровых ванн (Код 3 61 051 32 20 4 – «Отходы расплава нитратов натрия и калия закалочных ванн при термической обработке металлических поверхностей»). Эти отходы были выбраны по реальным запросам промышленных предприятий на их утилизацию, рециклинг или применение в собственном литейном производстве.

Разработаны технологические решения к применению выбранных отходов в ЛТ:

- алюмошлак – наполнитель противопожарных покрытий литейных форм и стержней для стального и чугунного литья;
- шлак производства ПВХ – формовочный материал и наполнитель зернистых фильтров для обработки алюминиевых расплавов;
- абразивная пыль – модифицирующая добавка в составе оболочковых форм стального ЛВМ;
- бой керамических оболочек стального ЛВМ – обсыпочный материал для ЛВМ, материал зернистых и пенокерамических фильтров для обработки алюминиевых расплавов;
- шлак соляных закалочных ванн – наполнитель зернистых и сетчатых фильтров для обработки алюминиевых расплавов;
- шлак селитровых ванн – технологическая добавка, ускоряющая воспламенение экзотермических смесей;
- шлак закалочных баков – окислитель в составах экзотермических смесей;

– полупродукт переработки шламов селитровых ванн – кислородсодержащее вещество при изготовлении оболочковых форм по технологии стального ЛВМ.

К числу основных публикаций по теме работы можно отнести [13–16].

По причине того, что материалы для ЛТ, полученные из отходов, практически не используются в литейном производстве, в том числе из-за отсутствия четких представлений об этапах и затратах на их подготовку, в работе приведена подробная оценка экономической эффективности по сравнению с традиционно применяемыми для этих нужд расходными материалами. В результате было получено, что применение промышленных отходов в ЛТ во всех случаях имеет положительный экономический эффект.

Экологическая оценка предложенных технических решений базировалась на методике расчета выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов. Для этого с точки зрения экологической безопасности были рассмотрены компоненты, входящие в составы выбранных отходов. Далее были определены концентрации вредных веществ при работе с отходами. Выявлено, что наибольшую опасность для здоровья человека могут представлять операции, связанные с их пересыпкой. В рамках проведенных исследований рассматривался максимальный разовый выброс (г/с). В результате получено, что значения концентраций вредных веществ, содержащихся в отходах, оказались значительно ниже предельно допустимых. Следует отметить, что при работе с отходами дополнительных мероприятий, кроме уже реализуемых в литейных цехах (специальная обувь и одежда, средства защиты органов дыхания, рук, лица, глаз, соблюдение мер личной гигиены, приточно-вытяжная вентиляция помещений, местные отсосы или укрытия с вытяжной вентиляцией в местах наибольшего пыления) не требуется.

В рамках практической реализации разработанного научного подхода также проведены лабораторные и промышленные испытания отходов, по результатам которых получены восемь патентов РФ на изобретения, пять актов опробования, два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Заключение

Разработан и реализован на практике научный подход к применению промышленных отходов в ЛТ, основанный на результатах системного анализа и включающий: анализ их составов и свойств, теоретическую и экспериментальную оценку применимости, термодинамический анализ возможных физико-химических процессов, выявление механизмов работы, оценку необходимости и разработку схем подготовительных операций, информацию об используемых в литейном производстве материалах, оценку экономической целесообразности, экологической

безопасности, технологичности, результаты лабораторных и промышленных испытаний.

Разработана база данных примеров использования промышленных отходов в ЛТ, а также алгоритмы и программы для ЭВМ: «Выбор методик определения свойств отходов для применения в литейных технологиях», «Выбор направлений применения отходов в литейных технологиях». Разработаны технологические решения к применению выбранных отходов в ЛТ. По результатам проведенных оценок показаны экологическая безопасность и экономическая эффективность разработанных технических решений с применением промышленных отходов в ЛТ.

Список источников

1. Исследование возможности использования графитсодержащих шлаков в составах противопригарных покрытий / Т.Р. Гильманшина, И.Е. Илларионов, С.А. Худонов, А.А. Ковалева, Е.В. Будник // *Литейщик России*. 2022. №5. С. 28–30.
2. Кидалов Н.А., Григорьева Н.В. Влияние отходов контактной очистки масел на структуру пленки водного силиката натрия на поверхности огнеупорного хромитового наполнителя // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2021. №6(253). С. 83–87.
3. Исследование влияния отходов производства комбикормов из зерновых культур на технологические свойства песчано-жидкостекольных смесей / Н.А. Кидалов, Н.В. Белова, А.А. Белов, Д.С. Суриков, С.Р. Поляк // *Известия ВолгГТУ. Сер. Металлургия*. 2024. № 7 (290). С. 51–55.
4. Исследование влияния отработанной кофейной гущи на формирование свойств песчано-жидкостекольных смесей / Н.А. Кидалов, А.А. Белов, Н.В. Белова, С.Р. Поляк, А.И. Дибров // *Литейное производство*. 2024. № 8. С. 15–19.
5. Оптимизация состава самовысыхающей противопригарной краски на основе отработанного алюмохромового катализатора / Н.А. Феоктистов, К.Г. Пивоварова, Т.Б. Понамарева, В.П. Чернов, Б.А. Кулаков, В.К. Дубровин // *Теория и технология металлургического производства*. 2023. №3 (46). С. 25–29.
6. Разработка процесса модифицирования литейных сталей мелкодисперсными отходами машиностроения / Н.А. Кидалов, Д.Ю. Гребнев, Н.И. Габельченко, Ю.В. Гребнев // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2024. Т. 22. №2. С. 56–58.
7. Сафронов Н.Н., Харисов Л.Р., Афлятонов Д.Р. Технология и аппаратное оформление переплава чугуна стружки электрошлаковым процессом // *Черные металлы*. 2023. №1. С. 32–37.
8. Рязанов С.А., Никитин К.В., Соколов А.В. О комплексной переработке алюминиевых солевых шлаков // *Металлургия машиностроения*. 2013. №5. С. 48–52.
9. Pude G.C., Naik G.R., Naik P.G. Application Of Process Activity Mapping For Waste Reduction A Case Study In Foundry Industry // *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2012, vol. 2, iss. 5, pp. 3482–3496.
10. Mounika M.P., Pardhiv G. Total industrial waste management by advanced techniques // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017, vol. 4, iss. 10, pp. 205–213.
11. Trombly J. Recasting a dirty industry. The U.S. foundry industry is about to be reinvented to maximize pollution prevention // *Environ. Sci. Technol.* 1995, vol. 29, iss. 2, pp. 76A–78A.
12. Введение в системный анализ теплофизических процессов в металлургии: учебное пособие для вузов / Н.А. Спиринов, В.С. Швыдкий, В.И. Лобанов, В.В. Лавров. Екатеринбург: УГТУ, 1999. 205 с.
13. Применение промышленных отходов в литейно-металлургических технологиях. Опыт кафедры металлургических технологий и оборудования / А.Н. Грачев, И.О. Леушин, В.А. Коровин, Л.И. Леушина // *Черные металлы*. 2024. №1. С. 73–78.
14. Обработка алюминиевых расплавов с использованием сетчатых фильтров, пропитанных шламом соляных закалочных ванн / А.Н. Грачев, И.О. Леушин, В.Б. Деев, О.С. Кошелев // *Цветные металлы*. 2018. №8. С. 85–90.
15. Грачев А.Н., Леушин И.О., Леушина Л.И. Разработка составов экзотермических смесей для стального и чугуна с применением отходов термического производства // *Черные металлы*. 2018. №2. С. 39–43.
16. Применение шлама соляных закалочных ванн для рафинирования алюминиевых сплавов / А.Н. Грачев, И.О. Леушин, К.А. Маслов, Л.И. Леушина // *Цветные металлы*. 2015. №11. С. 76–79.

References

1. Gilmanshina T.R., Illarionov I.E., Hudonogov S.A., Kovaleva A.A., Budnik E.V. Studying the possibility of using graphite-containing slags in the compositions of non-stick coatings. *Liteyshchik Rossii* [Russian Foundrymen], 2022;(5):28-30. (In Russ.)
2. Kidalov N.A., Grigoreva N.V. The effect of waste from contact oil purification on the film structure of aqueous sodium silicate on the surface of refractory chromite filler. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Volgograd State Technical University], 2021;(6(253)):83-87. (In Russ.)
3. Kidalov N.A., Belova N.V., Belov A.A., Surikov D.S., Polyak S.R. Investigation of the effect of waste from the production of compound feeds from grain crops on the technological properties of sand-liquid-glass mixtures. *Izvestiya VolgGTU. Ser. Metallurgiya* [Proceedings of VolgSTU. Metallurgy series], 2024;(7(290)):51-55. (In Russ.)
4. Kidalov N.A., Belov A.A., Belova N.V., Polyak S.R., Dibrov A.I. Investigation of the effect of used coffee grounds on the formation of the properties of sand-liquid glass mixtures. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry], 2024;(8):15-19. (In Russ.)
5. Feoktistov N.A., Pivovarova K.G., Ponomareva T.B., Chernov V.P., Kulakov B.A., Dubrovin V.K. Optimization of the composition of self-drying non-stick paint based on used alumochrome catalyst. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and technology of metallurgical production], 2023;(3(46)):25-29. (In Russ.)
6. Kidalov N.A., Grebnev D.Yu., Gabelchenko N.I., Grebnev Yu.V. Development of a process for modifying foundry

- steels with finely dispersed mechanical engineering waste. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Procurement production in mechanical engineering], 2024;22(2):56-58. (In Russ.)
7. Safronov N.N., Kharisov L.R., Aflyatonov D.R. Technology and hardware design of remelting of cast iron chips by electroslag process. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2023;(1):32-37. (In Russ.)
 8. Ryazanov S.A., Nikitin K.V., Sokolov A.V. About complex processing of aluminum salt slags. *Metallurgiya mashinostroeniya* [Metallurgy of mechanical engineering], 2013;(5):48-52. (In Russ.)
 9. Pude G.C., Naik G.R., Naik P.G. Application Of Process Activity Mapping For Waste Reduction A Case Study In Foundry Industry. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*. 2012;2(5):3482-3496.
 10. Mounika M.P., Pardhiv G. Total industrial waste management by advanced techniques. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017;4(10):205-213.
 11. Trombly J. Recasting a dirty industry. The U.S. foundry industry is about to be reinvented to maximize pollution prevention. *Environ. Sci. Technol.* 1995;29(2):76A-78A.
 12. Spirin N.A., Shvydkiy V.S., Lobanov V.I., Lavrov V.V. *Vvedenie v sistemnyy analiz teplofizicheskikh processov v metallurgii: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Introduction to the system analysis of thermophysical processes in metallurgy: a textbook for universities]. Yekaterinburg: UGTU, 1999, 205 p. (In Russ.)
 13. Grachev A.N., Leushin I.O., Korovin V.A., Leushina L.I. The use of industrial waste in foundry and metallurgical technologies. Experience of the Department of Metallurgical Technologies and Equipment. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2024;(1):73-78. (In Russ.)
 14. Grachev A.N., Leushin I.O., Deev V.B., Koshelev O.S. Processing of aluminum melts using mesh filters impregnated with sludge from salt hardening baths. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2018;(8):85-90. (In Russ.)
 15. Grachev A.N., Leushin I.O., Leushina L.I. Development of compositions of exothermic mixtures for steel and cast iron casting using thermal production waste. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2018;(2):39-43. (In Russ.)
 16. Grachev A.N., Leushin I.O., Maslov K.A., Leushina L.I. The use of sludge from salt hardening baths for aluminum alloys refining. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2015;(11):76-79. (In Russ.)

Поступила 20.01.2025; принята к публикации 01.04.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 20/01/2025; revised 01/04/2025; published 30/09/2025

Грачев Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: alexgra76@mail.ru. ORCID 0000-0002-2428-5990

Леушин Игорь Олегович – доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Металлургические технологии и оборудование»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: igoleu@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7284-7989

Манцеров Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент,
директор Образовательно-научного института промышленных технологий машиностроения,
заведующий кафедрой «Автоматизация машиностроения»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: mca_9@nntu.ru. ORCID 0000-0001-8458-8259

Aleksandr N. Grachev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of Department of Metallurgical Technologies and Equipment,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: alexgra76@mail.ru. ORCID 0000-0002-2428-5990

Igor O. Leushin – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgical Technologies and Equipment,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: igoleu@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7284-7989

Sergei A. Mantserov – PhD (Eng.), Associate Professor, Director of the Educational and Scientific Institute
of Industrial Engineering Technologies, Head of the Department of Automation of Mechanical Engineering,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: mca_9@nntu.ru. ORCID 0000-0001-8458-8259

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

METAL FORMING

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

УДК 621.774.37

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-79-86



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЛИННООПРАВОЧНОГО ВОЛОЧЕНИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ТРУБ С ЦЕЛЮ ОЦЕНКИ НАТЯГА ПЕРЕД ИЗВЛЕЧЕНИЕМ ОПРАВКИ

Федулов А.А., Каменечки В., Булганина М.Ю.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Для технологии получения холодноотянутых труб капиллярных размеров используется процесс длиннооправочного волочения. После окончания волочения происходит извлечение оправки из трубы. Для эффективного ведения процесса с последующим извлечением необходимо обоснование режимов извлечения длинной оправки после окончания процесса. Выбор параметров настройки известных механизмов извлечения затруднен, так как процесс недостаточно изучен, что приводит к появлению поверхностных дефектов при извлечении оправки из трубы на практике или снижению производительности процесса при настройке. **Цель работы.** Выполнение моделирования процесса длиннооправочного волочения на примере трубы малого размера с учетом упругих и пластических свойств объектов схемы, что позволит оценить распределение напряжений между трубой и оправкой после окончания волочения и уровень нагрузок, необходимый для ослабления натяга при извлечении оправки. **Используемые методы.** Для объемной постановки задачи по определению напряженно-деформированного состояния материала трубы и оправки в очаге деформации используется программный комплекс трехмерного моделирования DEFORM, основанный на применении метода конечных элементов для задач упругопластического течения с пассивной разгрузкой. Для обработки графиков используются методы математической статистики и линейной аппроксимации. **Новизна.** Разработка математической модели процесса волочения труб малых размеров на оправке, которая учитывает геометрические особенности инструмента и заготовки, упругопластические свойства заготовки и упругие свойства оправки, а также позволяет варьировать режимы волочения. **Результат.** Впервые получены данные по распределению остаточных напряжений и нормальных давлений между проволоочной трубой и длинной оправкой. **Практическая значимость.** Модель может быть использована для получения новых данных о процессе обкатки трубы после волочения.

Ключевые слова: холодноотянутые трубы, трубопрокатная установка, обкатная машина, тонкостенные трубы, продольные дефекты

© Федулов А.А., Каменечки В., Булганина М.Ю., 2025

Для цитирования

Федулов А.А., Каменечки В., Булганина М.Ю. Моделирование процесса длиннооправочного волочения капиллярных труб с целью оценки натяга перед извлечением оправки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 79-86. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-79-86>



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

MODELING THE PROCESS OF LONG MANDREL DRAWING FOR CAPILLARY TUBES TO ASSESS THE STRESS-STRAIN STATE BEFORE THE MANDREL EXTRACTION

Fedulov A.A., Kamenechki V., Bulganina M.Yu.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance of the Work). The production of cold-drawn capillary-sized tubes employs the long mandrel drawing process. After drawing, the mandrel is extracted from the tube. To ensure efficient process execution and subsequent extraction, it is necessary to substantiate the extraction parameters for the long mandrel upon completion of the process. Selecting the settings for known extraction mechanisms is challenging due to insufficient research on the process, which in practice leads to surface defects during mandrel extraction or reduced process efficiency during setup. **Objective.** It is to simulate the long mandrel drawing process using a small-sized tube as an example, taking into account the elastic and plastic properties of the components in the system. This will allow for an assessment of the stress distribution between the tube and the mandrel after drawing, as well as the required load levels to reduce interference during mandrel extraction. **Methods Used.** For the volumetric formulation of the problem concerning the stress-strain state of the tube and mandrel material in the deformation zone, the DEFORM 3D simulation software is used. This software is based on the finite element method (FEM) for elastoplastic flow problems with passive unloading. Graph processing employs methods of mathematical statistics and linear approximation. **Novelty.** Development of a mathematical model for the drawing process of small-sized tubes on a mandrel, which accounts for the geometric features of the tool and blank, the elastoplastic properties of the blank, and the elastic properties of the mandrel, and also allows for variation in drawing parameters. **Results.** For the first time, data on the distribution of residual stresses and normal pressures between the drawn tube and the long mandrel have been obtained. **Practical Significance.** The model can be used to acquire new data on the tube rolling process after drawing.

Keywords: cold-drawn tubes, tube rolling mill, reeling machine, thin-walled tubes, longitudinal defects

For citation

Fedulov A.A., Kamenechki V., Bulganina M.Y. Modeling the Process of Long Mandrel Drawing for Capillary Tubes to Assess the Stress-Strain State Before the Mandrel Extraction. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 79-86. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-79-86>

Введение

Капиллярные трубы относятся к классу труб размером менее 5 мм [1] и применяются в различных отраслях промышленности, таких как медицина, ядерная энергетика, приборостроение, теплоэнергетика и химическая промышленность. Для медицины из капиллярных труб изготавливают металлические каналы для катетеров, иглы для шприцов для подкожных инъекций и взятия анализов. Область применения при относительно малых размерах изделий обуславливает особые требования к трубам по точности геометрии и качеству поверхности, а условия работы требуют, чтобы материал капиллярной трубы помимо прочности и гибкости обладал бы еще и пассивностью к воздействию окружающей среды [2].

На территории РФ капиллярные трубы выпускаются из стальных [3] и медных сплавов [4] мерной, немерной длины и в бунтах. Стальные трубы выпускаются размерами $D_0 \times S_0$ от $0,3 \times 0,1$ до $5,0 \times 1,6$ мм с минимальными предельными отклонениями по наружному диаметру $\pm 0,02$ мм и по толщине стенки

$\begin{pmatrix} +0,02 \\ -0,01 \end{pmatrix}$ мм. Трубы медные и латунные, согласно регламентирующим документам, изготавливаются $\varnothing 1,2 \times 0,3$ до $\varnothing 2,5 \times 1,1$ мм с предельным отклонением по наружному диаметру $\pm 0,05$ мм.

С точки зрения требований к качеству готовой продукции для обоих видов труб можно обобщенно говорить, что наружная поверхность должна быть чистой (свободной от загрязнений), не должна иметь рисков, забоин, вмятин, волосовин, закатов, раковин, плен, трещин, расслоений, надрывов. Внутренняя поверхность трубок также не должна иметь видимых загрязнений, быть проходима и свободна от следов термических или химических процессов.

Для получения труб таких малых размеров необходимо применение многооперационных технологических процессов, включающих множество последовательных и циклических процедур по обработке заготовки давлением, химической и термообработке. Перед окончательными операциями заготовка, сварная (полученная в линии ТЭСА) или бесшовная (путем экструдирования или после ТПА), попадает по-

следовательно в линии холодной периодической прокатки на станах ХПТ и ХПТР и волочения ХВТ. Последние используются в качестве завершающих стадий обработки давлением, так как при сравнительно высокой производительности позволяют гарантировать высокую прецизионную точность размеров, физико-механические свойства материала изделия и гладкую полированную поверхность. В то же время, учитывая малость сечений и необходимость выполнить режимы деформации, чтобы обеспечить заданные размеры наружного и внутреннего диаметров, в стандартах допускаются как цвета побежалости (если не указано иное), так и местные дефекты, не выходящие размеры трубок за пределы минусовых отклонений и следы их удаления механической или иной зачисткой.

Особенности процесса волочения труб малого диаметра (постановка задачи)

Процесс волочения представляет собой процесс холодной деформации, заключающийся в протягивании заготовки через волочильное кольцо с отверстием заданной формы с целью придания ей окончательных геометрических размеров и конфигурации, а также упрочнения ее поверхности [5]. В некоторых случаях перед волочением внутрь трубы закладывается специальный инструмент – оправка, который позволяет стабилизировать процесс и гарантировать заданную разностенность поперечного сечения.

Оправки подразделяются по форме, способу установки и удержания в очаге деформации, но наиболее предпочтительным типом в случае производства прецизионных капиллярных труб является длинная – в виде тонкой струны. Длинная оправка протягивается вдоль всей трубы, фиксируется там перед началом волочения и извлекается после осуществления обжатия в волочильном стане. Предполагаемая последовательность действий приводит к определенным затруднениям при ее вытягивании из-за возникновения натяга между трубой и оправкой. В работе [6] предлагается применение короткой самоустанавливающейся оправки, которая позволит локализовать данный участок и избежать последующей операции по извлечению, однако длиннооправочное волочение до сих пор широко используется в качестве основного способа на территории РФ.

С целью сохранения экономической эффективности удлинение трубы после волочения на длинной оправке должно быть в пределах 1,5–2,5, рекомендуемые обжатия по диаметру 0,5–5 мм и по толщине стенки 0,02–1,5 мм [7]. Это обуславливает различные условия для величины натяга и применение специальных способов извлечения оправки, которые должны быть универсальными в ряде случаев. Один из таких способов реализуется с помощью кассетного оправкоизвлекателя, предложенного в работе [8]. Суть способа заключается в проталкивании трубы после длиннооправочного волочения через несколько

последовательно установленных двухроликовых кассет. Каждая кассета повернута относительно предыдущей на некоторый угол с таким шагом, чтобы суммарный охват роликами труб составлял 360°. Конструкция роликовой кассеты представлена на рис. 1.

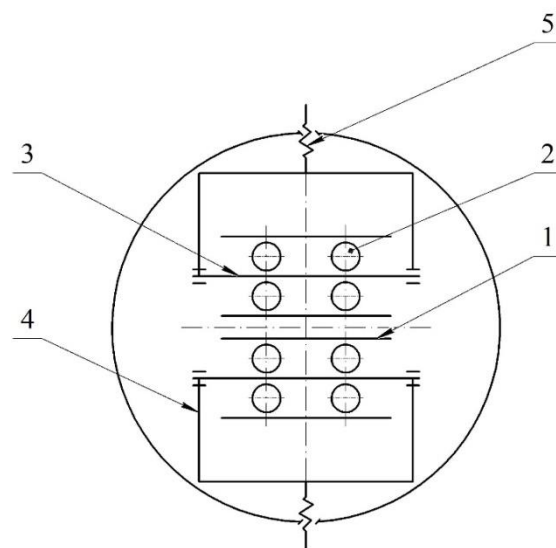


Рис. 1. Роликовая обкатная кассета: 1 – ролик; 2 – подшипник; 3 – ось; 4 – корпус; 5 – пара «винт-гайка»

Fig. 1. Roller reeling cassette: 1 – roller; 2 – bearing; 3 – axle; 4 – body; 5 – screw-nut pair

Ролики 1 являются холостыми и закреплены на подшипниках 2, установленных на осях 3. Оси перемещаются в направляющих корпуса 4 за счет вращения винтов 5, что обеспечивает установку роликов на необходимый размер трубы. При прохождении трубы с оправкой после волочения между сжатыми роликами труба испытывает упругую деформацию. Эта деформация позволяет облегчить посадку в областях, расположенных перпендикулярно направлению сжатия между роликами.

Сложность использования данного механизма заключается в необходимости ручной настройки режимов сжатия между роликами для каждого типоразмера трубы. Ввиду отсутствия научно обоснованных режимов настройки, неполных данных о влиянии смятия роликов, жесткости конструкции, а также зазоров в подшипниках и резьбе винта выполнение операции извлечения оправки становится затруднительным. В условиях производства это приводит к многократным повторным протягиваниям через обкатные кассеты до получения возможности разделения оправки и трубы. В случае сведения роликов до создания упругопластических деформаций трубы на ее поверхности образуется дефект, называемый «граненностью», что приводит к отбраковке трубы из партии. Таким образом, правильно настроенный механизм позволяет получать капиллярные трубы с заданной производительностью и без снижения качества.

С целью получения новых данных о процессе обкатки необходимо выполнить моделирование процесса с получением максимально возможных данных о напряженно-деформированном состоянии всех объектов с учетом последующего варьирования режимов работы установки. В качестве наиболее удобного и имеющего высокую сходимость получаемых результатов с экспериментом следует принять метод конечных элементов. В качестве расчетной схемы принята описанная в [9] схема последовательного сжатия между двумя абсолютно жесткими роликами пластической трубы на абсолютно жесткой оправке. Критерием разделения принималось исчезновение контакта между оправкой и трубой. В связи с этим решенная задача охватывала только пластическое решение, не позволяя учитывать влияние натяга между трубой и оправкой, что ограничивало применимость полученных результатов.

Задача может быть решена за счет введения в качестве начальных условий натяга между трубой и оправкой, полученного с учетом только упругих свойств оправки [10]. В то же время это решение не имеет возможности учитывать упругопластическое поведение материала, появление которого весьма вероятно в условиях всестороннего сжатия, а также остаточных напряжений в самой трубе. Таким образом, для получения наиболее полных корректных данных необходимо выполнить последовательное моделирование процессов длиннооправочного волочения и обкатки трубы. При этом следует рассмотреть вопрос, насколько существенным является влияние различных моделей задания свойств для объектов расчетной схемы на характеристики процесса.

Моделирование процесса длиннооправочного волочения

Расчетная схема исследуемого процесса, которая включает абсолютно жесткие волоку 1 и тягу 2, упругопластическую полую заготовку 3 и упругую оправку в виде стержня 4, представлена на рис. 2.

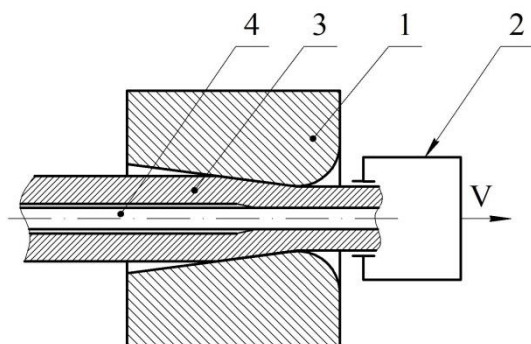


Рис. 2. Расчетная схема волочения: 1 – волока; 2 – тяга; 3 – заготовка; 4 – оправка
Fig. 2. The scheme of a drawing process: 1 – die; 2 – drawbar; 3 – blank; 4 – mandrel

Сеткой КЭ разбивались заготовка (размерами сетки 0,25-0,5 мм) и оправка (размерами сетки 0,2-0,4 мм) со сгущением сетки на наружной поверхности для получения более точных результатов по геометрии. Калибровка волоки построена согласно используемым на производстве инструментам с учетом рекомендаций [7] и имеет следующие размеры: ширина калибрующего пояса не более 1 мм, угол конусности 15°.

Рассматривались несколько случаев волочения с упругой оправкой и упругопластической заготовкой (условие пластичности соответствует критерию Губера-Мизеса и упругой разгрузке при пассивной деформации [11]), а также без оправки. Взаимодействие между объектами расчетной схемы осуществляется по закону трения Зибеля (со значением показателя трения 0,06) [7]. Расчет выполнен для перехода $\varnothing 7,0 \rightarrow \varnothing 5,0 \times 1,6$. Для заготовки варьировалась величина исходной толщины стенки в диапазоне 1,9–1,65 мм. В качестве материала заготовки использовалась сталь марки AISI 321 (аналог 08X18H12T), оправки – AISI 431 (аналог 14X17H2). Процесс рассматривался с момента задачи редуцированного конца трубы в волоку до выхода тестового отрезка трубы из волочильного стана после окончания волочения (рис. 3).

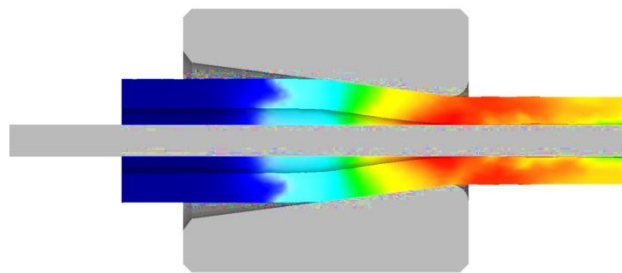


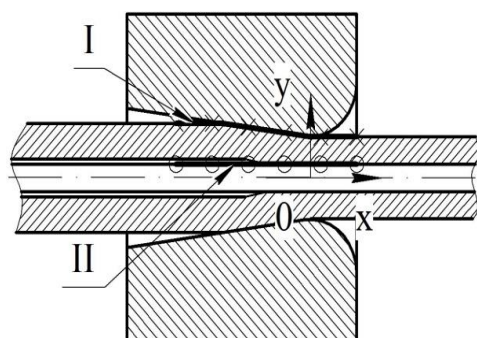
Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в продольном сечении очага деформации на стационарной стадии волочения

Fig. 3. Distribution of equivalent stresses in the longitudinal section of the deformation zone during the steady-state stage of drawing

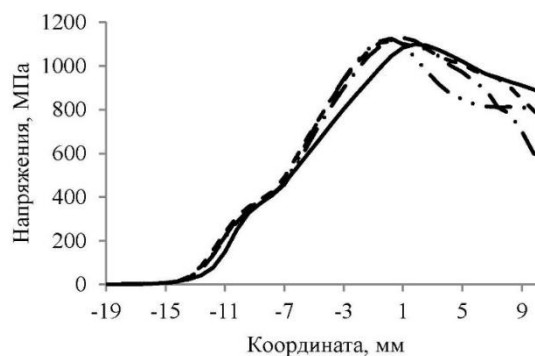
Результаты и их обсуждение

Рассмотрим распределение эквивалентных напряжений в очаге деформации. Выберем две продольные линии замера (рис. 4, а): по контактной поверхности заготовки трубой и по контактной поверхности между трубой и оправкой. При анализе допускаем, что задача является осесимметричной.

В качестве точки отсчета координат для графиков, показанных на рис. 4, б, принимается вершина калибровочного пояса канала волоки (линия перехода от конического участка к скруглению).



а



б

Рис. 4. Измерение эквивалентных напряжений в очаге деформации: а – линии замера напряжений:

I – по контакту трубы и волоки; II – по контакту трубы и оправки; б – графики замеров:

— — по линии I; по линии II: — — — — — переход $\varnothing 7 \times 1,65 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ мм;

-.-.- — переход $\varnothing 7 \times 1,78 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ мм; —.-.- — — — — — переход $\varnothing 7 \times 1,9 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ мм

Fig. 4. Measurement of equivalent stresses in the deformation zone: а is stress measurement lines:

I – at the tube/die contact interface; II – at the tube/mandrel contact interface; б is measurement graphs:

solid line (—) along Line I; along line II: dashed (— — —) is $\varnothing 7 \times 1,65 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ mm;

dotted (-.-.-) is $\varnothing 7 \times 1,78 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ mm; dash-dot (—.-.-) is $\varnothing 7 \times 1,9 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ mm

Как видно, зависимости во всех случаях имеют одинаковый характер: рост напряжений до установления промежуточной площадки (около 400 МПа), дальнейшее увеличение напряжений до пиковой нагрузки (около 1100 МПа за «нулевой» координатой), после чего плавное снижение величин эквивалентных напряжений. На внутренней поверхности трубы после достижения максимальных значений эквивалентные напряжения в случае перехода $1,65 \rightarrow 1,6$ мм показывают уменьшение напряжений по мере выхода трубы из волоки. С увеличением обжатия это отклонение от замеров по наружной поверхности возрастает, в частности, для перехода $1,9 \rightarrow 1,6$ мм имеет место резкое снижение уровня напряжений на 20% с дальнейшим монотонным снижением.

На рис. 5 представлены графики измерений нормальных давлений в очаге деформации по наружной поверхности. Как видно из графиков, во всех случаях наблюдается два пика значений по границам очага деформации. Соотношение значений первого и второго пика изменяются с изменением величин обжатия по толщине стенки. Чем больше обжатие, тем меньше значения входного пика и, наоборот, выше значения выходного. Максимальное значение нормальных давлений 1534 МПа. Для перехода $1,65 \rightarrow 1,6$ мм превышение значений входного пика над выходным составляет 20%. В то же время для переходов $1,78 \rightarrow 1,6$ и $1,9 \rightarrow 1,6$ мм превышение выходного пика над входным составляет соответственно 65,6 и 85,0%.

Для расчета напряженно-деформированного состояния оправки в трубе после окончания волочения выполнялись замеры по образующим цилиндрических поверхностей наружной и внутренней поверхности полученной трубы от точки выхода из волоки до точки приложения усилия волочения (рис. 6, 7).

На рис. 7 представлены результирующие графики измерения эквивалентных напряжений после упругой разгрузки. Для оценки параметров использовались усредненные показатели, полученные для аналогичных значений в точках с одинаковой осевой координатой.

Максимальные значения остаточных напряжений имеют место при безоправочном волочении. Стоит отметить, что распределение напряжений для всех случаев безоправочного волочения приблизительно одинаково. При волочении на оправке на наружной поверхности трубы возникает относительно постоянный уровень остаточных напряжений, находящийся в интервале значений от 200 до 450 МПа. На внутренней поверхности при безоправочном волочении возникает куполообразный график с плоской центральной частью, достигающей уровня напряжений 1100 МПа. На концевых участках с обеих сторон уровень напряжений снижается до 500 МПа. Добавление в расчетную схему длинной оправки приводит к снижению уровня остаточных напряжений и их постепенному выравниванию до уровня 600 МПа. Перепады уровней остаточных напряжений проявляются на концевых участках, а также в местах слабой посадки трубы на оправку.

Неравномерное распределение остаточных напряжений говорит также о неравномерности распределения нормальных давлений, возникающих между оправкой и трубой после волочения. Для оценки уровня нормальных давлений принята величина среднего уровня давлений на поверхности оправки с дальнейшей аппроксимацией полученных значений для расширенного диапазона значений обжатия стенки трубы при постоянном переходе $\varnothing 7 \rightarrow \varnothing 5$ мм. Результирующий график представлен на рис. 6.

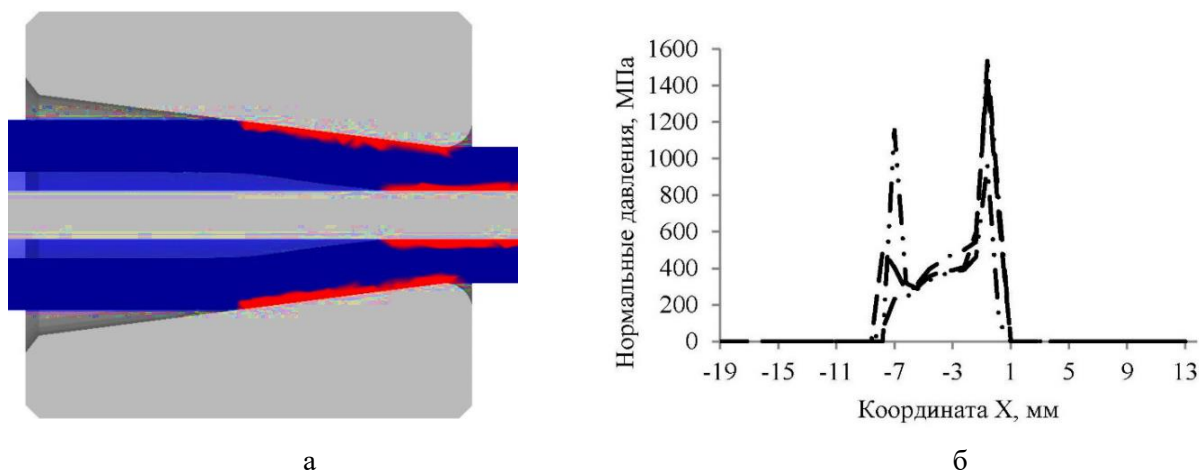


Рис. 5. Измерение нормальных давлений в очаге деформации при волочении: а – продольный разрез; б – по линии I: —.—.— — переход $\varnothing 7 \times 1,65 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ мм; — — — — переход $\varnothing 7 \times 1,775 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ мм; ····· — переход $\varnothing 7 \times 1,9 \rightarrow \varnothing 5 \times 1,6$ мм

Fig. 5. Measurement of normal pressures in the deformation zone during drawing: a is longitudinal cross-section; б is along Line I: dash-dot (—.—.—) is $\varnothing 7 \times 1.65 \rightarrow \varnothing 5 \times 1.6$ mm; solid line (— — —) is $\varnothing 7 \times 1.775 \rightarrow \varnothing 5 \times 1.6$ mm; dotted (·····) is $\varnothing 7 \times 1.9 \rightarrow \varnothing 5 \times 1.6$ mm

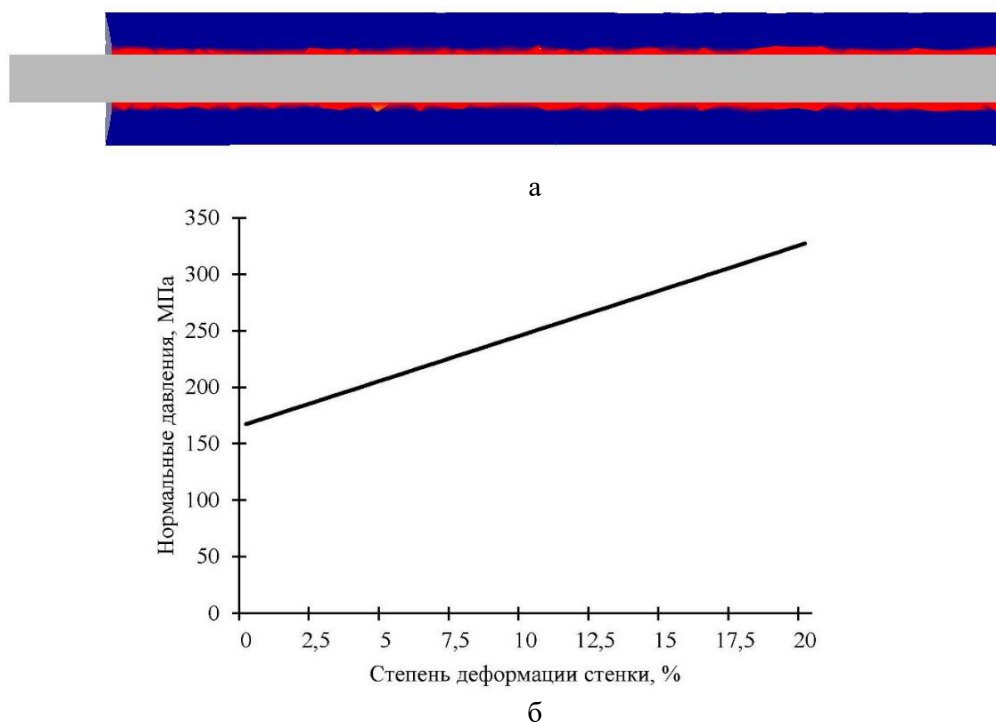


Рис. 6. Измерение нормальных давлений после окончания волочения: а – продольный разрез; б – зависимость средних значений нормальных давлений на поверхности оправки от величины обжатия стенки трубы после волочения

Fig. 6. Measurement of normal pressures after drawing: a is longitudinal cross-section; б is dependence of average normal pressures on the mandrel surface on the tube wall reduction after drawing

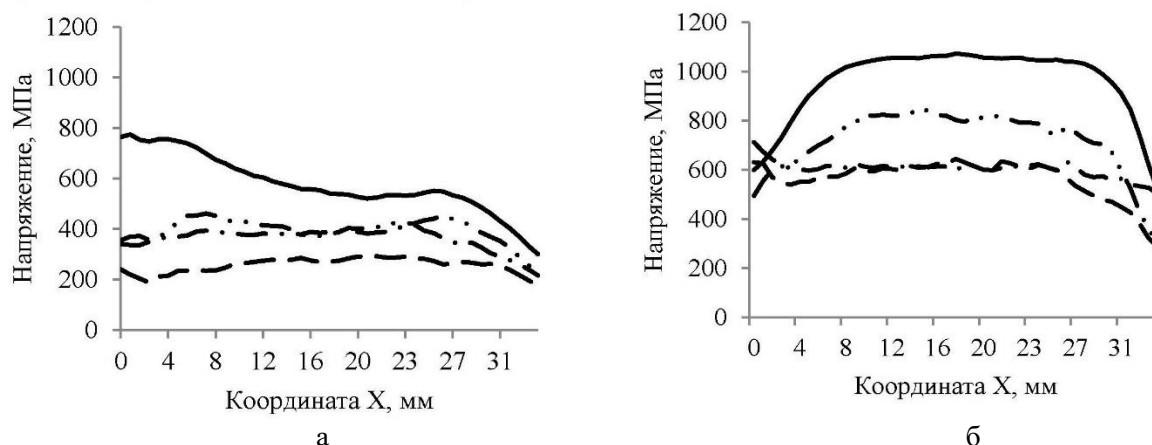


Рис. 7. Измерение остаточных эквивалентных напряжений в трубе после волочения:

а – по наружной поверхности трубы; б – по внутренней поверхности; — – безоправочное волочение (усредненное значение); -.- – переход $\text{Ø}7 \times 1,65 \rightarrow \text{Ø}5 \times 1,6$ мм; --- – переход $\text{Ø}7 \times 1,775 \rightarrow \text{Ø}5 \times 1,6$ мм; -.-.- – переход $\text{Ø}7 \times 1,9 \rightarrow \text{Ø}5 \times 1,6$ мм)

Fig. 7. Measurement of residual equivalent stresses in the tube after drawing: а is along the outer tube surface; б is along the inner tube surface: solid line (—) is mandrel-free drawing (averaged value); dash-dot (-.-) is $\text{Ø}7 \times 1.65 \rightarrow \text{Ø}5 \times 1.6$ mm; dashed (---) is $\text{Ø}7 \times 1.775 \rightarrow \text{Ø}5 \times 1.6$ mm; dotted (-.-.-) is $\text{Ø}7 \times 1.9 \rightarrow \text{Ø}5 \times 1.6$ mm.

Линейная аппроксимация данных демонстрирует рост нормальных давлений по мере увеличения степени деформации. При незначительных обжатиях нормальные давления составляют до 200 МПа. Верхний порог рекомендованных обжатий по толщине стенки (до 0,3 мм) показывает уровень нормальных давлений 300–350 МПа. Данные величины свидетельствуют об уровне исходного натяга между оправкой и проволоченной трубой при моделировании процессов извлечения оправки из трубы.

Выводы

Для решения задачи выбора режимов настройки механизма извлечения длинной оправки из труб малых (в том числе капиллярных) размеров выполнено моделирование процесса волочения. Особенностью модели является учет упругопластических свойств объектов при задании объектов модели. Результаты моделирования позволяют оценить уровень остаточных напряжений между трубой и оправкой, а также величины натяга, возникающих между проволоченной трубой и оправкой, чтобы в дальнейшем подготовить теоретические данные для моделирования извлечения оправки без брака продукции.

Список источников

1. Технология и оборудование трубного производства: учеб. пособие / В.Я. Осадчий и др.; под ред. В.Я. Осадчего. М.: Интермет Инжиниринг, 2007. 560 с.
2. Junmo Kang. High-speed Internal Finishing of Capillary Tubes by Magnetic Abrasive Finishing Finishing /a, Andrew Georgea, Hitomi Yamaguchia // 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. Procedia CIRP 1. 2012, pp. 414–418.

3. ГОСТ 14162–79. Трубки стальные малых размеров (капиллярные). Технические условия: межгосударственный стандарт: дата введения 1981–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1981. 9 с.
4. ГОСТ 2624–2016. Трубки медные и латунные капиллярные. Технические условия: межгосударственный стандарт: дата введения 2017–04–01. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с.
5. Рудской А.И., Лунев В.А., Шаболдо О.П. Волочение: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 125 с.
6. Analysis of the Drawing Process of Small-Sized Seam Tubes / Alexander Schrek, Alena Brusilová, Pavol Švec, Zuzana Gábrišová and Ján Moravec // Metals. 2020, vol. 10, no. 6, p. 709.
7. Орлов Г.А. Основы теории прокатки и волочения труб: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 204 с.
8. Пат. 76259 Рос. Федерация, МПК B21C 3/00. Механизм обработки труб: № 2006105113/22: заявл. 2006.02.20; опубл. 20.09.2008/ Буркин С.П., Серебряков А.В., Серебряков А.В., Прилуков С.Б., Ладыгин С.А. Марков Д.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «Первоуральский новотрубный завод». 6 с.
9. Modeling Reeling Process of Capillary Tubes Following Mandrel Drawing / Parshin, S. V., Khlebnikov, P. S., Fedulov, A. A., Semenova, N. V., & Parshina, A. A. // Metallurgist. 2024, no. 67(9-10), pp. 1532–1537.
10. Шинкин В.Н. Сопротивление материалов для металлургов: учебник. М.: Изд. Дом МИСиС, 2013. 655 с.
11. Кожаринова Л.В. Основы теории упругости и пластичности: учеб. пособие. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2010. 136 с.

References

1. Osadchiy V.Ya., et al. *Tekhnologiya i oborudovanie trubnogo proizvodstva* [Theory and equipment of pipe production]. Moscow: Internet Inzhiniring, 2007, 560 p. (In Russ.)
2. Junmo Kang, Andrew Georgea, Hitomi Yamaguchia. High-speed Internal Finishing of Capillary Tubes by Magnetic Abrasive Finishing. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012. Procedia CIRP 1. 2012:414-418.
3. State standard GOST 14162-79. Steel tubes of small dimensions (capillary). Specifications. Moscow: Standards Publishing House, 1981, 9 p. (In Russ.)
4. State standard GOST 2624-2016. Capillary copper and brass tubes. Specifications. Moscow: Standartinform, 2017, 16 p. (In Russ.)
5. Rudskoy A.I., Lunev V.A., Shaboldo O.P. *Volocheniye: ucheb. posobiye* [Drawing: a study guide]. Saint Petersburg: Publishing House of Polytechnic University, 2011, 125 p. (In Russ.)
6. Alexander Schrek, Alena Brusilová, Pavol Švec, Zuzana Gábríšová, Ján Moravec. Analysis of the Drawing Process of Small-Sized Seam Tubes. *Metals*. 2020;10(6):709.
7. Orlov G.A. *Osnovy teorii prokatki i volocheniya trub: uchebnoye posobiye* [Foundations of pipes rolling and drawing theory: a study guide]. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural Federal University, 2016, 204 p. (In Russ.)
8. Burkin S.P., Serebryakov A.V., Serebryakov A.V., Prilukov S.B., Ladygin S.A., Markov D.V. *Mekhanizm obrabotki trub* [Pipes processing mechanism]. Patent RU, no. 2006105113/22, 2008.
9. Parshin S.V., Khlebnikov P.S., Fedulov A.A., Semenova N.V., Parshina A.A. Modeling Reeling Process of Capillary Tubes Following Mandrel Drawing. *Metalurgist*. 2024;67(9-10):1532-1537.
10. Shinkin V.N. *Soprotivleniye materialov dlya metallurgov: ucheb.* [Strength of materials for metallurgists: a textbook]. Moscow: Publishing House of MISiS, 2013, 655 p. (In Russ.)
11. Kozharinova L.V. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti. Uchebnoye posobiye* [Foundations of elasticity and plasticity theory. Study guide]. Moscow: Publishing House of the Association of Civil Engineering Universities, 2010, 136 p. (In Russ.)

Поступила 20.01.2025; принята к публикации 01.04.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 20/01/2025; revised 01/04/2025; published 30/09/2025

Федулов Артем Анатольевич – кандидат технических наук, доцент,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия.
Email: a.a.fedulov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5271-5310

Каменечки Владимир – аспирант,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия.
Email: a.a.fedulov@urfu.ru.

Булганина Марина Юрьевна – кандидат технических наук, доцент,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия.
Email: marina.bulganina@urfu.ru. ORCID 0009-0009-7833-7846

Artem A. Fedulov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: a.a.fedulov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-5271-5310

Vladimir Kamenechki – Postgraduate Student,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: a.a.fedulov@urfu.ru.

Marina Yu. Bulganina – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: marina.bulganina@urfu.ru. ORCID 0009-0009-7833-7846

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 621.787.4

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-87-96



ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УГЛА КЛИНОВОГО УЧАСТКА ПЛОСКИХ ПЛИТ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Зайдес С.А., Буй М.З.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Цилиндрические мало жесткие изделия имеют широкое применение в машиностроении в качестве заготовок для изготовления деталей типа валов, осей, штоков, штанг и др. Упрочнение деталей является одним из ключевых методов повышения эксплуатационной надежности и долговечности таких типов детали. Применение метода упрочнения поверхностного пластического деформирования позволяет формировать благоприятное напряженно-деформированное состояние в поверхностном слое деталей. В Иркутском НИТУ разработаны способы правки и упрочнения не жестких деталей, основанные на поперечной обкатке гладкими плитами. Отличие этих способов заключается в геометрической форме рабочего инструмента. Неправильный выбор геометрических параметров инструмента может привести к неравномерному упрочнению, локальным концентрациям напряжений и, как следствие, к образованию трещин, остаточных деформаций или снижению эффективности процесса. **Цель работы.** По результатам анализа напряженно-деформированного состояния в зоне деформации и остаточных напряжений в упрочненных деталях выбрать и обосновать величину угла клинового участка плоских плит, который обеспечивает необходимое качество упрочненного слоя. **Используемый метод.** С помощью программного обеспечения для 3D-проектирования (Solid work 2019) и вычислительного моделирования (Ansys workbench 19.2) построена модель процесса упрочнения цилиндрической детали плоскими инструментами для расчета и оценки напряженно-деформированное состояние заготовки в зоне деформации и остаточных напряжений в готовых деталях. **Результаты исследования.** На основе анализа результатов конечно-элементного моделирования установлено рациональное значение угла клинового участка плоских плит, равное 45° . При таком значении угла максимальное временное напряжение в процессе упрочнения достигает величины меньше, чем предел прочности материала, что обеспечивает упрочнение без возникновения на поверхности заготовки трещин, а также равномерное распределение остаточных напряжений на поверхности. **Практическая значимость.** Предложенные результаты исследования имеют важное практическое значение для повышения качества упрочняемых деталей. Установленное рациональное значение угла клинового участка плоских плит (45°) позволяет минимизировать риск образования повреждений и остаточных деформаций цилиндрических деталей при их упрочнении. Это способствует улучшению эксплуатационных характеристик не жестких деталей, обеспечивая их повышенную долговечность и надежность в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: упрочнение, поверхностный слой, клиновые плиты, прямоугольные плиты, напряженно-деформированное состояние, предел текучести, глубина пластической деформации

© Зайдес С.А., Буй М.З., 2025

Для цитирования

Зайдес С.А., Буй М.З. Выбор и обоснование величины угла клинового участка плоских плит при поверхностном пластическом деформировании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 87-96. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-87-96>



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

SELECTION AND JUSTIFICATION OF THE ANGLE VALUE OF THE WEDGE SECTION OF FLAT PLATES UNDER SURFACE PLASTIC DEFORMATION

Zaides S.A., Bui M.D.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Relevance. Cylindrical low-rigidity products are widely used in mechanical engineering as blanks for manufacturing parts such as shafts, axles, rods, bars, etc. Hardening of parts is one of the key methods for increasing the operational reliability and durability of such types of parts. Application of the method of hardening of surface plastic deformation (SPD) allows forming a favorable stress-strain state (SSS) in the surface layer of parts. Irkutsk NRTU has developed methods for straightening and hardening of non-rigid parts based on transverse rolling with smooth plates. The difference between these methods lies in the geometric shape of the working tool. Incorrect choice of geometric parameters of the tool can lead to uneven hardening, local stress concentrations and, as a consequence, to the formation of cracks, residual deformations or a decrease in the efficiency of the process. **The objective** of the work is to select and justify the angle of the wedge section of flat plates, which ensures the required quality of the hardened layer, based on the analysis of the SSS in the deformation zone and residual stresses in the hardened parts. **Method Applied.** Using 3D design software (Solid work 2019) and computational modeling (Ansys workbench 19.2), a model of the process of hardening a cylindrical part with flat tools was built to calculate and evaluate the stress-strain state of the blank in the deformation zone and residual stresses in finished parts. **Result.** Based on the analysis of the results of finite element modeling, a rational value of the angle of the wedge section of flat plates was established equal to 45°. With this angle value, the maximum temporary stress during hardening reaches a value less than the tensile strength of the material, which ensures hardening without the occurrence of cracks on the surface of the blank, as well as a uniform distribution of residual stresses on the surface. **Practical Relevance.** The proposed research results are of great practical importance for improving the quality of hardened parts. The established rational value of the wedge section angle of flat plates (45°) allows minimizing the risk of damage and residual deformations of cylindrical parts during their hardening. This helps improve the performance characteristics of non-rigid parts, ensuring their increased durability and reliability during operation.

Keywords: strengthening, surface layer, wedge plates, rectangular plates, stress-strain state, yield strength, depth of plastic deformation

For citation

Zaides S.A., Bui M.D. Selection and Justification of the Angle Value of the Wedge Section of Flat Plates Under Surface Plastic Deformation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 87-96. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-87-96>

Введение

Цилиндрические маложесткие изделия имеют широкое применение в машиностроении в качестве заготовок для изготовления деталей типа валов, осей, штоков, штанг и др. [1-3]. Они во многом определяют ресурс машин и механизмов. Обычно маложесткие детали сложны в изготовлении, так как не выдерживают больших силовых и термических нагрузок. Но самое главное, после изготовления таких деталей они теряют свою первоначальную форму под действием даже незначительных остаточных напряжений, которые неизбежно возникают в процессе их механической и термической обработки. Поэтому на заключительной стадии изготовления такие детали подвергаются правке [4-6].

Упрочнение деталей является одним из ключевых методов повышения эксплуатационной надежности и долговечности деталей машин [1]. В машиностроении

широко используются различные технологии обработки, направленные на увеличение поверхностной твердости и улучшение механических характеристик материалов. Одним из перспективных методов является упрочнение цилиндрических заготовок с применением поверхностного пластического деформирования (ППД), которое позволяет формировать благоприятное напряженно-деформированное состояние (НДС) в поверхностном слое деталей [7, 8].

В последнее время в научном сообществе наблюдается заметный всплеск интереса к методам повышения поверхностной прочности деталей машин и оборудования. Поиск методов поверхностного упрочнения основан на возможности значительного продления срока службы и повышения эксплуатационных свойств изделий [9]. В Иркутском национальном исследовательском техническом университете разрабатываются новые способы и устройства для правки и упрочнения нежестких цилиндрических де-

талей типа валов и осей. Способ правки и упрочнения в одной технологической операции, техническая новизна которого подтверждена патентами РФ на изобретения [10, 11], предназначен в основном для обработки деталей из пластичных металлов и сплавов. Разработанные способы основаны на обкатке деталей гладкими плитами. К преимуществам плоско-обкатного устройства относятся простота изготовления и низкая стоимость плоского инструмента, стабильное положение детали на плоскости инструмента, высокая стойкость рабочего инструмента, высокая производительность. Так как рабочий инструмент выполнен в виде плоских плит, то можно упрочнять даже весьма тонкие цилиндрические детали типа валов и осей [12, 13]. Принципиальные схемы способов упрочнения цилиндрической детали представлены на рис. 1.

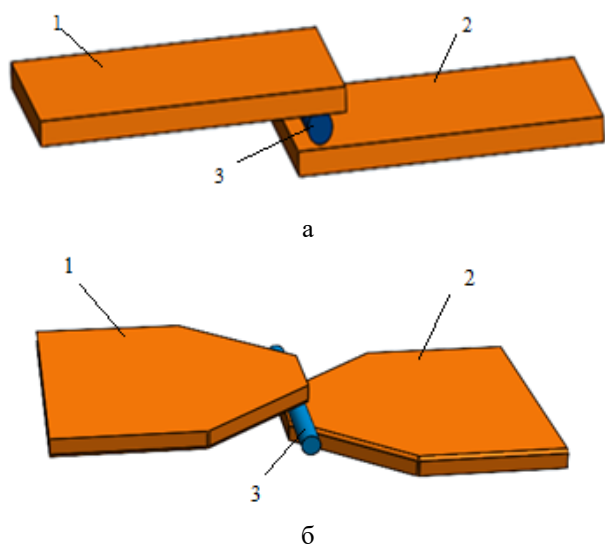


Рис. 1. Способы упрочнения нежесткой цилиндрической заготовки: а – прямоугольными плитами; б – клиновыми плитами; 1 – верхняя плита; 2 – нижняя плита; 3 – заготовка

Fig. 1. Methods of strengthening a non-rigid cylindrical workpiece: а is rectangular plates; б is wedge plates; 1 is upper plate; 2 is lower plate; 3 is workpiece

Заготовку кладут между плитами и сжимают со стороны верхней плиты. Упрочнение заготовки осуществляется за счет движения в горизонтальном направлении верхней плиты. Разница между этими способами заключается в геометрической форме упрочняющих инструментов. Клиновая форма в отличие от прямоугольных плит позволяет упрочнять даже искривленные заготовки без предварительной правки. Это отличие влияет и на НДС детали в процессе упрочнения и это необходимо учитывать при выборе геометрии инструмента. Важным аспектом данного процесса является равномерность распре-

ления напряжений и деформаций в заготовке. Неправильный выбор геометрических параметров плит может привести к неравномерному упрочнению, локальным концентрациям напряжений и, как следствие, к образованию трещин, остаточных деформаций или снижению эффективности процесса.

Цель работы: по результатам анализа НДС в зоне деформации и остаточных напряжений в упрочненных деталях выбрать и обосновать величину угла клинового участка плоских плит, который обеспечивает необходимое качество упрочненного слоя.

Метод исследования

Для исследования влияния геометрических параметров рабочего инструмента на НДС поверхностного слоя цилиндрических деталей был использован метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет численно определить НДС деталей в очаге деформации и максимальную интенсивность временных и остаточных напряжений и является удобным методом представления сложного поведения материала путем точного отражения физических явлений с помощью дифференциальных уравнений [14]. Применение численного моделирования дает возможность выявить оптимальные параметры обработки без проведения дорогостоящих экспериментальных испытаний, а также предсказать потенциальные дефекты, возникающие при неравномерном распределении напряжений [4].

Исследования проведены в программном комплексе ANSYS Mechanical при использовании модуля *Transient structural*. В качестве заготовок были использованы цилиндрические образцы диаметрами 10 и 20 мм. В качестве материала заготовок была выбрана углеродистая конструкционная сталь Ст3 (упруго-пластический, модуль упругости $E = 1,8 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала – билинейная, предел текучести $\sigma_t = 255$ МПа, предел прочности $\sigma_b = 480$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа). В качестве материала, используемого для клиновых плит, применена конструкционная сталь высокой прочности и жесткости. При моделировании рабочий инструмент принят как абсолютно жесткое тело. Коэффициент трения качения для пары сталь-сталь в зоне контакта заготовки с плитами $f = 0,05$. При моделировании для построения сетки конечных элементов использован справочник программы Ansys 19.1. С учетом механического взаимодействия заготовки из стали с абсолютно жестким телом приняты конечные элементы тетраэдрического типа. Сетка использована с постоянным размером конечного элемента (в данном исследовании 0,5 мм) и одного типа по всему объему заготовки. Конечно-элементная модель процесса показана на рис. 2.

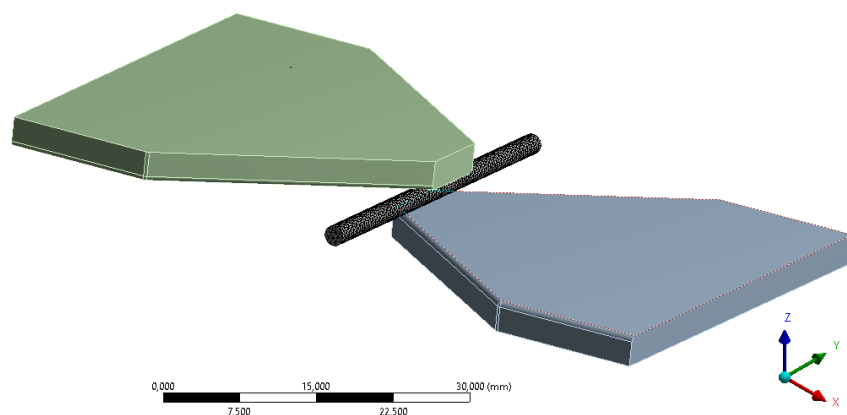


Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса упрочнения цилиндрической заготовки клиновыми плитами
Fig. 2. Finite element model of the process of strengthening a cylindrical workpiece with wedge plate

Основными параметрами процесса являются величина относительного обжатия заготовки Q , скорость движения верхней плиты v . Для определения влияния угла клина плоских плит β на НДС заготовки в исследовании эти параметры приняты постоянными, а значения β переменными. Значения базовых параметров и режимов процесса упрочнения представлены в **таблице**.

Таблица. Базовые параметры и режимы процесса упрочнения

Table. Basic parameters and modes of the hardening process

Диаметр заготовки D , мм	Длина заготовки l , мм	Скорость движения верхней плиты v , мм/с	Величина относительного обжатия Q , %
10, 20	120	10	1%

Геометрическая форма клинового участка плиты представлена на **рис. 3**. Основным геометрическим параметром плиты является угол клина β . При упрочнении деталей плоскими прямоугольными плитами (**рис. 1, а**) значение β равно 90° .

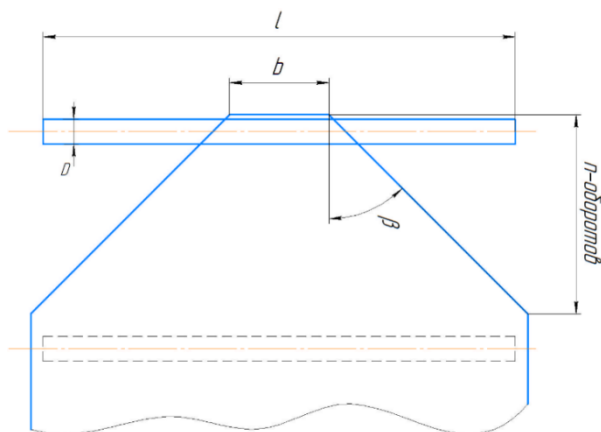


Рис. 3. Геометрическая форма клинового участка плиты

Fig. 3. Geometric shape of the wedge section of the plate

Заготовка длиной l и диаметром D расположена первоначально на участке плиты шириной b и совершает n оборотов на клиновом участке для упрочнения всей поверхности заготовки. Значение b было взято по результатам исследования [4] и составляет 40 мм для заготовок с малыми диаметрами (10, 20 мм), а величина n определяется по формуле

$$n = \frac{l - b}{2\pi D \tan \beta}. \quad (1)$$

По формуле (1) построена зависимость между количеством оборотов заготовки и углом клинового участка при разных диаметрах заготовки (**рис. 4**).

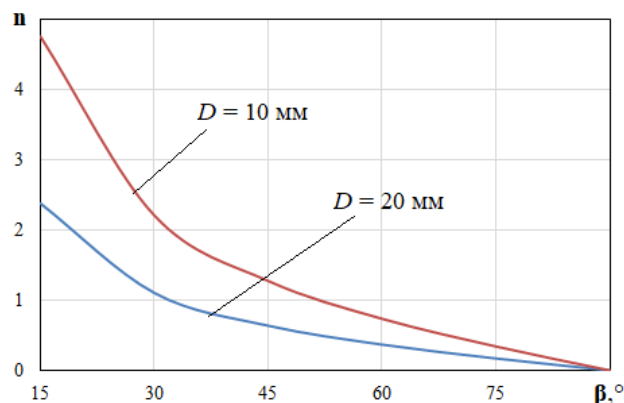


Рис. 4. Зависимость количества оборотов заготовки от величины угла клинового участка плит

Fig. 4. Dependence of the number of workpiece revolutions on the value of the angle of the plates wedge section

Из **рис. 4** следует, что количество оборотов заготовки на клиновом участке плит находится в обратной зависимости от величины угла β . При одинаковой геометрической форме плит чем меньше диаметр заготовки, тем больше количество оборотов она совершает на клиновом участке. Малый угол плиты β обеспечивает

возможность упрочнения заготовок с достаточно большой начальной кривизной, но для упрочнения всей поверхности заготовка должна совершить достаточно большое число оборотов, что связано с возможностью перенаклепа материала. Большой угол β исключает перенаклеп поверхностного слоя, но не позволяет упрочнить искривленные детали.

Результаты компьютерного моделирования

Для оценки напряженно-деформированного состояния в разных точках цилиндрического образца определены интенсивность временных и остаточных напряжений σ_i , интенсивность относительной деформации с учетом главных компонент тензора напряжений и деформаций по осям координат.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_z - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\varphi - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2]}, \quad (2)$$

где σ_z , σ_φ , σ_r – осевые, радиальные и тангенциальные напряжения по осям координат, МПа.

По аналогии определяется интенсивность деформации по формуле

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{9}[(\varepsilon_z - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_z)^2]}, \quad (3)$$

где ε_z , ε_φ , ε_r – компоненты осевых, радиальных и тангенциальных деформаций, мм/мм.

В процессе упрочнения клиновыми плитами угол клина β играет важную роль в формировании НДС цилиндрической заготовки. Увеличение угла β приводит к увеличению начальной площади контакта между заготовкой и клиновыми плитами, так как в этом случае боковые поверхности плит контактируют

с заготовкой под более острым углом, что увеличивает площадь контакта по длине заготовки. На **рис. 5** представлены максимальные интенсивности временных и остаточных напряжений на поверхности по длине заготовки, а на **рис. 6** в центральном поперечном сечении при разных значениях угла β клинового участка и разных диаметральных размерах заготовки.

Из **рис. 5** и **6** следует, что при упрочнении заготовки клиновыми плитами максимальные интенсивности временных и остаточных напряжений на поверхности больше, чем при упрочнении прямоугольными плитами ($\beta = 90^\circ$) (см. **рис. 5**). В центральном поперечном сечении максимальная интенсивность временных напряжений почти одинаковая при разных геометрических формах плит (см. **рис. 6**). Причем чем больше угол β клинового участка плит, тем больше интенсивность остаточных напряжений, и максимальное значение наблюдается при угле $\beta = 60^\circ$. Это объясняется тем, что при увеличении угла клиновых плит возрастает площадь контакта с заготовкой, что ведет к увеличению локальных напряжений на поверхности заготовки. Это может усилить качество процесса упрочнения, но в то же время увеличить риск возникновения повреждений на поверхности детали.

Результаты моделирования, представленные на **рис. 5**, показывают, что при $\beta = 60^\circ$ максимальные значения интенсивности временных напряжений превышают значения предела прочности материала (для исследуемого материала $\sigma_B = 480$ МПа), что указывает на возможность возникновения на поверхности заготовки дефектов. В центральном поперечном сечении заготовки максимальные значения интенсивности напряжений меньше, чем предел прочности материала (480 МПа) при всех диаметрах заготовки, что свидетельствует об отсутствии внутренних повреждений (см. **рис. 6**) [15].

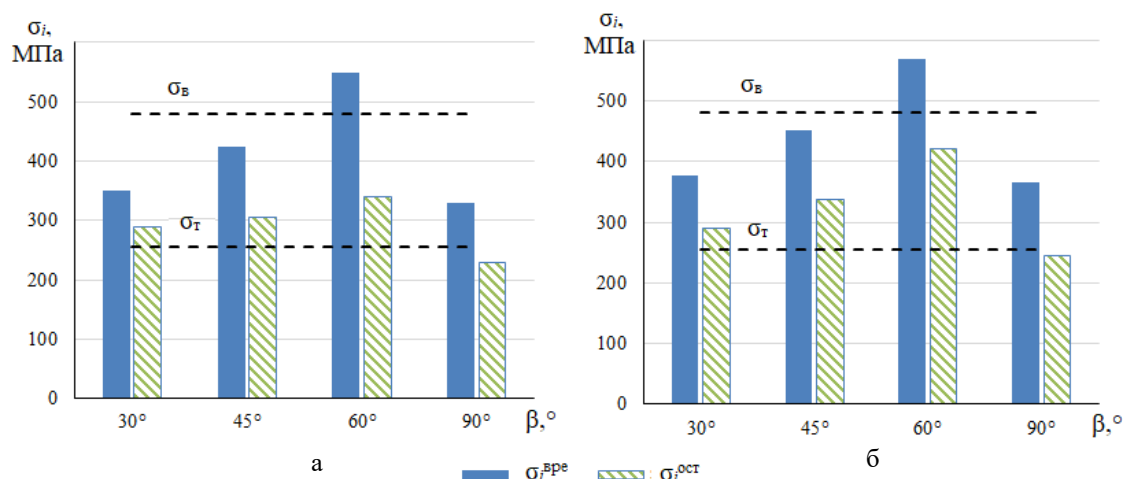


Рис. 5. Максимальные интенсивности временных и остаточных напряжений на поверхности заготовки при разных значениях угла β : а – $D = 10$ мм; б – $D = 20$ мм

Fig. 5. Maximum intensities of temporary and residual stresses on the surface of the workpiece at different values of the angle β : а is $D = 10$ mm, б is $D = 20$ mm

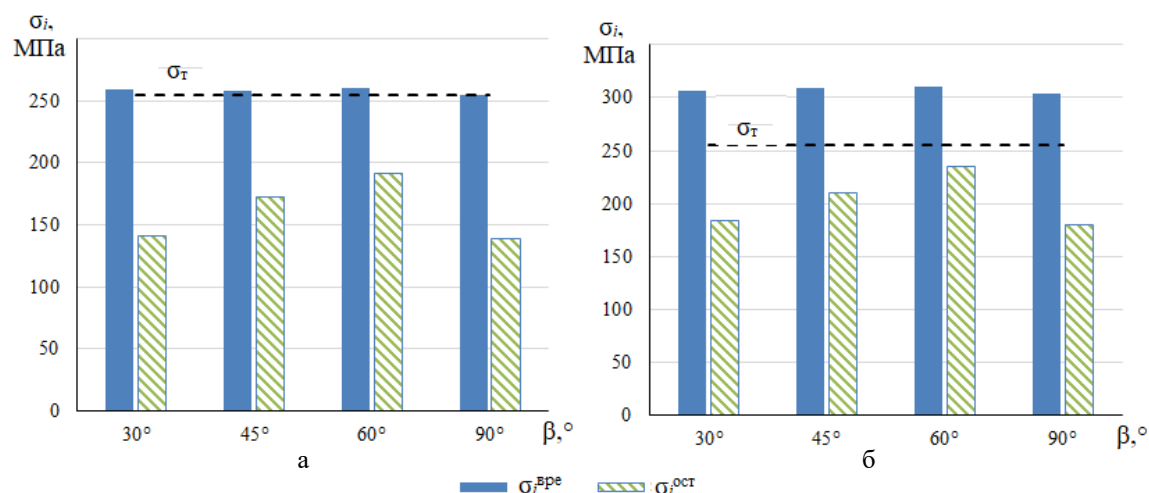


Рис. 6. Максимальные интенсивности временных и остаточных напряжений в центральном поперечном сечении заготовки при разных значениях угла β : а – $D = 10$ мм; б – $D = 20$ мм

Fig. 6. Maximum intensities of temporary and residual stresses in the central cross-section of the workpiece at different values of the angle β : а is $D = 10$ mm; б is $D = 20$ mm

Одним из самых важных качеств параметра процесса упрочнения является равномерность распределения остаточных напряжений на поверхности заготовки. На рис. 7 представлено распределение интенсивности остаточных напряжений по длине заготовки при разных диаметральных размерах и значениях угла β клинового участка плоских плит.

Центром координатной системы для расчета НДС является центральное поперечное сечение и ось Oy вдоль длины заготовки. Так как система симметричная, поэтому рассмотрим распределение напряжений от центра до одного края заготовки (соответственно по оси Oy от 0 до 60 мм). По результатам моделирования наблюдаются максимальные напряжения на концевой части заготовки. Из рис. 7 видно, что для разных диаметров заготовки наиболее равномерное распределение остаточных напряжений по

длине заготовки происходит при угле $\beta = 45^\circ$. Во всех остальных случаях наблюдается большая неравномерность распределения напряжений, которое может привести к концентрации напряжений [16].

На рис. 8 представлено распределение интенсивности остаточных напряжений по радиусу заготовки в центральном поперечном сечении.

Кривые напряжений показывают, что интенсивность остаточных напряжений уменьшается от поверхности к центру заготовки. Причем на поверхности значения напряжений больше, чем предел текучести материала. Это свидетельствует о том, что глубина пластической деформации при упрочнении клиновыми плитами эффективно происходит только в поверхностных слоях. На рис. 9 показаны поля распределения интенсивности остаточных напряжений и компонент тензор напряжений при $\beta = 45^\circ$ и $D = 10$ мм.

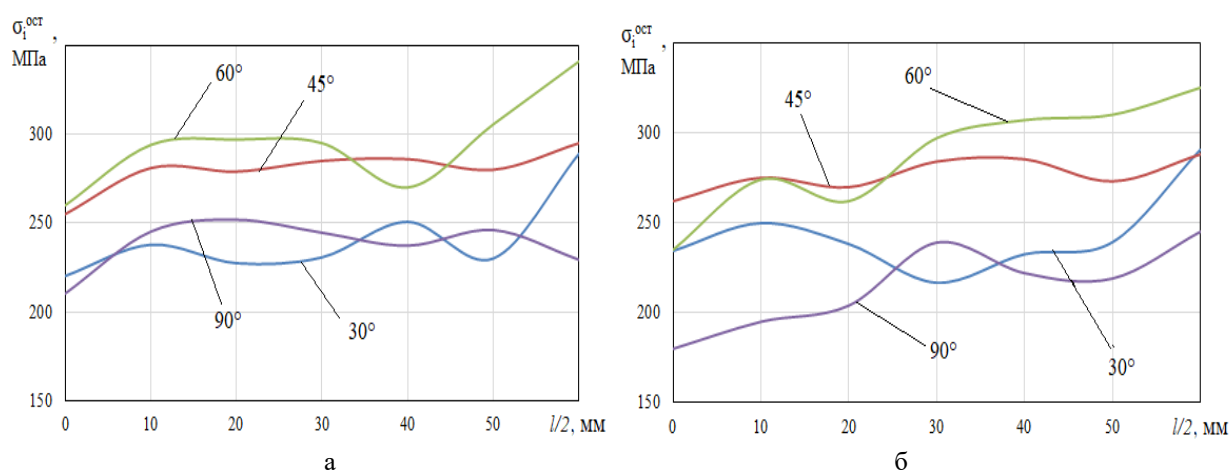


Рис. 7. Распределение интенсивности остаточных напряжений по длине заготовки при разных значениях угла β : а – $D = 10$ мм; б – $D = 20$ мм

Fig. 7. Distribution of residual stress intensity along the length of the workpiece for different values of the angle β : а is $D = 10$ mm; б is $D = 20$ mm

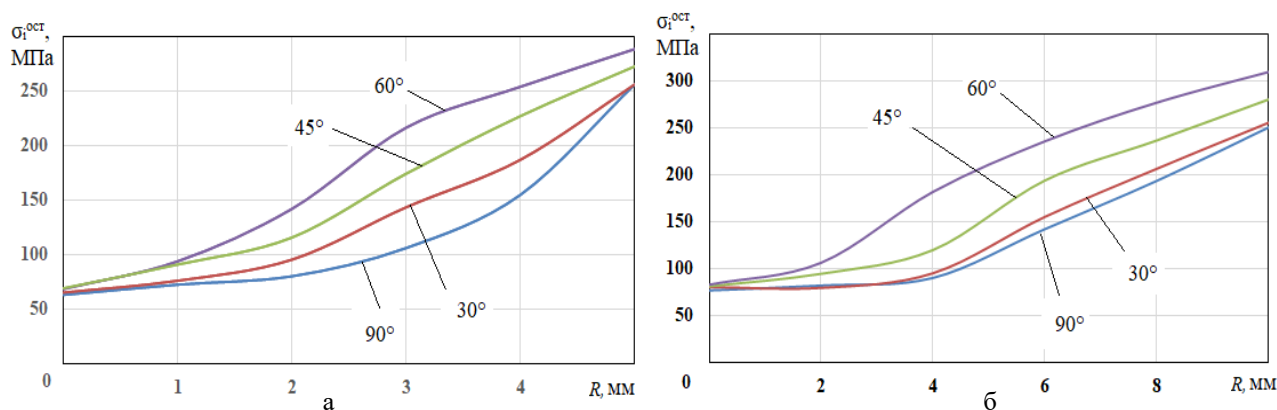


Рис. 8. Распределение интенсивности остаточных напряжений по радиусу заготовки при разных значениях угла β :
а – $D = 10$ мм; б – $D = 20$ мм

Fig. 8. Distribution of residual stress intensity along the radius of the workpiece for different values of the angle β :
а is $D = 10$ mm; б is $D = 20$ mm

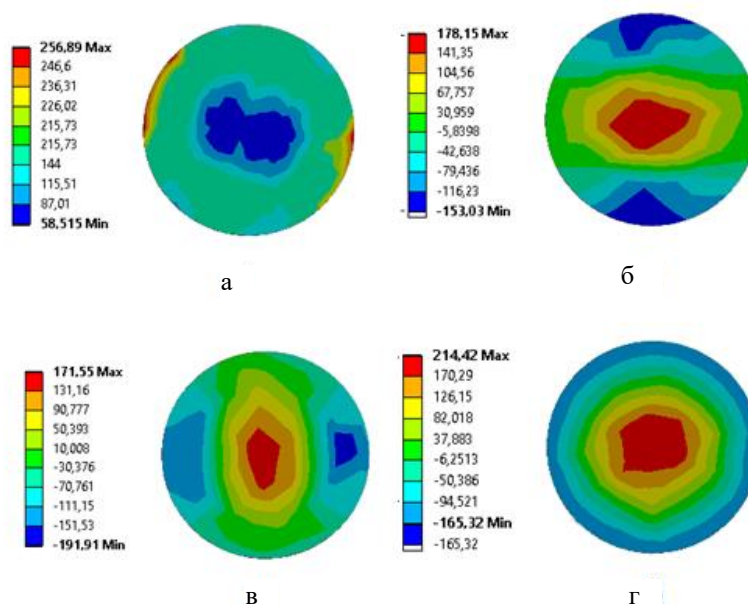


Рис. 9. Изополосы распределения интенсивности остаточных напряжений (а) и компоненты тензора напряжений σ_ϕ (б), σ_r (в), σ_z (г) при $D = 10$ мм и $\beta = 45^\circ$

Fig. 9. Isobands of residual stress intensity distribution (а) and stress tensor components σ_ϕ (б), σ_r (в), σ_z (г) at $D = 10$ mm and $\beta = 45^\circ$

Из **рис. 9** следует, что максимальные интенсивности остаточных напряжений возникают на поверхности заготовки и снижаются по мере приближения к центру (**рис. 9, а**). Тангенциальное, осевое и радиальное напряжения имеют знакопеременный характер. В центральной части сечения формируется область растягивающих напряжений, а на поверхности – сжимающих. При этом максимальное растягивающее напряжение является осевым. Представленные картины остаточных напряжений и его компонент тензор напряжений при упрочнении клиновыми плитами сравнивается с результатами исследования, полученными при обработке ППД плоскими прямоугольными

плитами [17]. Анализ показал, что при той или другой схеме упрочнения ППД компоненты тензора остаточных напряжений имеют аналогичный характер распределения, при этом осевые сжимающие напряжения при клиновых плитах больше по величине, что является благоприятным влиянием на циклическую долговечность заготовки при ее эксплуатации.

На **рис. 10** представлена глубина пластической деформации по радиусу цилиндра при разных значениях угла β , а на **рис. 11** поля распределения пластической деформации по поперечному сечению заготовки при $\beta = 45^\circ$.

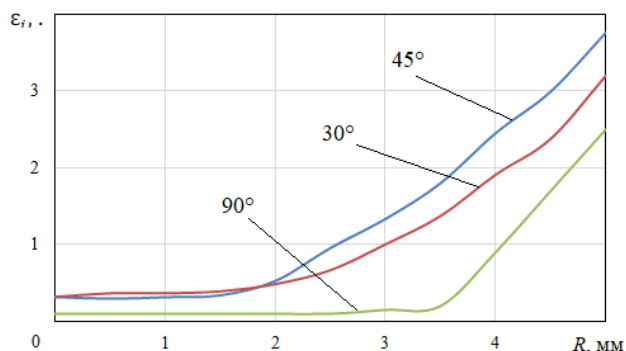


Рис. 10. Глубина пластической деформации по радиусу заготовки при разных значениях угла β

Fig. 10. Depth of plastic deformation along the radius of the workpiece at different values of the angle β

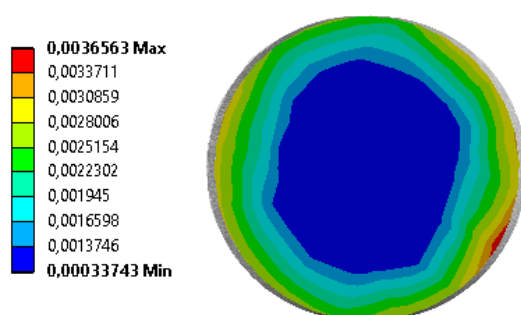


Рис. 11. Изополосы распределения интенсивности пластической деформации при $\beta = 45^\circ$

Fig. 11. Isobands of distribution of plastic deformation intensity at $\beta = 45^\circ$

Из рис. 10 следует, что глубина пластической деформации при упрочнении клиновыми плитами больше, чем при упрочнении прямоугольными ($\beta = 90^\circ$), что является положительным фактором, влияющим на качество процесса упрочнения. При $\beta = 45^\circ$ наблюдается равномерное распределение изополос интенсивности пластической деформации, величина которой снижается от поверхности к центру сечения заготовки (рис. 11).

Выводы

Таким образом, моделирование процесса упрочнения нежестких цилиндрических деталей ППД клиновыми плитами позволяет сделать следующие выводы:

1. Результаты исследования позволили выбрать рациональное значение угла клинового участка. Из всех рассмотренных случаев более равномерное распределение напряжений по длине заготовки наблюдается при $\beta = 45^\circ$. При таком значении угла максимальное временное напряжение в процессе упрочнения достигает величины меньше, чем предел прочности материала, что обеспечивает упрочнение без возникновения дефектов на поверхности заготовки.

2. Упрочнение клиновыми плитами с большим углом клина β (в данной работе 60°) приводит к локальному повышению напряжений, что может вызвать дефекты на поверхности заготовки и снизить эффективность процесса. Уменьшение угла β позволяет снизить концентрацию напряжений и вероятность образования дефектов.

3. При упрочнении заготовки плоскими плитами на поверхности возникает зона пластической деформации. Глубина пластической деформации в поперечном сечении заготовки зависит от геометрической формы рабочего инструмента. При этом глубина пластической деформации при упрочнении заготовки клиновыми плитами больше, чем прямоугольными плитами, то есть клиновая форма плит дает большой эффект упрочнения.

Список источников

1. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслев [и др.]. М.: Машиностроение, 2006. 448 с.
2. Зайдес С.А., Ву К.Х. Влияние пространственной ориентации тороидального ролика на напряженно-деформированное состояние цилиндрической заготовки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2024. Т. 20, № 11(239). С. 489-495.
3. Rahman Seifi, Kaveh Abbasi. Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating // Engineering Failure Analysis. 2015, vol. 57, pp. 310-322.
4. Зайдес С.А., Буй М.З., Пономарев Б.Б. Правка локального участка цилиндрических деталей перед обкаткой гладкими плитами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22, № 3. С. 71-80.
5. Effect of the Tool Path on Hardness Uniformity in an Annular Zone of X20Cr13 Steel Surface-Hardened by Friction Stir Processing / Kuznetsov V.P., Skorobogatov A.S., Kolumbaev E.A. et al. // Phys Mesomech 26. 2023. pp. 593-607.
6. Symonova A., Drahobetskyi V., Kulynych V. (). Enhancing Service Life and Durability of Machine Parts Through Surface Plastic Deformation // Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering / Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Pitel, J. (eds) Springer, Cham. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_29
7. Богатов А.А. Остаточные напряжения и разрушение металла // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2007. №10. С. 27-34.
8. Емельянов В.Н. Прецизионная правка валов поверхностным пластическим деформированием / В.Н. Емельянов // Машиностроитель. 2001. №1. С. 9-10.
9. Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Расчетная модель остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя при размерном совмещенном обкатывании // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2008. № 5(69). С. 50-58.
10. Патент № 2827624 C1 Российская Федерация, МПК B21D 3/00, B24B 39/04. Способ правки и упрочнения

- цилиндрических деталей: № 2024106758: заявл. 15.03.2024; опубл. 30.09.2024 / С. А. Зайдес, М. З. Буй.
11. Патент № 2600302 С1 Российская Федерация, МПК В21Н 1/18. Устройство для обкатывания цилиндрических изделий плоскими инструментами: № 2015114157/02: заявл. 16.04.2015; опубл. 20.10.2016 / С. А. Зайдес, Д. Ф. Фам.
 12. Матяш В. И. Математическое моделирование формообразования деталей класса нежестких валов / В.В. Максимов, А.В. Анкин, В.И. Матяш // Вестник машиностроения. 1997. №3. С. 27-30.
 13. Modeling of Vibrational-Centrifugal Strengthening for Functional Surfaces of Machine Parts / Stupnytskyi, V., Kusyi, Y., Dragašius, E., Baskutis, S., Chatys, R. // Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering / Tonkonogiy, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Springer, Cham. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_21
 14. Yuncai Zhaoa, Delang Guob, Fangping Hu. Finite element simulation of web falling during heavy rail roller straightening. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2011, vol. 2, pp. 44–49.
 15. Study on Large Plastic Deformation Mechanism of AlCo-CrFeNi2.1 Eutectic High-Entropy Alloys Prepared by Laser Additive Manufacturing / Zhang, X., Cui, Y., Cai, Y. et al. // J. of Materi Eng and Perform. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-10438-1>
 16. Experimental study on the static rolling friction coefficient of a flat-roller-flat configuration considering surface roughness / Jichao Li, Yi Zhang, Qingxue Shang, Tao Wang // Structures. 2024, vol. 65, 106711.
 17. Zaides S.A., Fong D. Fam Roughness of Cylindrical Parts in Transverse Burnishing by Flat Plates // Russian Engineering Research. 2018, vol. 38, no. 12, pp. 921-925. DOI: 10.3103/S1068798X18120420.
 5. Kuznetsov V.P., Skorobogatov A.S., Kolubaev E.A., et al. Effect of the Tool Path on Hardness Uniformity in an Annular Zone of X20Cr13 Steel Surface-Hardened by Friction Stir Processing. *Phys Mesomech*. 26, 593-607 (2023).
 6. Symonova A., Drahobetskyi V., Kulynych V. (2024). Enhancing Service Life and Durability of Machine Parts Through Surface Plastic Deformation. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_29.
 7. Bogatov A.A. Residual stresses and metal failure. *Kuznetchno-shtampovoychnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and stamping production. Processing of materials by pressure], 2007;(10):27-34. (In Russ.)
 8. Emelyanov V.N. Precision straightening of shafts by surface plastic deformation. *Mashinostroitel* [Mechanical engineer], 2001;(1):9-10. (In Russ.)
 9. Blyumenshteyn V.Yu., Makhlov M.S. Calculation model of residual stresses of the hardened surface layer during dimensional combined rolling. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2008;(5(69)):50-58. (In Russ.)
 10. Zaydes S.A., Bui M.Z. *Sposob pravki i uprochneniya tsilindricheskikh detaley* [Method of straightening and strengthening cylindrical parts]. Patent RF, no. 2827624, 2024.
 11. Zaydes S.A., Fam D.F. *Ustroistvo dlia obkativaniia tsilindricheskikh izdelii ploskimi instrumentami* [Device for rolling cylindrical products with flat tools]. Patent RF, no. 2600302, 2016.
 12. Maksimov V.V., Ankin A.V., Matyash V.I. Mathematical modeling of forming parts of the class of non-rigid shafts. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 1997;(3):27-30. (In Russ.)
 13. Stupnytskyi V., Kusyi Y., Dragašius E., Baskutis S., Chatys R. Modeling of Vibrational-Centrifugal Strengthening for Functional Surfaces of Machine Parts. *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_21
 14. Yuncai Zhaoa, Delang Guob, Fangping Hu. Finite element simulation of web falling during heavy rail roller straightening. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2011;2:44-49.
 15. Zhang X., Cui Y., Cai Y., et al. Study on Large Plastic Deformation Mechanism of AlCoCrFeNi2.1 Eutectic High-Entropy Alloys Prepared by Laser Additive Manufacturing. *J. of Materi Eng and Perform*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-10438-1>
 16. Jichao Li, Yi Zhang, Qingxue Shang, Tao Wang. Experimental study on the static rolling friction coefficient of a flat-roller-flat configuration considering surface roughness. *Structures*. 2024;65:106711.
 17. Zaides S.A., Fong D. Fam Roughness of Cylindrical Parts in Transverse Burnishing by Flat Plates. *Russian Engineering Research*. 2018;38(12):921-925. DOI: 10.3103/S1068798X18120420.

References

1. Suslov A.G., et al. *Technologicheskoe obespechenie i povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv detaley i ikh soedineniy* [Technological support and improvement of operational properties of parts and their connections]. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 448p. (In Russ.)
2. Zaydes S.A., Vu K.H. The influence of spatial orientation of a toroidal roller on the stress-strain state of a cylindrical workpiece. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya* [Hardening technologies and coatings], 2024;20(11(239)):489-495. (In Russ.)
3. Rahman Seifi, Kaveh Abbasi. Friction coefficient estimation in shaft/bush interference using finite element model updating. *Engineering Failure Analysis*. 2015;57:310-322.
4. Zaydes S.A., Bui M.Z., Ponomaryov B.B. Correction of a local section of cylindrical parts before rolling with smooth plates. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2024;22(3):71-80. (In Russ.)

Поступила 05.03.2025; принята к публикации 16.04.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 05/03/2025; revised 16/04/2025; published 30/09/2025

Зайдес Семен Азикович – доктор технических наук, профессор,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: zsa@istu.edu. ORCID 0000-0001-9416-7749

Буй Мань Зунг – аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: manhdungbuik52@gmail.com. ORCID 0009-0003-6390-105X

Semen A. Zaides – DrSc (Eng.), Professor,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: zsa@istu.edu. ORCID 0000-0001-9416-7749

Bui Manh Zung – Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: manhdungbuik52@gmail.com. ORCID 0009-0003-6390-105X



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

УДК 621.789:538.911

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-97-105

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗ И СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫСОКОКРЕМНИСТОГО СИЛУМИНА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Шлярова Ю.А., Шляров В.В., Серебрякова А.А., Загуляев Д.В.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. **Актуальность работы.** Применение комбинированного модифицирования сплава Al-15%Si методами внешних энергетических воздействий позволяет локально упрочнить поверхностный слой деталей и узлов, изготавливаемых из алюминиевых сплавов. **Цель работы.** Выявление закономерностей изменения фазового состава и структуры сплава высококремнистого силумина, подвергнутого комбинированной модификации в зависимости от глубины модифицированного слоя. **Используемые методы.** Выполнено поверхностное модифицирование сплава Al-15%Si, которое заключалось в комбинировании электровзрывного легирования поверхности образцов порошком Y_2O_3 (установка ЭВУ 60/10) и облучения электронным пучком модифицированных электровзрывным методом образцов. Осуществляли на установке «СОЛЮ» при следующих параметрах облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов $E_s = 35$ Дж/см² при длительности импульсов воздействия 150 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов $0,3$ с⁻¹, давление рабочего газа (аргон) в рабочей камере 0,02 Па. **Новизна.** Разработка уникального способа модификации сплава Al-15%Si, заключающегося в комбинированной обработке и позволяющего улучшить его износостойкость и эксплуатационные свойства по сравнению с материалом в исходном состоянии. **Результаты.** В результате проведения рентгенофазового анализа установлено, что модифицированная поверхность характеризуется многофазной структурой поверхностного слоя. На расстоянии 25 мкм от поверхности выявлена зеренная структура, сформированная атомами алюминия и титана, а на глубине 65 мкм обнаружена структура пластинчатой эвтектики, в которой пластины твердого раствора на основе алюминия чередуются с пластинами кремния. По результатам индифференцирования микроэлектронограмм и темнопольного анализа фольг, полученных на поверхности образца, выявлены частицы в виде игл или пластин, которые представляют собой элементный состав $Ti_4Al_{13}Y_6$, а также окислы алюминия, титана и иттрия, и на расстоянии 25 мкм от поверхностного слоя найдены частицы окисной фазы с составом TiO_2 и YTi_2O_6 , в объеме зерен на дислокациях обнаруживаются наноразмерные (10-15 нм) частицы, предположительно TiO_2 или YAl_3 . **Практическая значимость.** Применение данного способа комбинированной модификации в производстве высокопрочных и износостойких компонентов для авиационной и автомобильной промышленности, а также в других сферах, где требуются материалы с улучшенными механическими свойствами.

Ключевые слова: силумин Al-15%Si, электровзрывное легирование, электронно-пучковая обработка, порошок Y_2O_3 , комбинированная обработка, фазовый состав, рентгенограмма, микроэлектронограмма

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00665, <https://rscf.ru/project/24-29-00665/>.

© Шлярова Ю.А., Шляров В.В., Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., 2025

Для цитирования

Распределение фаз и структурные изменения высококремнистого силумина после электровзрывного легирования и обработки электронным пучком / Шлярова Ю.А., Шляров В.В., Серебрякова А.А., Загуляев Д.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 97-105. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-97-105>



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

PHASE DISTRIBUTION AND STRUCTURAL CHANGES OF HIGH-SILICON SILUMIN AFTER ELECTRO-EXPLOSIVE ALLOYING AND ELECTRON BEAM TREATMENT

Shliarova Yu.A., Shliarov V.V., Serebryakova A.A., Zaguliaev D.V.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The Relevance of this Work. The use of combined modification of the Al-15%Si alloy by methods of external energy influences makes it possible to locally strengthen the surface layer of parts and assemblies made of aluminum alloys. **Objectives.** It lies in identifying patterns of changes in the phase composition and structure of a high-silicon silumin alloy subjected to a combined modification depending on the depth of the modified layer. **Methods Applied.** Surface modification of the Al-15%Si alloy was performed, which consisted in combining electro-explosive alloying of the sample surface with Y_2O_3 powder (EVU 60/10 unit) and electron beam irradiation of the samples modified by the electro-explosive method (SOLO unit, with the following irradiation parameters: accelerated electron energy 18 keV, electron beam energy density $E_S = 35 \text{ J/cm}^2$ with a pulse duration of 150 microseconds, the number of pulses is 3, the pulse repetition rate is 0.3 s^{-1} , the pressure of the working gas (argon) in the working chamber is 0.02 Pa). **Originality.** It lies in the development of a unique method for modifying the Al-15%Si alloy, which consists in combined processing and improves its wear resistance and performance properties compared to the material in its original state. **Result.** As a result of X-ray phase analysis, it was found that the modified surface is characterized by a multiphase structure of the surface layer. At a distance of 25 microns from the surface, a grain structure formed by aluminum and titanium atoms was revealed, and at a depth of 65 microns, a lamellar eutectic structure was found in which aluminum-based plates of solid solution alternate with silicon plates. According to the results of microelectronogram indexing and dark-field analysis of foils obtained on the surface of the sample, particles in the form of needles or plates representing the elemental composition $Ti_4Al_3Y_6$, as well as aluminum, titanium, and yttrium oxides were identified, and particles of the oxide phase with the composition TiO_2 and YTi_2O_6 were found at a distance of 25 microns from the surface layer, nanoscale (10-15 nm) particles, presumably TiO_2 or YAl_3 , are found in the volume of grains on the dislocations. **Practical Relevance.** It lies in the application of this combined modification method in the production of high-strength and wear-resistant components for the aviation and automotive industries, as well as in other areas where materials with improved mechanical properties are required.

Keywords: silumin Al-15%Si, electroexplosive alloying, electron beam processing, Y_2O_3 powder, combined processing, phase composition, X-ray diffraction pattern, microelectron diffraction pattern

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-00665, <https://rscf.ru/project/24-29-00665/>.

For citation

Shliarova Yu.A., Shliarov V.V., Serebryakova A.A., Zaguliaev D.V. Phase Distribution and Structural Changes of High-Silicon Silumin after Electro-Explosive Alloying and Electron Beam Treatment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 97-105. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-97-105>

Введение

Современные технологии обработки материалов требуют постоянного поиска инновационных решений для улучшения их физико-механических свойств. Одной из перспективных стратегий является электро-взрывное легирование и электронно-пучковая обработка, которые открывают новые горизонты в модификации свойств сплавов [1, 2]. Эти методы обработки позволяют значительно улучшить структуру и, соответственно, характеристики материалов, что, в свою очередь, может привести к повышению их долговечности и эксплуатационных качеств [3, 4].

В последние годы особое внимание уделяется высококремнистым силуминам, обладающим хорошими антикоррозионными свойствами и высокой прочно-

стью [5]. Эти материалы обладают уникальными характеристиками, которые делают их оптимальными для применения в различных отраслях, включая автомобилестроение и аэрокосмическую промышленность [6]. Высококремнистые сплавы, такие как Al-Si, продемонстрировали значительные преимущества в условиях коррозионной среды и механических нагрузок, что делает их предпочтительными для использования в конструкциях, требующих высокой надежности и устойчивости к внешним воздействиям [7].

Кроме этого, использование современных методов, таких как электронно-пучковая обработка [8, 9], способствует созданию материалов с заданными свойствами. Например, использование электронно-пучковой обработки позволяет улучшить микроструктуру материалов, что, в свою очередь, влияет на

их физико-механические характеристики. Также следует отметить, что сочетание двух и более видов обработки приводит к наиболее выраженному эффекту, показанному в ранних работах авторского коллектива, а именно к кардинальным изменениям состояния дефектной субструктуры поверхностного слоя материала [10].

Целью данной статьи является выявление закономерностей изменения фазового состава и структуры сплава высококремнистого силумина, подвергнутого комбинированной модификации в зависимости от глубины модифицированного слоя.

Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования были использованы образцы силумина Al-15%Si. Элементный состав силумина: Si – 15,9; Fe – 0,24; Cu – 0,07; Mn – 0,005; Ni – 0,005; Ti – 0,006; Cr – 0,001; V – 0,013; Mg < 0,001; S – 0,032; Pb < 0,001; Zn – 0,021, ост. Al в мас. %. Образцы силумина имели размеры $15 \times 15 \times 10$ мм³. Электровзрывное легирование поверхности образцов осуществляли порошком Y_2O_3 на установке ЭВУ 60/10 (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк) [11], при следующих параметрах: $m_{(Al)} = 0,0589$ г; $m_{(Y_2O_3)} = 0,0589$; $U = 2,8$ кВ.

Облучение модифицированных электровзрывным методом образцов осуществляли на установке «СОЛО», входящей в перечень объектов современной исследовательской инфраструктуры Российской Федерации (УНУ «УНИКУУМ» (<http://www.ckp-rf.ru/usu/434216/>) с использованием одноименного источника электронов в среде аргона особой чистоты (99,999%) при давлении 35 МПа [4]. Параметры облучения: энергия ускоренных электронов 18 кэВ, плотность энергии пучка электронов $E_S = 35$ Дж/см² при длительности импульсов воздействия 150 мкс, количество импульсов 3, частота следования импульсов $0,3$ с⁻¹, давление рабочего газа (аргон) в рабочей камере 0,02 Па.

Исследование элементного состава и дефектной структуры поверхности модифицирования образцов силумина осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (прибор Philips SEM-515 с микроанализатором EDAX ECON IV). Исследование фазового состава и дефектной субструктуры модифицированного слоя силумина осуществляли методами просвечивающей дифракционной электронной микроскопии (прибор JEOL JEM-2100F) [12, 13].

Подготовку образцов (фольги толщиной 0,2-0,3 мкм) для просвечивающей электронной микроскопии осуществляли в два этапа. На первом этапе вырезали из объемного образца пластинки с помощью Isomet Low Sped Saw, после чего утоняли бомбардировкой поверхности пластинок ионами и нейтральными атомами аргона на установке Ion Slicer (EM-09100IS). Пластины вырезали в сечении, перпендикулярном модифицированной поверхности образца. Это позволяло на одной фольге исследовать изменение струк-

туры материала при контролируемом удалении от модифицированной поверхности в объем образца на расстояние 200-300 мкм. Состояние кристаллической решетки и фазовый состав модифицированного слоя изучали методами рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 6000) на CuK_{α} -излучении. Анализ фазового состава проводили с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4.

Результаты исследований

Фазовый состав модифицированного поверхностного слоя был изучен с использованием методов рентгенофазового анализа. На **рис. 1** представлена рентгенограмма, полученная от образца силумина, который прошел комплексную обработку, включающую электровзрывное легирование с последующим облучением импульсным электронным пучком. Проведенный анализ рентгенограммы продемонстрировал, что химические элементы, обнаруженные в поверхностном слое, формируют многофазную структуру. В этой структуре присутствуют следующие компоненты: твердый раствор алюминия (Al), состав которого составляет 45 мас. %, кремний (Si) в количестве 9 мас. %, алюминид титана (TiAl) с содержанием 20 мас. %, оксид алюминия (Al_2O_3) на уровне 20 мас. % и оксид иттрия (Y_2O_3), который составляет 6 мас. %. Составленный многофазный слой демонстрирует потенциальные улучшения в термостойкости и механических свойствах.

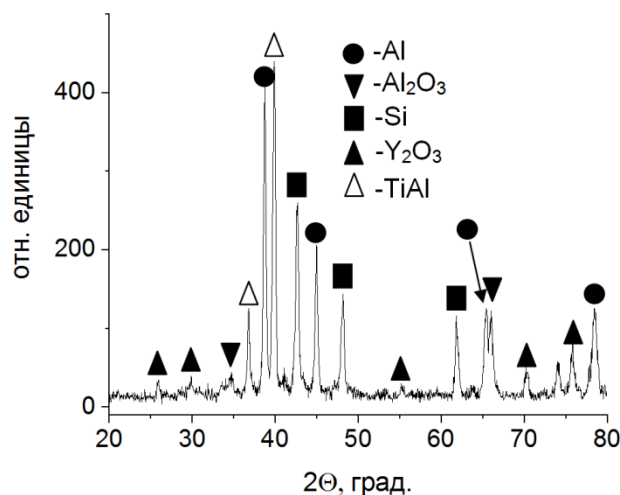


Рис. 1. Рентгенограмма силумина, подвергнутого комбинированной обработке, сочетающей электровзрывное легирование и последующее облучение импульсным электронным пучком при $E_S = 35$ Дж/см²

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of silumin subjected to combined processing, combining electro-explosive alloying and subsequent irradiation with a pulsed electron beam at $E_S = 35$ J/cm²

Распределение фаз в объёме модифицированного слоя и визуализация распределения химических элементов в нём были изучены с использованием методов просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, применяя методику индицирования микроэлектроннограмм и метод темнопольного анализа. Результаты элементного анализа объёма поверхностного слоя толщиной примерно 6 мкм представлены на **рис. 2**. Ясно видно, что области, обогащенные атомами алюминия, имеют округлую форму и размеры в диапазоне от 0,5 до 0,63 мкм (**рис. 2, а, б**). В то же время области, обогащенные атомами титана, формируют включения хлопьевидной формы, размеры которых варьируются от 0,6 до 0,78 мкм (**рис. 2, в**). Атомы кремния, очевидно, вместе с некоторыми атомами иттрия формируют прослойки, расположенные на границах включений, содержащих алюминий и титан (**рис. 2, г, д**). Атомы железа также наблюдаются на границах включений, обогащенных алюминием и титаном (**рис. 2, е**).

Фазовый состав области фольги, показанной на **рис. 2, а**, был исследован с применением метода индицирования микроэлектроннограммы в сочетании с темнопольным анализом (**рис. 3**). Проведенный анализ позволил выявить несколько особенностей структурных элементов: во-первых, были обнаружены зер-

на твердого раствора на основе алюминия, размер которых составляет от 400 до 500 нм (**рис. 3, в**). Во-вторых, зафиксированы частицы в виде игл или пластинок, которые представляют собой элементный состав $Ti_4Al_{43}Y_6$ (**рис. 3, г**). Также были обнаружены частицы окислов титана, алюминия и иттрия, размеры которых варьируются от 20 до 45 нм (**рис. 3, д**). Дополнительно представлено распределение химических элементов в слое, который находится на расстоянии 25 мкм от поверхности модифицирования, как показано на **рис. 4**.

При сопоставлении результатов на **рис. 2, а**, и **рис. 4, а** можно отметить аналогичные структурные особенности в образующихся элементах: наблюдается зеренная структура, созданная атомами алюминия и титана. Вдоль границ этих зерен можно увидеть прослойки, которые обогащены атомами кремния и иттрия. Это может указывать на процессы диффузии элементов и изменения микроструктуры материала в результате модификации, что, в свою очередь, может оказывать существенное влияние на механические и физические свойства материала. Таким образом, результаты анализа не только подтверждают наличие различных фаз, но и позволяют делать выводы о распределении и взаимодействии химических элементов в пределах исследуемого материала.

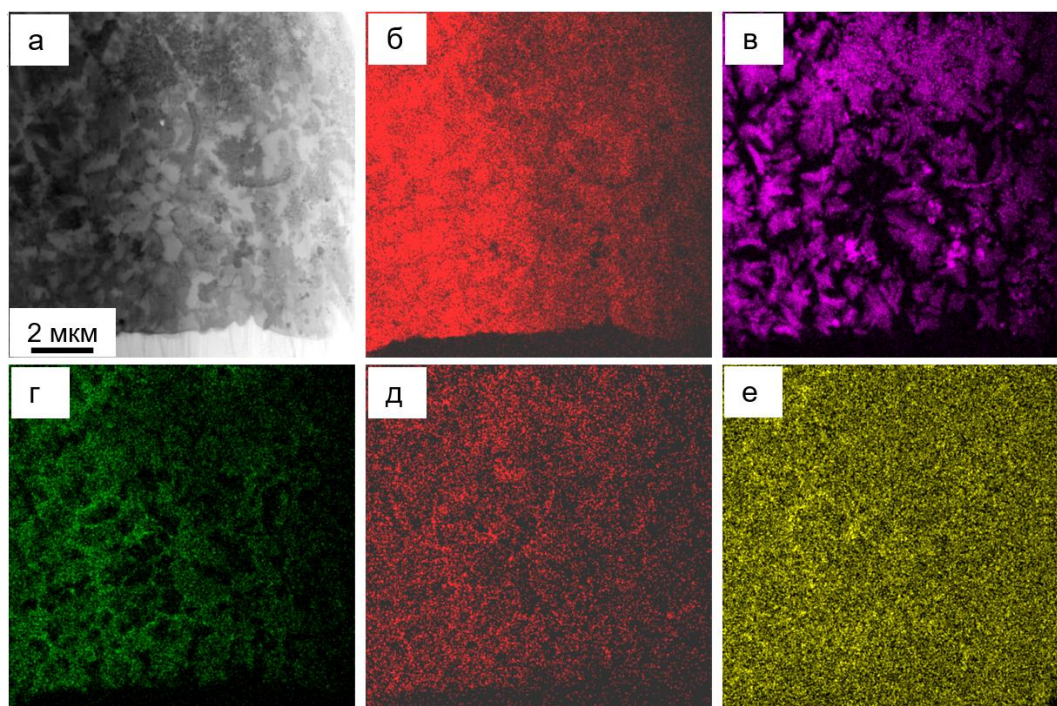


Рис. 2. ПЭМ-изображение структуры поверхностного слоя образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке (а); изображение участка а, полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов Al (б), Ti (в), Si (г), Y (д), Fe (е)

Fig. 2. STEM of the structure of the surface layer of a silumin sample subjected to combined treatment (a); image of section a obtained in the characteristic X-ray radiation of atoms of Al (б), Ti (в), Si (г), Y (д), Fe (е)

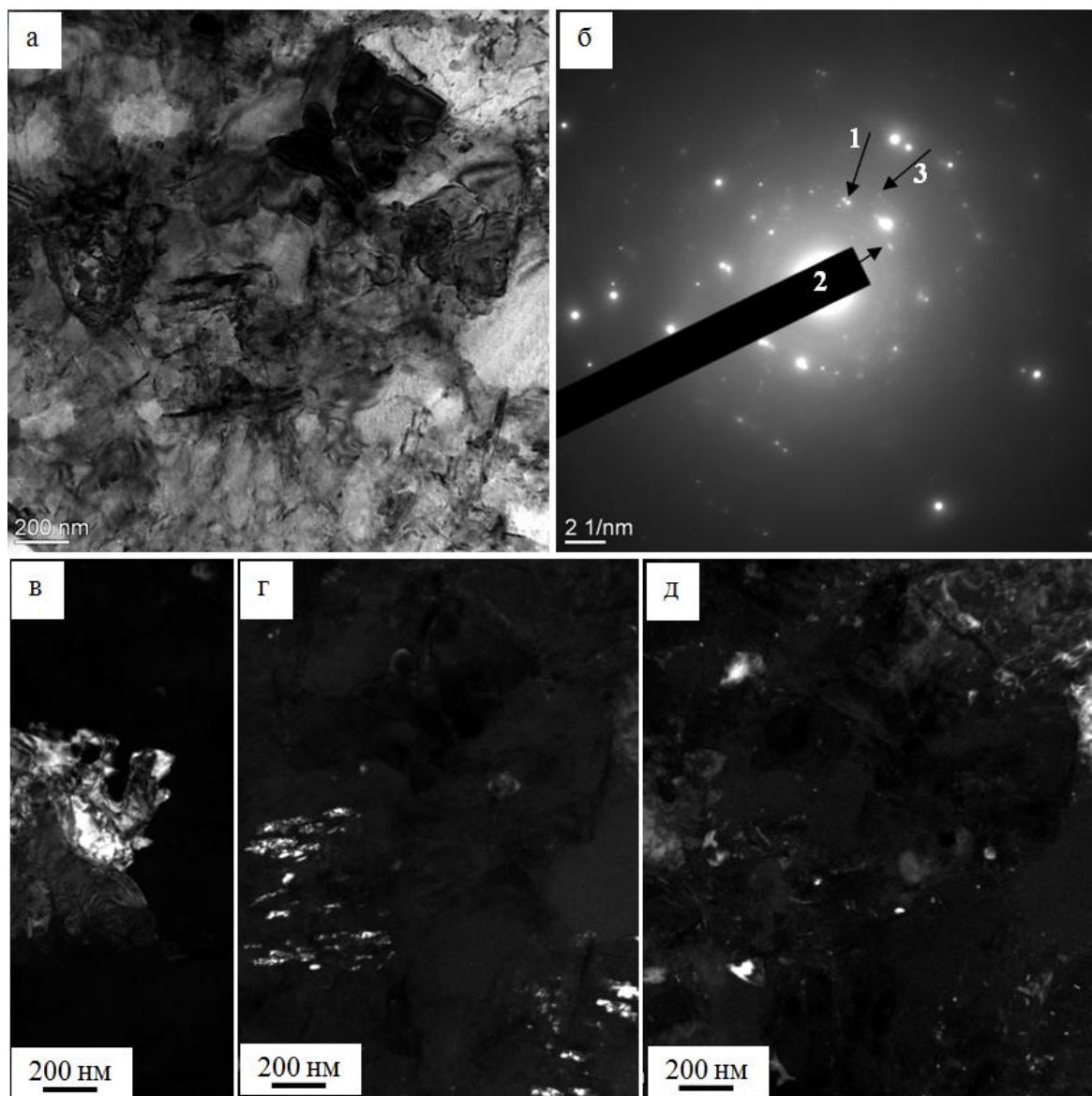


Рис. 3. ПЭМ-изображение структуры поверхностного слоя силумина, модифицированного комбинированным методом: а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в–д – темные поля, полученные в рефлексах $[111]\text{Al}$ (в), $[206]\text{Ti}_4\text{Al}_{43}\text{Y}_6 + [102]\text{Ti}_5\text{O}_9$ (г), $[440]\text{Y}_2\text{O}_3 + [132]\text{TiO}_2 + [220]\text{YAlO}_3$ (д) (на б стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: для в – 1, для г – 2, для д – 3)

Fig. 3. STEM image of the structure of the surface layer of silumin modified by the combined method: a is light field; b is microelectron diffraction pattern; в–д are dark fields obtained in reflexes $[111]\text{Al}$ (в), $[206]\text{Ti}_4\text{Al}_{43} + [102]\text{Ti}_5\text{O}_9$ (г), $[440]\text{Y}_2\text{O}_3 + [132]\text{TiO}_2 + [220]\text{YAlO}_3$ (д); on б the arrows indicate the reflexes in which dark fields are obtained: for в – 1, for г – 2, for д – 3

На **рис. 5** представлены результаты анализа фазового состава участка фольги, находящегося на расстоянии 25 мкм от поверхности модифицирования. Установлено присутствие зерен, сформированных твердым раствором на основе алюминия (**рис. 5, в**). Внутри зерен на дислокациях выявлены наночастицы размером 10–15 нм, которые предположительно являются фазами TiO_2 или YAl_3 . На границах зерен алюминия обнаружены слои, содержащие кремний, а также оксиды титана и иттрия (**рис. 5, г**). Области, обогащенные атомами титана, показаны на **рис. 5, д**.

Методами микроэлектронной микроскопии установлено наличие частиц окисных фаз, таких как TiO_2 и YTi_2O_6 , в указанных областях.

На **рис. 6** показано распределение химических элементов в слое, находящемся на расстоянии 65 мкм от поверхности модифицирования. Зафиксирована структура пластинчатой эвтектики, где пластины твердого раствора на основе алюминия чередуются с пластинами кремния. Также в зерне эвтектики обнаружены включения пластинообразной формы, обогащенные атомами железа (**рис. 6, г**).

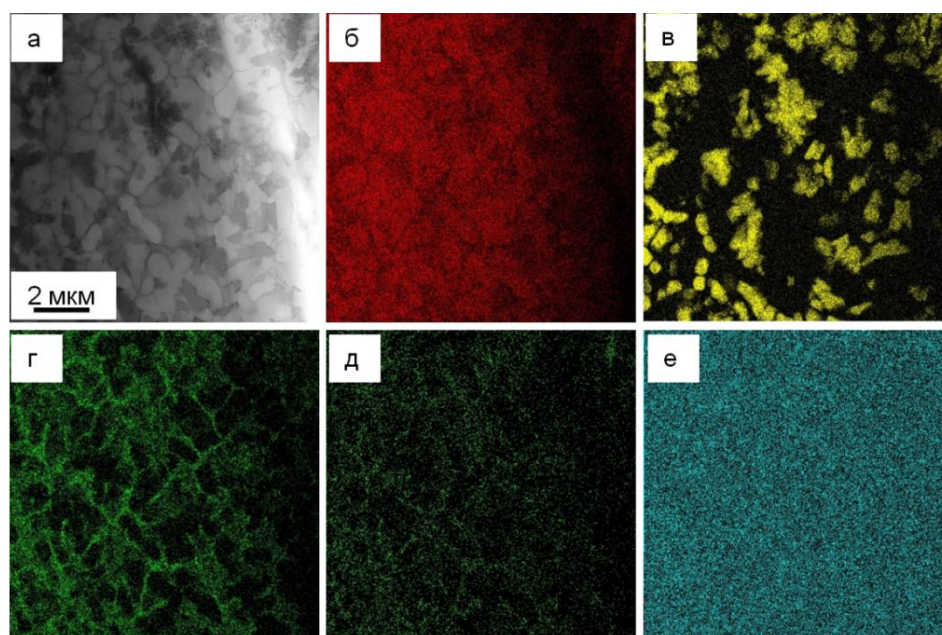


Рис. 4. ПЭМ-изображение структуры слоя образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке, расположенного на глубине 25 мкм (а); изображение участка а, полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов Al (б), Ti (в), Si (г), Y (д), Fe (е)

Fig. 4. STEM image of the structure of the silumin sample layer subjected to combined processing, located at a depth of 25 microns (a); image of the site a obtained in the characteristic X-ray radiation of Al (б), Ti (в), Si (г), Y (д), Fe (е) atoms

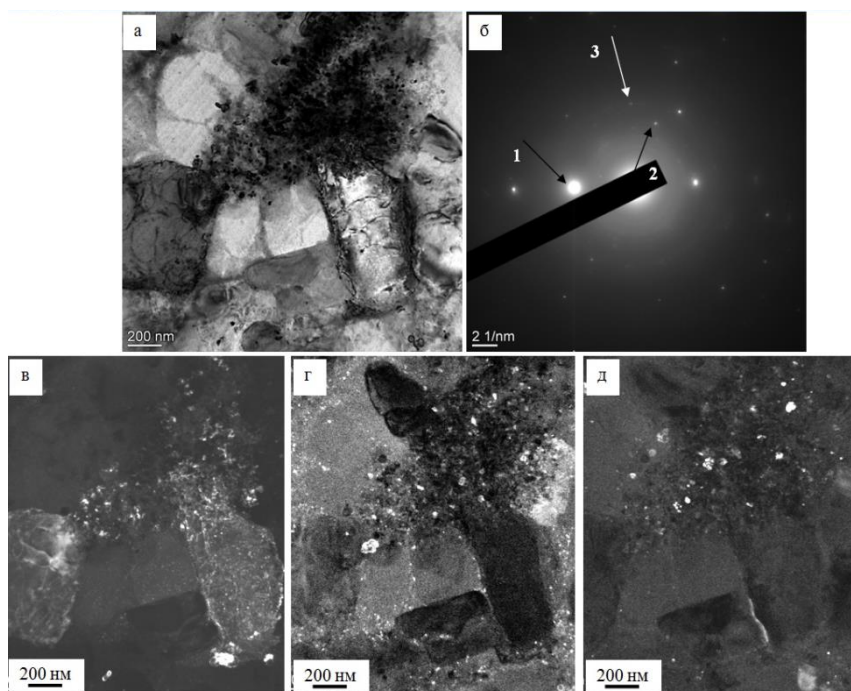


Рис. 5. ПЭМ-изображение структуры слоя силумина, модифицированного комбинированным методом, расположенного на глубине 25 мкм: а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в-д – темные поля, полученные в рефлексах $[002]\text{Al} + [210]\text{TiO}_2 + [211]\text{YAl}_3$ (в), $[220]\text{Si} + [231]\text{TiO}_2 + [440]\text{Y}_2\text{O}_3$ (г), $[110]\text{Ti} + [223]\text{YTi}_2\text{O}_6$ (д) (на б стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: для в – 1, для г – 2, для д – 3)

Fig. 5. STEM image of the structure of the silumin layer modified by the combined method, located at a depth of 25 microns: a is light field; б is microelectron diffraction pattern; в-д are dark fields obtained in reflexes $[002]\text{Al} + [210]\text{TiO}_2 + [211]\text{YAl}_3$ (в), $[220]\text{Si} + [231]\text{TiO}_2 + [440]\text{Y}_2\text{O}_3$ (г), $[110]\text{Ti} + [223]\text{YTi}_2\text{O}_6$ (д); on б the arrows indicate the reflexes in which dark fields are obtained: for в – 1, for г – 2, for д – 3

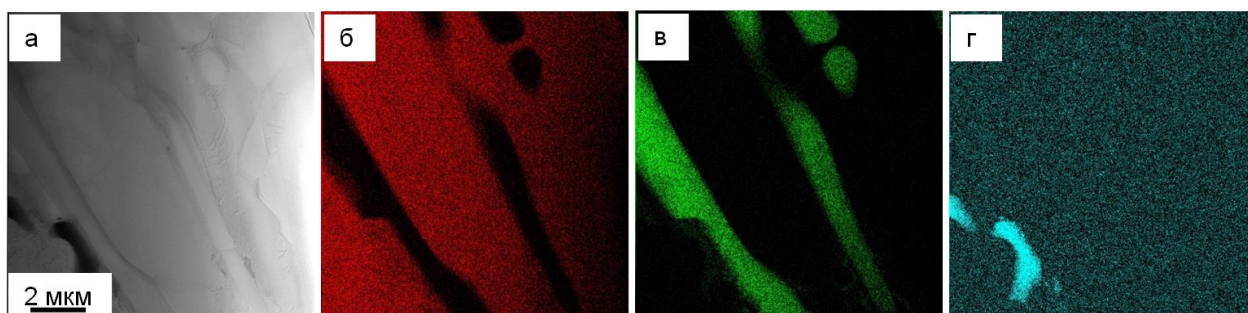


Рис. 6. ПЭМ-изображение структуры слоя образца силумина, подвергнутого комбинированной обработке, расположенного на глубине 65 мкм (а); изображение участка а, полученное в характеристическом рентгеновском излучении атомов Al (б), Si (в), Fe (г)

Fig. 6. STEM image of the structure of the layer of a silumin sample subjected to combined processing, located at a depth of 65 microns (a); image of the site a obtained in the characteristic X-ray radiation of Al (б), Si (в), Fe (г) atoms

В результате проведенного электронно-микроскопического анализа можно сделать вывод о том, что толщина модифицированного слоя исследуемого участка образца составляет не более 60 мкм.

Заключение

1. Проведена комплексная обработка силумина Al-15%Si, включающая в себя электровзрывное легирование порошком оксида иттрия с последующим облучением импульсным электронным пучком с длительностью воздействия в субмиллисекундном диапазоне.

2. В проведенном рентгенофазовом анализе модифицированной поверхности образца была выявлена многофазная структура поверхностного слоя. На глубине 25 мкм от поверхности обнаружена зернистая структура, сформированная атомами алюминия и титана, что указывает на наличие процессов легирования. На расстоянии 65 мкм от поверхности была идентифицирована структура, представляющая собой пластинчатую эвтектику, состоящую из чередующихся слоев твердого раствора на основе алюминия и кремния, что свидетельствует о сложных фазовых преобразованиях, происходящих в этом слое.

3. Также была проведена идентификация микроэлектроннограмм и темнопольный анализ фольг, полученных с поверхности образца. В ходе анализа были обнаружены частички, имеющие форму игл или пластин, которые составляют элементную фазу $Ti_4Al_{43}Y_6$. Кроме того, были идентифицированы окислы алюминия, титана и иттрия. На глубине 25 мкм от поверхности наблюдаются частицы окисной фазы с составом TiO_2 и YTi_2O_6 . В объемной части зерен, особенно в областях дислокаций, были найдены наноразмерные частицы (10–15 нм), которые, вероятно, представляют собой TiO_2 или YAl_3 , что указывает на многообразие фазовых состояний и сложную микроструктуру, влияющую на механические свойства и коррозионную стойкость исследуемого материала.

Результаты показывают, что комбинированная обработка способствует формированию в поверхностном слое многоэлементной многофазной субмикро- и нанокристаллической структуры, упрочняющей фазой которой служат частицы оксидов алюминия, титана, кремния и иттрия.

Список источников

1. Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Щанин П.М. Получение высокоэнергетических низкоэнергетических электронных пучков в системах с плазменным эмиттером // Изв. вузов. Физика. 2001. Т. 44. № 9. С. 36–43.
2. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н. Низкоэнергетические электронные пучки субмиллисекундной длительности: получение и некоторые аспекты применения в области материаловедения // Структура и свойства перспективных металлических материалов / под общ. ред. А.И. Потекаева. Гл. 13. Томск: Изд-во НТЛ, 2007. С. 345–382.
3. Разработка комплексной технологии электронно-ионно-плазменного инжиниринга поверхности материалов и изделий / Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Тересов А.Д. и др. // Наноинженерия. 2015. № 4(46). С. 4–13.
4. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / под общ. ред. Н.Н. Ковалья и Ю.Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 312 с.
5. Otani B. Silumin and its Structure // J. Inst. Met. 2022, no. 36, p. 1926.
6. Microstructures, mechanical properties, and corrosion behavior of novel high-thermal-conductivity hypoeutectic Al-Si alloys prepared by rheological high pressure die-casting and high pressure die-casting / Qi M., Kang Y., Qiu Q., Tang W., Li J. // J. Alloys Compd. 2018, no. 15 (745), pp. 487–502.
7. Marukovich E., Stetsenko V. The problem of modifying an aluminum-silicon eutectic alloy of silumins. Way of solutions // Litiyo i Metallurgiya. 2018, pp. 12–15.
8. Electroexplosive consolidation and heat treatment of Al-Si alloys / F. L. D. S. B. Lima et al. // Journal of Materials Science. 2019, vol. 54, no. 2, pp. 123–134.

9. Properties of high-silicon aluminum alloys processed by electron beam melting / V.A. Khomutov et al. // Journal of Alloys and Compounds. 2020, vol. 812.
10. Структура поверхности силумина АК15, подвергнутого комбинированному внешнему энергетическому воздействию / Серебрякова А. А., Шлярова Ю. А., Шляров В. В., Загуляев Д. В. // Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов, посвященные 105-летию со дня рождения Марка Львовича Бернштейна : сборник тезисов научно-технического семинара, 22–26 октября 2024 г. / Университет науки и технологий МИСиС [и др.]. М.: НИТУ МИСиС, 2024. С. 117.
11. Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system / Romanov D.A., Budovskikh E.A., Zhmakin Y.D., Gromov V.E. // Steel in Translation. 2011, vol. 41, no. 6, pp. 464–468.
12. Primig S., Theska F., Haghdadi N. Electron Microscopy Methods. Elsevier, 2020.
13. Kuo J. Electron Microscopy: Methods and Protocols. Humana Totowa, NJ, 2014.
4. Koval N.N., Ivanov Yu.F. *Razrabotka kompleksnoy tekhnologii elektronno-ionno-plazmennogo inzhiniringa poverhnosti materialov i izdeliy* [Development of a comprehensive technology for electron-ion-plasma surface engineering of materials and products]. Tomsk: NTL Publishing House, 2016, 312 p. (In Russ.)
5. Otani B. Silumin and its Structure. J. Inst. Met. 2022;36:1926.
6. Qi M., Kang Y., Qiu Q., Tang W., Li J. Microstructures, mechanical properties, and corrosion behavior of novel high-thermal-conductivity hypoeutectic Al-Si alloys prepared by rheological high pressure die-casting and high pressure die-casting. J. Alloys Compd. 2018;(15 (745)):487-502.
7. Marukovich E., Stetsenko V. The problem of modifying an aluminum-silicon eutectic alloy of silumins. Way of solutions. Litiyo i Metallurgiya. 2018:12-15.
8. Lima F. L. D. S. B., et al. Electroexplosive consolidation and heat treatment of Al-Si alloys. Journal of Materials Science. 2019;54(2):123-134.
9. Khomutov V.A., et al. Properties of high-silicon aluminum alloys processed by electron beam melt-ing. Journal of Alloys and Compounds. 2020;812.
10. Serebryakova A., Shliarova Yu.A., Shliarov V.V., Zagulyaev D.V. Surface structure of AK15 silumin subjected to combined external energy impact. *Bernshteinovskie chteniya po termomekhanicheskoy obrabotke metallicheskih materialov, posvyashchennye 105-letiyu so dnya rozhdeniya Marka Lvovicha Bernshteina : sbornik tezisev nauchno-tekhnicheskogo seminar* [Bernstein readings on thermomechanical processing of metallic materials dedicated to the 105th anniversary of the birth of Mark Lvovich Bernstein. Proceedings of the scientific and technical seminar]. Moscow: NUST MISIS, 2024, pp. 117. (In Russ.)
11. Romanov D.A., Budovskikh E.A., Zhmakin Y.D., Gromov V.E. Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system. Steel in Translation. 2011;41(6):464-468.
12. Primig S., Theska F., Haghdadi N. Electron Microscopy Methods. Elsevier, 2020.
13. Kuo J. Electron Microscopy: Methods and Protocols. Humana Totowa, NJ, 2014.

References

1. Devyatkov V.N., Koval N.N., Shchanin P.M. Production of high-current low-energy electron beams in systems with a plasma emitter. *Izv. vuzov. Fizika* [News of universities. Physics], 2001;44(9):36-43. (In Russ.)
2. Ivanov Yu.F., Koval N.N. *Nizkoenergeticheskie elektronnyye puchki submillisekundnoy dlitelnosti: poluchenie i nekotorye aspekty primeneniya v oblasti materialovedeniya* [Low-energy electron beams of submillisecond duration: production and some aspects of application in the field of materials science]. *Struktura i svoystva perspektivnykh metallicheskih materialov* [Structure and properties of promising metallic materials]. Tomsk: NTL Publishing House, 2007, pp. 345-382. (In Russ.)
3. Koval N.N., Ivanov Yu.F., Teresov A.D., et al. Development of an integrated technology for electron-ion-plasma engineering of the surface of materials and products. *Nanoinzheneriya* [Nanoengineering], 2015;(4(46)):4-13. (In Russ.)

Поступила 17.02.2025; принята к публикации 14.03.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 17/02/2025; revised 14/03/2025; published 30/09/2025

Шлярова Юлия Андреевна – ассистент кафедры ЕНД имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: rubannikova96@mail.ru. ORCID 0000-0001-5677-1427

Шляров Виталий Владиславович – заведующий сектором ОИАМиО, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: ShlyarovVitaly@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8130-648X

Серебрякова Анна Александровна – старший преподаватель кафедры транспорта и логистики, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: aserebrakova87@gmail.com. ORCID 0000-0003-3979-7777

Загуляев Дмитрий Валерьевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры ЕНД имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-9859-8949

Yulia A. Shliarova – Assistant of the Department of Natural Science named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: rubannikova96@mail.ru. ORCID 0000-0001-5677-1427

Vitaliy V. Shliarov – Head of the Sector of the Department of Information and Analytical Monitoring and Reporting,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: ShlyarovVitaly@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8130-648X

Anna A. Serebryakova – Senior Lecturer of the Department of Transport and Logistics,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: aserebrakova87@gmail.com. ORCID 0000-0003-3979-7777

Dmitriy V. Zaguliaev – DrSc(Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Natural Science named after Professor V.M. Finkel,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru. ORCID 0000-0002-9859-8949



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.793.79
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-106-113

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВА СИСТЕМЫ Co-Cr-Fe-Mn-Ni, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНО-ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

Михно А.Р., Крюков Р.Е., Панченко И.А., Коновалов С.В., Перов С.С.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. В лабораторных условиях были изготовлены опытные образцы порошковых проволок системы кобальт-хром-железо-марганец-никель. Для изготовления порошковой проволоки системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni использовалась оболочка из стали 12X18H9. В качестве шихтовых материалов (наполнителя порошковой проволоки) использованы следующие металлические порошки: кобальтовый электролитический порошок (ГОСТ 9721-79), порошок никелевый карбонильный (ГОСТ 9722-97), порошок хрома восстановленный (ТУ 14-5-298-99), марганец металлический (ГОСТ 9722-97). Диаметр изготовленной порошковой проволоки составлял 4 мм. С использованием метода электродуговой наплавки сварочным трактором АСАВ-1250 проведена наплавка исследуемых составов порошковых проволок. В качестве защитного материала использовался сварочный флюс АН-348А. Изготовление полнопрофильного образца осуществлялось путем многопроходной наплавки до достижения высоты наплавленного слоя в 30 мм. С использованием имеющегося в ФГБОУ ВО «СибГИУ» оборудования проведено изучение химического состава наплавленного образца, проведены замеры твердости, микротвердости. Исследованы механические свойства при испытании на одноосное растяжение, трёхточечном изгибе, ударной вязкости при комнатной температуре. Дополнительно проведены испытания методом «дископодка» износостойкости наплавленных образцов. В результате изучения элементного состава образцов определено, что данные образцы имеют в составе не более 35% используемых легирующих компонентов. Полученный путем наплавки сплав системы кобальт-хром-железо-марганец-никель позволяет получить наплавленный слой на 15% тверже, чем подложка. При этом полученный сплав обладает достаточно высокими показателями физико-механических свойств (ударной вязкости, трёхточечного изгиба и предела прочности при растяжении). Однако износостойкость наплавленного покрытия низкая, что позволяет сделать вывод о том, что данный сплав нецелесообразно использовать при изготовлении или ремонте изделий, подверженных ударно-абразивному износу.

Ключевые слова: порошковая проволока, электродуговая наплавка, ударная вязкость, твердость, микротвёрдость, механические характеристики

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00350, <https://rscf.ru/project/23-29-00350/>

© Михно А.Р., Крюков Р.Е., Панченко И.А., Коновалов С.В., Перов С.С., 2025

Для цитирования

Исследование механических свойств сплава системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni, полученного методом проволочно-дуговой наплавки / Михно А.Р., Крюков Р.Е., Панченко И.А., Коновалов С.В., Перов С.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 106-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-106-113>



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

RESEARCH OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE ALLOY OF THE Co-Cr-Fe-Mn-Ni SYSTEM PRODUCED BY THE METHOD OF WIRE-ARC SURFACING

Mikhno A.R., Kryukov R.E., Panchenko I.A., Konovalov S.V., Perov S.S.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. In laboratory conditions, prototypes of flux-cored wires of the cobalt-chromium-iron-manganese-nickel system were manufactured. For the production of flux-cored wire of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system, a sheath of 12X18H9 steel was used. The following metal powders were used as charge materials (cored wire filler): cobalt electrolytic powder (GOST 9721-79), nickel carbonyl powder (GOST 9722-97), reduced chromium powder (TU 14-5-298-99), metal manganese (GOST 9722-97). The diameter of the manufactured flux-cored wire was 4mm. Using the electric arc surfacing method using an ASAV-1250 welding tractor, surfacing of the flux-cored wire compositions under study was carried out. AN-348A welding flux was used as a protective material. The production of a full-profile sample was carried out by multi-pass surfacing until the height of the deposited layer was reached at 30 mm. Using the equipment available at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education SibSIU, the chemical composition of the deposited sample was studied, hardness and microhardness measurements were carried out. The mechanical properties were studied during uniaxial tensile testing, three-point bending, and impact strength at room temperature. Additionally, tests of the wear resistance of deposited samples were carried out using the “disc-pad” method. As a result of studying the elemental composition of the samples, it was determined that these samples contain no more than 35% of the alloying components used. The alloy of the cobalt-chromium-iron-manganese-nickel system obtained by surfacing allows to obtain a deposited layer 15% harder than the substrate. At the same time, the resulting alloy has fairly high physical and mechanical properties (impact strength, three-point bending and tensile strength). However, the wear resistance of the deposited coating is low, which allows us to conclude that this alloy is not advisable to use in the manufacture or repair of products subject to impact and abrasive wear.

Keywords: flux-cored wire, electric arc surfacing, impact strength, hardness, microhardness, mechanical characteristics

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-29-00350, <https://rscf.ru/project/23-29-00350/>

For citation

Mikhno A.R., Kryukov R.E., Panchenko I.A., Konovalov S.V., Perov S.S. Research of the Mechanical Properties of the Alloy of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni System Produced by the Method of Wire-Arc Surfacing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 106-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-106-113>

Введение

Порошковые проволоки представляют собой конструкцию, состоящую из двух основных элементов. Во-первых, это оболочка, изготовленная из гибкой ленты, которая может быть выполнена из различных материалов, таких как сталь, никель или кобальт. Во-вторых, внутри этой оболочки находится сердечник — порошковый компонент, содержащий легирующие элементы, шлакообразующие вещества и специальные добавки. Эти добавки играют важную роль в процессе рафинирования, а также обеспечивают защиту от воздействия газа [1, 2].

Наиболее распространёнными материалами для наплавки являются сплавы на основе железоуглеродистой системы. При добавлении легирующих элементов происходит значительное влияние на структурное состояние сталей. Это, в свою очередь, затрагивает такие характеристики, как прочность, твердость, пластичность и износостойкость. Эти свойства

делают данные материалы особенно ценными в различных промышленных и строительных сферах [3, 6].

Использование высоколегированных материалов в сварочном производстве способствует обеспечению высокой твердости изготавливаемой продукции и улучшает износостойкость деталей, подверженных абразивному и контактному изнашиванию [7, 8].

Хромистые стали, содержащие более 12% хрома, отличаются высокой коррозионной стойкостью и жаропрочностью [9, 10]. Они способны сохранять свои свойства при температурах до 600°C. В зависимости от содержания углерода и хрома эти стали могут иметь разные структурные состояния, такие как феррит, мартенсит или феррито-мартенсит. Благодаря своим уникальным характеристикам, хромистые стали часто используются для наплавки различных деталей. К ним относятся плунжеры гидрокпрессов, прокатные валки, штампы и пускорегулирующая арматура. Эти стали становятся все более востребованными в отраслях, где необходимы высокая прочность и

стойкость к воздействию высоких температур и коррозионным веществам [11, 12].

Аустенитные стали предлагают широкий спектр применения благодаря различному содержанию легирующих элементов. Эти стали, помимо прочего, влияют на прочностные характеристики при ударных нагрузках. Аустенитные стали выделяются своей универсальностью и находят широкое применение в самых различных производственных процессах. Их примечательные характеристики делают их незаменимыми там, где важны надежность и высокая прочность материалов. Эти стали используются в условиях, где требуется устойчивость к нагрузкам и внешней среде, обеспечивая долговечность и эффективность работы компонентов. Таким образом, аустенитные стали продолжают оставаться предпочтительным выбором в промышленности, отвечая современным требованиям к качеству и надежности [13-15].

Высокоэнтропийные оксиды (ВЭО) стали одной из самых перспективных тем в последние годы. Интеграция нескольких катионов – пяти и более – в структуру одного материала открывает новые возможности для разработки оксидных соединений. Эти материалы привлекают внимание благодаря множеству уникальных свойств, включая диэлектрические, магнитные, термические и каталитические характеристики. Основное преимущество ВЭО заключается в способности стабилизировать структуру благодаря разнообразию элементов, что позволяет создавать материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Это делает их незаменимыми для применения в различных областях, таких как машиностроение, полупроводниковая техника и мн. др. Совмещение экспериментальных исследований с теоретическими расчетами играет решающую роль в понимании свойств высокоэнтропийных оксидов. Такой подход позволяет точно определить состав и условия синтеза, что, в свою очередь, ведет к созданию материалов с заданными функциональными свойствами. ВЭО представляют собой важный шаг в разработке передовых материалов для будущих технологий [16-18].

Метод высокоэнергетического механического сплавления применяется для разработки многокомпонентных сплавов, таких как сплавы системы железо-хром-кобальт-никель-марганец. Этот процесс приводит к образованию однофазного твердого раствора на основе γ -Fe с гранецентрированной кристаллической решеткой. Далее с помощью искрового плазменного спекания полученная смесь преобразуется в компактный материал с идеальной кристаллической структурой и равномерным составом. В результате фаза γ -Fe, представляющая собой твердый раствор, равномерно распределяется по всему объему материала. Экспериментальные исследования показали, что такие сплавы, как железо-хром-кобальт-никель-марганец, обладают исключительными свойствами. Они демонстрируют стабильность химического состава и фазового состояния, а также высокую износостойкость, низкое электросопротивление и отличную механическую прочность при различных температурах [19, 20].

Целью данной работы является определение физико-механических свойств сплава системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni, полученного путем наплавки порошковой проволоки электродуговым способом под слоем флюса.

Материалы и методы исследования

Для изготовления экспериментальных порошковых проволок использовался лабораторный стан, имеющийся в научно-производственном центре «Сварочные процессы и технологии». В качестве сопутствующих материалов для изготовления использовалась стальная лента 12X18H9, металлические порошки: кобальтовый электролитический порошок (ГОСТ 9721-79), порошок никелевый карбонильный (ГОСТ 9722-97), порошок хрома восстановленный (ТУ 14-5-298-99), марганец металлический (ГОСТ 9722-97). Диаметр изготовленной экспериментальной порошковой проволоки составлял 4 мм.

Электродуговая наплавка изготовленных в НПП материалов производилась самоходной установкой ASAW-1250 на низкоуглеродистую подложку.

Наплавочные работы проведены при следующих, ранее подобранных режимах: сила тока 420 А, напряжение дуги 38 В, скорость наплавки 15 см/мин.

Методом проволоочной электроэрозионной резки из поверхности объемной заготовки изготовлены образцы для проведения механических испытаний (на одноосное растяжение, трехточечный изгиб, ударную вязкость), изучения дюрометрических свойств и износостойкости.

Изучение химического анализа наплавленных покрытий осуществлялось на спектрометре ДФС -71 и спектрометре XRF-1800.

Изучение твердости (HRA) изготовленных образцов осуществлялось с использованием твердомера ТК-2М с нагрузкой 60 кгс.

Изучение микротвердости изготовленных образцов осуществлялось с использованием микротвердомера HVS-1000 по ГОСТ 9450-76 с нагрузкой 1 кг в течение 10 с.

Механические испытания (растяжение и трехточечный изгиб) изготовленных образцов проводились на универсальной испытательной машине Subramax PMBC-50 при нагружении 0,2 мм/мин до полного разрушения испытуемого образца. Испытания изготовленных образцов на ударную вязкость КСУ проводились с использованием маятникового копра при комнатной температуре ($22 \pm 1^\circ\text{C}$).

Проведение испытания на износостойкость осуществлялось на установке 2070 СМТ-1 методом потери массы образца по схеме колодка-диск. Режим испытания на износостойкость: нагрузка – 30 мА (78,4Н), частота 20 – об/мин.

Полученные результаты и их обсуждение

Для определения физико-механических свойств наплавленного покрытия методом автоматической дуговой наплавки под слоем флюса была изготовлена серия образцов с различным компонентным составом порошковой проволоки. По результатам проведенного химического анализа наплавленных образцов определено, что оптимальным химическим составом (максимальная концентрация используемых компонентов) обладает полученный сплав с химическим составом, представленным в **табл. 1**. В результате анализа химического состава определено, что полученные наплавленные образцы имеют не более 35% вводимых легирующих компонентов.

Таблица 1. Химический состав исследуемого сплава системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni, мас. %
Table 1. Chemical composition of the studied alloy of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system, wt. %

Массовая доля элементов, %											
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo	Al	Co	S
0,10	0,75	5,73	17,06	11,39	0,03	0,05	0,072	0,019	0,18	5,44	0,012
0,035											

Для проведения дальнейших исследований был изготовлен опытный образец (**рис. 1**) размером 200×50×40 мм (д×ш×в).



Рис. 1. Характерный вид наплавленного сплава системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni
Fig. 1. Characteristic view of the deposited alloy of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system

С использованием электроэрозионного проволочно-вырезного станка были изготовлены образцы для проведения дальнейших исследований.

Результаты исследования дюрометрических свойств (**рис. 2, табл. 2**) наплавленных образцов указывают на то, что твердость наплавленного сплава системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni немного выше, чем у используемой подложки, при этом стоит отметить, что в наплавленном слое присутствуют зоны с повышенной в два раза твердостью.

Результаты механических испытаний (испытания на растяжение, трехточечный изгиб и ударную вязкость) исследуемых сплавов представлены в **табл. 3–5**. Фотографии характерных изломов образцов представлены на **рис. 3, 4**.



Рис. 2. Результаты замера твердости исследуемого образца
Fig. 2. Results of measuring the hardness of the test sample

Таблица 2. Результаты измерения микротвердости наплавленного слоя
Table 2. Results of measuring the microhardness of the deposited layer

Основной металл (подложка), HV	Среднее значение микротвердости, HV	Минимальное значение, HV	Максимальное значение, HV
120-140	159	136	313

Таблица 3. Результаты испытаний исследуемых образцов на растяжение
Table 3. Results of tensile tests of the studied samples

Номер образца	Предел прочности σ_B , Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %
1	520	76
2	580	94
3	641	125

Таблица 4. Механические свойства исследуемых образцов при испытании на трехточечный изгиб
Table 4. Mechanical properties of the test samples when tested for three-point bending

Номер образца	Предел прочности σ_B , Н/мм ²	Максимальная нагрузка, Н
1	785	16350
2	943	17026
3	867	16687

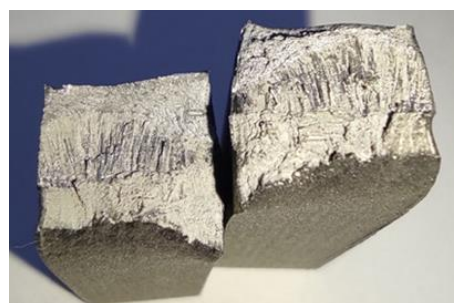


Рис. 3. Фото излома образца системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni после проведения испытания на трехточечный изгиб
Fig. 3. Photo of the fracture of a sample of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system after a three-point bending test

Таблица 5. Ударная вязкость KCU исследуемых образцов, Дж/см²

Table 5. Impact strength KCU of the studied samples, J/cm²

Образец №1	Образец №2	Образец №3
189,4	157,5	165,7

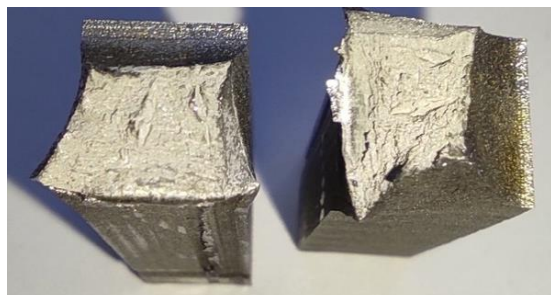


Рис. 4. Фото излома образца системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni после проведения испытания на ударную вязкость

Fig. 4. Photo of the fractured sample of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system after impact strength testing

В ходе исследования механических свойств при испытании на растяжение и трехточечный изгиб определено, что исследуемые образцы имеют достаточно высокие прочностные показатели. Характер излома исследуемых образцов – вязкий.

Результаты испытаний на ударную вязкость также указывают на то, что данный сплав обладает достаточно физико-механическими показателями при комнатной температуре.

При проведении испытания на износостойкость наблюдаются неудовлетворительные результаты. Износ наплавленного сплава (Δ/n) равен $1,0-1,7^{-4}$ г/об. Вид образца после проведения испытания на износостойкость представлен на рис. 5.



Рис. 5. Фото образца системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni после проведения испытания на износостойкость

Fig. 5. Photo of the sample of the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system after wear resistance testing

Заключение

По полученным результатам лабораторных исследований установлено, что полученный в ходе исследования сплав, наплавленный порошковой проволокой системы Co-Cr-Fe-Mn-Ni, состоит в основном из 65% железа и 35% легирующих элементов. Полученный материал обладает незначительно повышенной твердостью и микротвердостью по отношению к подложке – стали 09Г2С.

Результаты проведенных физико-механических испытаний указывают на то, что исследуемый материал пластичный и обладает хорошими физико-механическими свойствами. Однако износостойкость полученного сплава низкая, что позволяет сделать вывод о том, что данный сплав нецелесообразно использовать при изготовлении или ремонте изделий, подверженных ударно-абразивному износу.

Список источников

1. Порошковые проволоки на мировом и региональных рынках сварочных материалов / А.А. Мазур, О.К. Маковецкая, С.В. Пустовойт, Н.С. Бровченко // Автоматическая сварка. 2015. № 5-6(742). С. 68-74.
2. Золотухин В.И. Современные автоматические линии и технологические комплексы для производства инъекционных порошковых проволок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 3-7. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-3-7.
3. Кычкин А.К., Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф. Исследование покрытий из порошковых проволок, модифицированных комплексным концентратом Томторского редкоземельного месторождения Республики Саха (Якутия) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20, № 6(86). С. 86-91.
4. The technology of plasma-arc atomization of current-carrying solid wires for titanium powder production / D. Strohonov, O. Tereshchenko, O. Burlachenko [et al.] // Sciences of Europe. 2024, no. 147(147), pp. 116-119. DOI: 10.5281/zenodo.13382721.
5. Effect of Tempering on Structure and Properties of Plasma Surfacing of R2M9U High-Speed Tool Steel / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, A.I. Potekaev [et al.] // Russian Physics Journal. 2024, vol. 67, no. 3, pp. 259-266. DOI: 10.1007/s11182-024-03117-0.
6. Bagrov V. Fusion of dies with economy-layed secondaryhard-ducted steel // Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University. 2023, vol. 1, no. 103, pp. 163. DOI: 10.30977/bul.2219-5548.2023.103.1.163.
7. Каспарова О.В. Повышение коррозионной стойкости углеродистой стали 45 с помощью химико-термической обработки // Технология легких сплавов. 2015. № 1. С. 81-86.
8. Asadov Sh.A. Formation of a diffusion layer on the working surface of a reactive bushing operating under conditions of thermo-erosion wear // Universum: технические науки. 2022, no. 3-6(96), pp. 43-46. DOI: 10.32743/UniTech.2022.96.3.13269.

9. Использование остаточного аустенита для повышения абразивной износостойкости высокохромистых сталей / М. А. Филиппов, М. А. Гервасьев, С. М. Никифорова [и др.] // Актуальные проблемы в машиностроении. 2016. № 3. С. 434-439.
10. Bagrov V., Hlushkova D. Properties of wear resistance nickel-free steel with secondary curing for building up stamps of metal hot processing // Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University. 2022, no. 97, pp. 34. DOI: 10.30977/bul.2219-5548.2022.97.0.34.
11. Rotary friction welded C45 to 16NiCr6 steel rods: statistical optimization coupled to mechanical and microstructure approaches / Y. Belkahla, A. Mazouzi, S. El. I. Lebouachera [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021, vol. 116, no. 7, pp. 2285-2298. DOI: 10.1007/s00170-021-07597-z.
12. Enhancement of corrosion protection performance of SUS304/Q235B dissimilar metals lap joint through fiber laser / J. Z. Liu, L. J. Zhang, J. X. Zhang [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, vol. 96, no. 1-4, pp. 789-802. DOI: 10.1007/s00170-018-1634-5.
13. Optimization of the pulsed arc welding parameters for wire arc additive manufacturing in austenitic steel applications / A. Zavdoveev, V. Pozniakov, I. Klochkov [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022, vol. 119, no. 7-8, pp. 5175-5193. DOI: 10.1007/s00170-022-08704-4.
14. Influence of self-protective atmosphere in fiber laser welding of austenitic stainless steel / N. Yadaiah, S. Bag, C.P. Paul, L.M. Kukreja // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016, vol. 86, no. 1-4, pp. 853-870. DOI: 10.1007/s00170-015-8194-8.
15. Influence of AC magnetic field on the cladding layer during the micro beam plasma welding of austenitic stainless steel / H. H. Liu, L. B. Wang, W. J. Liu [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, vol. 97, no. 9, pp. 3459-3468. DOI: 10.1007/s00170-018-2182-8.
16. Microstructure and mechanical properties of non-equiatomic Co_{25.4}Cr₁₅Fe_{37.9}Mn_{3.5}Ni_{16.8}Si_{1.4} high-entropy alloy produced by wire-arc additive manufacturing / Osintsev K.A., Konovalov S.V., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Panchenko I.A. // Materials Letters & - 2022, vol. 312, no. 131675. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.131675
17. Обзор исследований сплавов, разработанных на основе энтропийного подхода / Батаева З. Б., Руктуев А. А., Иванов И. В. [и др.] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2021. Т. 23, № 2. С. 116-146. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146.
18. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // Acta Materialia. 2017, vol. 122, pp. 448-511. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.08.081.
19. Механическое сплавление с частичной аморфизацией многокомпонентной порошковой смеси Fe-Cr-Co-Ni-Mn и ее электроискровое плазменное спекание для получения компактного высокоэнтропийного материала / Кочетов Н.А., Рогачев А.С., Щукин А.С., Вадченко С.Г., Ковалев И.Д. // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 2. С. 35-42. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-2-35-42
20. Получение высокоэнтропийного сплава Fe-Cr-Co-Ni-Ti механическим сплавлением и электроискровым плазменным спеканием порошковой смеси / Н. А. Кочетов, А. С. Рогачев, Д. Ю. Ковалев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2021. Т. 15, № 2. С. 4-12. DOI: 10.17073/1997-308X-2021-2-4-12.

References

1. Mazur A.A., Makovetskaya O.K., Pustovoit S.V., Brovchenko N.S. Flux-cored wires on the world and regional markets of welding materials. *Avtomaticeskaya svarka* [Automatic welding], 2015;(5-6(742)):68-74. (In Russ.)
2. Zolotukhin V. I. Modern automatic lines and technological complexes for the production of injection cored wires. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical Sciences], 2022;(3):3-7. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-3-7. (In Russ.)
3. Kychkin A.K., Vinokurov G.G., Struchkov N.F. Study of coatings made of flux-cored wires modified with a complex concentrate of the Tomtor rare earth deposit of the Republic of Sakha (Yakutia). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018;20(6(86)):86-91. (In Russ.)
4. Strohonov D., Tereshchenko O., Burlachenko O. et al. The technology of plasma-arc atomization of current-carrying solid wires for titanium powder production. *Sciences of Europe*. 2024;(147(147)):116-119. DOI: 10.5281/zenodo.13382721.
5. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Potekaev A.I. et al. Effect of Tempering on Structure and Properties of Plasma Surfacing of R2M9U High-Speed Tool Steel. *Russian Physics Journal*. 2024;67(3):259-266. DOI: 10.1007/s11182-024-03117-0.
6. Bagrov V. Fusion of dies with economy-layed secondaryhard-ducted steel. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2023;1(103):163. DOI: 10.30977/bul.2219-5548.2023.103.1.163.
7. Kasparova O.V. Increasing the corrosion resistance of carbon steel 45 using chemical-thermal treatment *Tekhnologiya legkih spлавov* [Technology of light alloys]. 2015;(1):81-86. (In Russ.)
8. Asadov Sh. A. Formation of a diffusion layer on the working surface of a reactive bushing operating under conditions of thermo-erosion wear. *Universum: technical sciences*. 2022;(3-6(96)):43-46. DOI: 10.32743/UniTech.2022.96.3.13269.
9. Filippov M.A., Gervasyev M.A., Nikiforova S.M. et al. The use of retained austenite to increase the abrasive wear resistance of high-chromium steels. *Aktualnye problemy v mashinostroenii* [Current problems in mechanical engineering]. 2016;(3):434-439. (In Russ.)
10. Bagrov V., Hlushkova D. Properties of wear resistance nickel-free steel with secondary curing for building up

- stamps of metal hot processing. Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University. 2022;(97):34. DOI: 10.30977/bul.2219-5548.2022.97.0.34.
11. Belkahla Y., Mazouzi A., Lebouachera S. El. I. et al. Rotary friction welded C45 to 16NiCr6 steel rods: statistical optimization coupled to mechanical and microstructure approaches. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021;116(7):2285-2298. DOI: 10.1007/s00170-021-07597-z.
 12. Liu J.Z., Zhang L.J., Zhang J.X. et al. Enhancement of corrosion protection performance of SUS304/Q235B dissimilar metals lap joint through fiber laser. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;96(1-4):789-802. DOI: 10.1007/s00170-018-1634-5.
 13. Zavdoveev A., Pozniakov V., Klochkov I. et al. Optimization of the pulsed arc welding parameters for wire arc additive manufacturing in austenitic steel applications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022;119(7-8):5175-5193. DOI: 10.1007/s00170-022-08704-4.
 14. Yadaiah N., Bag S., Paul C.P., Kukreja L.M. Influence of self-protective atmosphere in fiber laser welding of austenitic stainless steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016;86(1-4):853-870. DOI: 10.1007/s00170-015-8194-8.
 15. Liu H.H., Wang L.B., Liu W.J. et al. Influence of AC magnetic field on the cladding layer during the micro beam plasma welding of austenitic stainless steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;97(9):3459-3468. DOI: 10.1007/s00170-018-2182-8.
 16. Osintsev K.A., Kononov S.V., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Panchenko I.A. Microstructure and mechanical properties of non-equiatom Co_{25.4}Cr₁₅Fe_{37.9}Mn_{3.5}Ni_{16.8}Si_{1.4} high-entropy alloy produced by wire-arc additive manufacturing. Materials Letters. 2022;312(131675). DOI: 10.1016/j.matlet.2022.131675.
 17. Bataeva Z.B., Ruktuev A.A., Ivanov I.V. et al. Review of studies of alloys developed on the basis of the entropy approach. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal processing (technology, equipment, tools)], 2021;23(2):116-146. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-116-146. (In Russ.)
 18. 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.
 19. Kochetov N.A., Rogachev A.S., Shchukin A.S., Vadchenko S.G., Kovalev I.D. Mechanical alloying with partial amorphization of a multicomponent powder mixture Fe–Cr–Co–Ni–Mn and its electric spark plasma sintering to obtain a compact high-entropy material. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* [Powder Metallurgy and Functional Coverings], 2018;(2):35-42. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-2-35-42. (In Russ.)
 20. Kochetov N.A., Rogachev A.S., Kovalev D.Yu. et al. Preparation of a high-entropy Fe–Cr–Co–Ni–Ti alloy by mechanical alloying and electric spark plasma sintering of a powder mixture. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* [Powder Metallurgy and Functional Coverings], 2021;15(2):4-12. DOI: 10.17073/1997-308X-2021-2-4-12. (In Russ.)

Поступила 06.12.2024; принята к публикации 23.01.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 06/12/2024; revised 23/01/2025; published 30/09/2025

Михно Алексей Романович – директор научно-производственного центра

«Сварочные процессы и технологии»,

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнец, Россия.

Email: mikno-mm131@mail.ru. ORCID 0000-0002-7305-6692

Крюков Роман Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнец, Россия.

Email: rek_nzrmk@mail.ru. ORCID 0000-0002-3394-7941

Панченко Ирина Алексеевна – кандидат технических наук,

старший научный сотрудник управления научных исследований,

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнец, Россия.

Email: i.g.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Коновалов Сергей Валерьевич – доктор технических наук,

проректор по научной и инновационной деятельности,

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнец, Россия.

Email: kononov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Перов Станислав Сергеевич – обучающийся, лаборант управления научных исследований,

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнец, Россия.

Email: stas.perov.2005@inbox.ru

Alexey R. Mikhno – Director of the Research and Production Center “Welding Processes and Technologies”, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: mikno-mm131@mail.ru. ORCID 0000-0002-7305-6692

Roman E. Kryukov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Mechanics and Engineering, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: rek_nzrmk@mail.ru. ORCID 0000-0002-3394-7941

Irina A. Panchenko – PhD (Eng.), Senior Researcher at the Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: i.r.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Sergey V. Konovalov – DrSc (Eng.), Vice-Rector for Scientific and Innovation Activities, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: konovalov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Stanislav S. Perov – Student, Laboratory Assistant at the Department of Scientific Research, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: stas.perov.2005@inbox.ru



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 620.178.162:621.9.02
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-114-121

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ТВЕРДЫМ СПЛАВОМ В УСЛОВИЯХ НАРОСТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ

Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Башков А.А., Рябов Д.А., Акулова А.А.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Статья посвящена исследованию структурных изменений, происходящих в приконтактных слоях углеродистых сталей при трении с твёрдым сплавом. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью понимания процессов, происходящих в зоне трения, для разработки более эффективных методов смазки, снижения износа и повышения долговечности механизмов. Целью настоящего исследования явилось изучение механизма образования нароста как результат застойных процессов при резании. Для достижения поставленной цели были использованы экспериментальные методы, включающие электронно-микроскопические исследования, рентгеноструктурный анализ и другие методы. Научная новизна работы заключается в разработке особенностей механизма структурных изменений в приконтактных слоях сталей 20, 45, У8 при трении в процессе резания, влияющих на адгезию с твердым сплавом. Приведены результаты исследований структурных изменений в сталях при контактном взаимодействии с твердым сплавом. Показано, что в результате высоких скоростей деформирования и контактных нагрузок реализуется скоростной нагрев и формирование неравновесных структур, влияющих на адгезию с твердым сплавом. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для разработки новых технологий, способных повысить износостойкость и долговечность механизмов, работающих в условиях трения с твёрдыми сплавами. Кроме того, результаты исследования могут быть полезны для разработки новых составов смазки и снижения износа режущих инструментов. Направление развития данной работы может включать дальнейшее исследование влияния различных износостойких наноструктурных покрытий на снижение коэффициента трения и износа режущего инструмента в процессе резания. Такие инструменты характеризуются повышенной твердостью поверхностного слоя и высокой теплостойкостью, обладают устойчивостью к окислительным и коррозионным процессам, демонстрируют низкую склонность к адгезии с обрабатываемым материалом, а также отличаются стабильностью прочностных характеристик.

Ключевые слова: прирезцовый слой, контактные нагрузки, твердый сплав, процесс резания, трение, адгезия, нарост, подошва нароста, скоростной нагрев, неравновесные структуры

© Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Башков А.А., Рябов Д.А., Акулова А.А., 2025

Для цитирования

Структурные изменения в углеродистых сталях при контактном взаимодействии с твердым сплавом в условиях наростообразования при резании / Кабалдин Ю.Г., Аносов М.С., Башков А.А., Рябов Д.А., Акулова А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 114-121. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-114-121>



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

STRUCTURAL CHANGES IN CARBON STEELS DURING CONTACT INTERACTION WITH A HARD ALLOY UNDER CONDITIONS OF BUILD-UP FORMATION DURING CUTTING

Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Bashkov A.A., Ryabov D.A., Akulova A.A.

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article is devoted to the study of structural changes occurring in the contact layers of carbon steels during friction with a hard alloy. The relevance of this work is due to the need to understand the processes occurring in the friction zone in order to develop more effective lubrication methods, reduce wear and increase the durability of mechanisms. The purpose was to study the mechanism of build-up formation as a result of stagnant processes during cutting. To achieve this goal, experimental methods were used, including electron microscopy, X-ray diffraction analysis and other methods. The scientific novelty of the work is to develop the features of the mechanism of structural changes in the contact layers of 20, 45, U8 steels during friction while cutting, affecting adhesion to a hard alloy. The results of studies of structural changes in steels during contact with a hard alloy are presented. It is shown that as a result of high deformation rates and contact loads, high-speed heating and the formation of nonequilibrium structures affecting adhesion to a hard alloy are realized. The practical significance of the work lies in the possibility of using the results obtained to develop new technologies capable of increasing the wear resistance and durability of mechanisms operating under friction conditions with hard alloys. In addition, the results of the study may be useful for developing new lubricants and reducing wear of cutting tools. The direction of development of this work may include further study of the effect of various wear-resistant nanostructured coatings on reducing the coefficient of friction and wear of cutting tools during the cutting process. Such tools are characterized by increased hardness of the surface layer and high heat resistance, they are resistant to oxidative and corrosive processes, demonstrate low tendency for adhesion to the processed material and exhibit stable strength properties.

Keywords: cutting layer, contact loads, hard alloy, cutting process, friction, adhesion, build-up, the base of the build-up, high-speed heating, nonequilibrium structures

For citation

Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Bashkov A.A., Ryabov D.A., Akulova A.A. Structural Changes in Carbon Steels During Contact Interaction with a Hard Alloy Under Conditions of Build-Up Formation During Cutting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 114-121. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-114-121>

Введение

При резании пластичных металлов на передней поверхности режущего инструмента образуется клиновидное тело-нарост. Согласно литературным данным, образование застойных явлений (нароста) при резании связывают с трением между стружкой и передней поверхностью инструмента. Изучению механизмов трения и образования застойных явлений при резании посвящены работы [1-6].

С позиций термодинамики неравновесных систем [7, 8] при резании работа трения A_T расходуется на запасание внутренней энергии ΔU_d и выделение тепла Q :

$$A_T = \Delta U_d + Q, \quad (1)$$

где A_T – работа трения, Дж; ΔU_d – энергия упругой деформации, Дж; Q – тепло, Дж.

Уравнение (1) основывается на первом и втором законах термодинамики [7, 8].

На трение при резании оказывают влияние множество факторов, включая физико-механические свойства обрабатываемого материала и инструмента, параметры режима резания (скорость V , подача S , глубина резания t , толщина среза a), геометрию режущего инструмента, наличие смазочно-охлаждающих жидкостей.

Согласно [1], коэффициент трения при резании можно также определить из соотношения

$$\mu = \frac{q_F}{q_N} = \frac{\text{const}}{q_N}, \quad (2)$$

где q_F – удельная сила трения, Н/м²; q_N – удельное давление на передней поверхности инструмента, Н/м².

Параметры q_N и q_F являются самостоятельными контактными характеристиками, зависящими от разных факторов: удельная сила трения складывается из силы пластического сдвига в контактном слое, а удельное давление есть функция относительной длины контакта C/a .

На **рис. 1** представлена схема, иллюстрирующая двухзонную модель трения стружки с передней поверхностью инструмента [1, 12]. В этой связи различают длину пластического контакта стружки с передней поверхностью инструмента $C_{пл}$ (зона I) и длину контакта, где реализуется внешнее трение стружки с инструментом $C_{вн}$ (зона II).

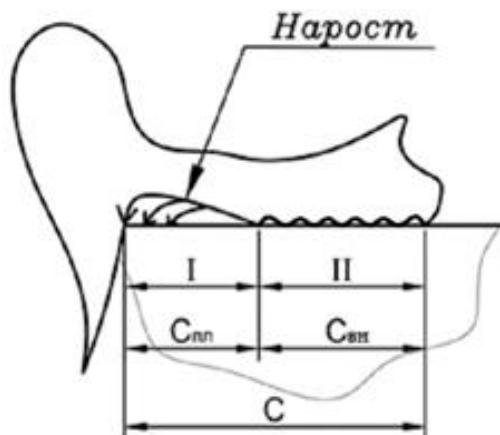


Рис. 1. Двухзонная модель трения при резании и формирование нароста на передней поверхности инструмента в зоне пластического контакта $C_{пл}$ (зона I)

Fig. 1. Two-band model of friction during cutting and the build-up formation on the front surface of the tool in the plastic contact zone of the C_{pl} (zone I)

Нарост имеет слоистое строение. Считается, что вершина нароста является неустойчивой, так как она формируется за счет сил когезии обрабатываемого материала. Поэтому, периодически срезаясь, нарост отрицательно влияет на шероховатость обработанной поверхности. На **рис. 2** представлено изображение передней поверхности инструмента с частицами обрабатываемого металла на некотором удалении от режущего лезвия. Эти частицы остаются на поверхности режущего инструмента после сдвига нароста.

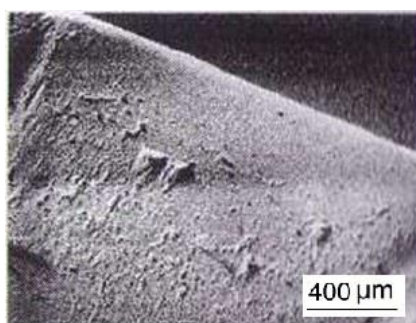


Рис. 2. Макроизображение передней поверхности инструмента с частицами металла после сдвига нароста ($\times 50$)

Fig. 2. Macroimage of the front surface of the tool with metal particles after the build-up is shifted ($\times 50$)

На **рис. 3** приведена схема распределения контактных напряжений σ_N и τ_F , а также формирование застойных явлений на участке C контакта стружки с инструментом и показана начальная фаза затормаживания частиц обрабатываемого материала в конце пластического контакта $C_{пл}$ [11].

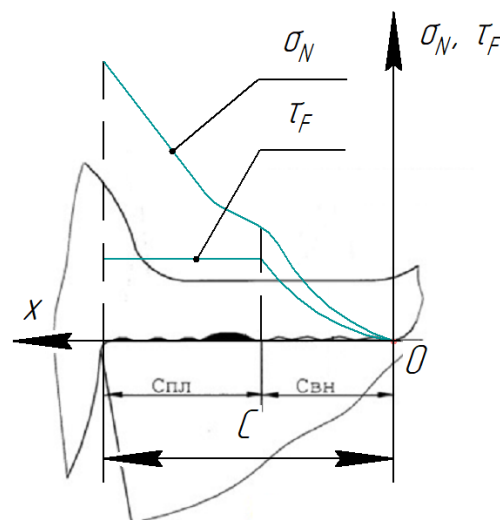


Рис. 3. Схема распределения контактных напряжений σ_N и τ_F и формирование застойных явлений на участке контакта C стружки с инструментом

Fig. 3. Diagram of the distribution of contact stresses σ_N and τ_F and the formation of stagnation phenomena along the length of the chip's contact C with the tool

Для каждого обрабатываемого материала удельная сила трения q_F постоянна [1] (инвариантна к условиям резания), поэтому коэффициент трения зависит только от среднего удельного контактного давления q_N . Инвариантность q_F к условиям резания связывается с достижением обрабатываемого металла в прирезцовых слоях стружки предельной степени деформации [12]. Видно, что напряжения σ_N максимальны вблизи режущего лезвия. Касательные τ_F напряжения на участке пластического контакта $C_{пл}$ постоянны и снижаются на участке упругого контакта $C_{вн}$, где реализуется внешнее трение.

Считается, что именно концентрация σ_N и τ_F вблизи режущего лезвия обуславливает образование нароста (застойной зоны) на режущем лезвии. Следует отметить, что формирование нароста и его устойчивость при резании до настоящего времени все еще мало изучены. В частности, возникает вопрос, почему первичные очаги затормаживания возникают не на режущем лезвии, где контактные напряжения максимальны, а на некотором удалении от режущего лезвия (см. **рис. 2**).

Материалы и методы исследования

Процесс резания проводился в условиях свободного резания (в процессе резания работает только главная режущая кромка). Предварительно на заготовках диаметром $\varnothing 50$ мм были нарезаны пояски шириной 2 мм. В качестве режущего инструмента применялся твердосплавный резец с пластиной ВК8 (сплав вольфрамовой группы). В качестве обрабатываемых материалов использовались углеродистые стали 20, 45 и У8. Режимы резания: $V = 20\text{--}50$ м/мин, $S_0 = 0,2$ мм/об, $t = 2$ мм. Параметры режущей пластины: главный угол в плане $\phi = 55^\circ$, задний угол $\alpha = 7^\circ$, передний угол $\gamma = 0^\circ$, радиус при вершине $r = 0,3$ мм. Способ крепления – прижим прихватом сверху.

Обработка выполнялась на токарно-винторезном станке 1К62 с закреплением заготовки в центрах. Пояски срезались твердосплавным резцом с поперечной подачей на различных режимах резания. Обработка проводилась без применения смазочно-охлаждающей жидкости.

Для исследования подошвы нароста был проведен микроструктурный анализ на цифровом микроскопе MET1T и растровом электронном микроскопе WIN SEM A6000 с EDS-спектрометром. Оценка твер-

дости нароста проводилась с помощью твердомера ИТВ-1-П-МС.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 4 представлены микроструктуры подошв наростов из стали 20 и исходная структура этой стали. Установлено, что исходное структурное состояние стали 20 в поверхностных слоях при контактировании со сплавом ВК8 при резании изменяется. На подошвах наростов формируется новое структурное состояние, отличное от исходного.

В начальной части подошвы наблюдается структура отпущенного мартенсита стали, представленная трооститом отпуска, за которой следуют вытянутые зерна перлита. В конечной части подошвы идентифицируются области чистого феррита ($\alpha\text{-Fe}$).

На рис. 5 представлена зависимость микротвердости $HV_{0,01}$ по длине подошвы нароста из стали 20 при различных скоростях V контактного взаимодействия с твердым сплавом. Видно, что наибольшая микротвердость наблюдается в начале подошвы нароста. Феррит в конце подошвы нароста является более пластичным и имеет наименьшую микротвердость.

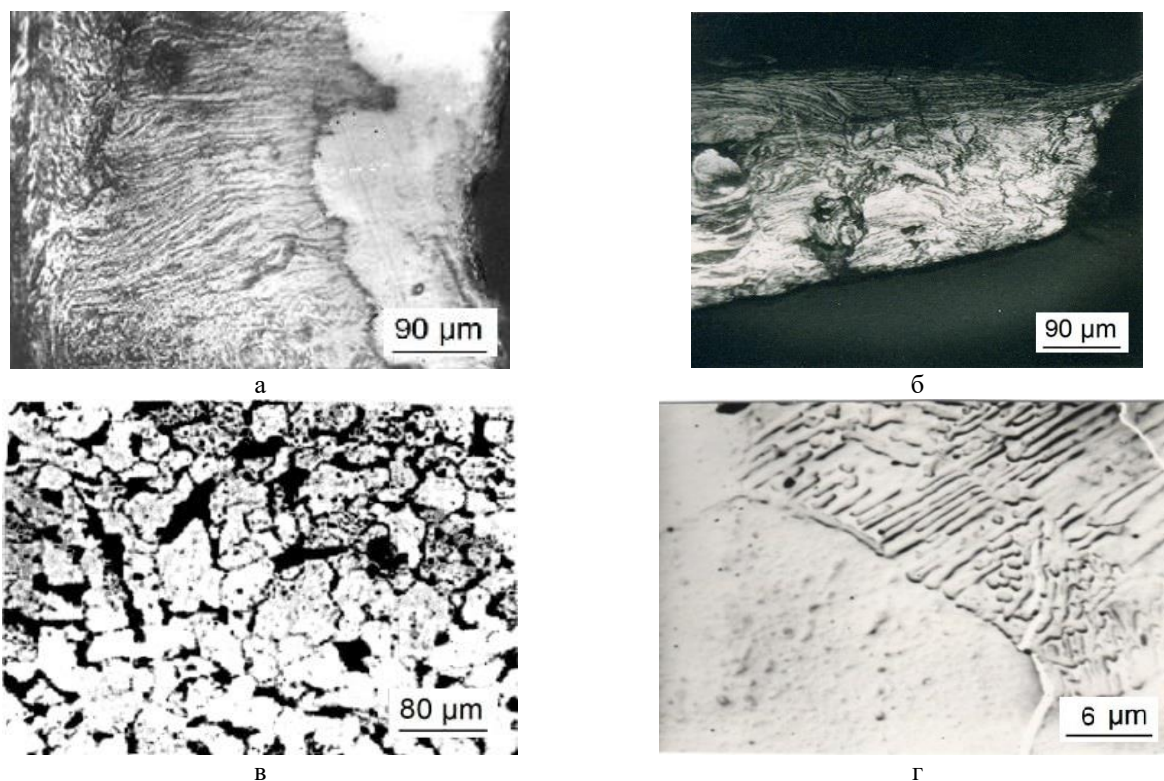


Рис. 4. Микроструктура стали 20: а – подошва нароста при $V = 15$ м/мин ($\times 200$); б – при $V = 40$ м/мин ($\times 200$); в – исходная структура ($\times 300$); г – исходная структура ($\times 3000$)

Fig. 4. Microstructure of 20 steel: а is the base of the build-up at $V=15$ m/min ($\times 200$); б is at $V=40$ m/min ($\times 200$); в is the initial structure ($\times 300$); г is the initial structure ($\times 3000$)

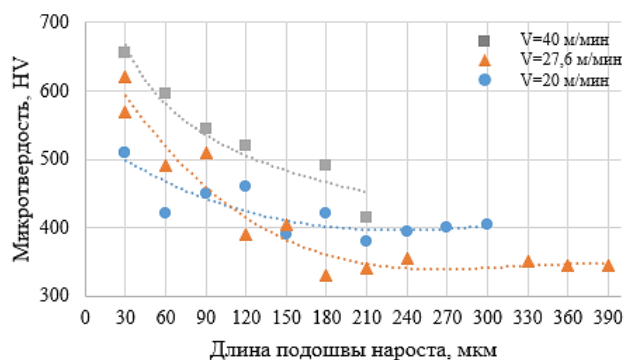


Рис. 5. Зависимость микротвердости HV0,01 по длине подошвы нароста при резании стали 20 на различных скоростях обработки:

$S_0 = 0,2$ мм, $t = 2$ мм

Fig. 5. Dependence of the microhardness HV0,01 along the length of the build-up base when cutting 20 steel at various processing speeds:

$S_0 = 0,2$ mm, $t = 2$ mm

На рис. 6 представлена структура подошвы нароста из стали 45, где видно, что подошву нароста формируют мелкомасштабные заторможенные вихревые структуры, которые наблюдаются в основном в конце подошвы нароста.

При резании стали У8 по длине подошвы обнаруживается структура, состоящая из зернистого пер-

лита с неравномерным распределением феррита и цементита (рис. 7, а, б) [11]. Далее на подошвах проводилась дополнительная термообработка—отпуск и измерялась микротвердость. На рис. 7, в, г представлены микроструктуры подошв наростов при резании стали У8 после ТО.

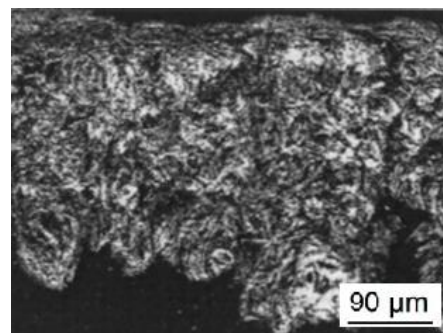
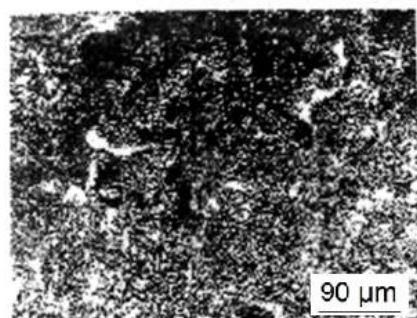


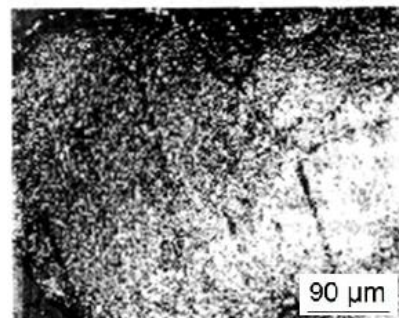
Рис. 6. Микроструктура подошвы нароста при резании стали 45: $V = 30$ м/мин ($\times 200$)

Fig. 6. Microstructure of the base of the build-up during cutting of 45 steel: $V = 30$ m/min ($\times 200$)

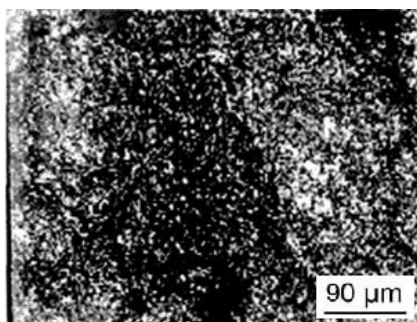
С увеличением скорости резания происходит окончательное образование зернистого перлита (рис. 7, в, г). Частицы сфероидизированного цементита, которые наблюдались в микроструктуре на рис. 7, а, равномерно распределены в ферритной матрице.



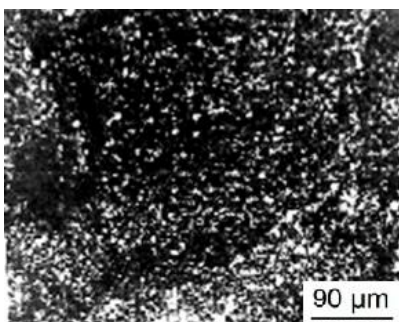
а



б



в



г

Рис. 7. Микроструктура стали У8 ($\times 200$): а – в исходном состоянии; б – подошва нароста; в – отпуск подошвы нароста при $T = 300^\circ\text{C}$; г – отпуск подошвы нароста при $T = 500^\circ\text{C}$

Fig. 7. Microstructure of U8 steel ($\times 200$): а is in the initial state; б is the base of the build-up; в is annealing of the base of the build-up at $T = 300^\circ\text{C}$; г is annealing of the base of the build-up at $T = 500^\circ\text{C}$

С целью изучения причин зависимости коэффициента $HV_{0,01}$ от температуры отпуска были представлены температурные зависимости микротвёрдости, измеренной вдоль подошв наростов. Анализ данных зависимостей свидетельствует о том, что, аналогично процессу резания стали 20 при различных скоростях, вдоль подошв наростов, сформированных из стали У8, наблюдаются зоны с различными структурой, значениями микротвёрдости и, как следствие, пластичности.

На рис. 8 приведены зависимости $HV_{0,01}$ от температуры отпуска нароста в вакуумной установке. Установлено, что при нагреве происходит снижение микротвёрдости подошвы нароста до исходной $HV = 400$ МПа, при этом наблюдается восстановление структуры стали до начального состояния.

Неравновесные структуры, которые являются результатом быстрой закалки и отпуска, при дальнейшем резании, в результате разогрева, возвращаются в исходное состояние (см. рис. 7). Нарост периодически срезается и процесс образования новых неравновесных структур на подошвах нароста вновь повторяется.

Образование неравновесных структур быстрой закалки в условиях острой локализации деформации и градиентов температур при трении в условиях резания следует рассматривать как фазовый переход с образованием новых диссипативных структур в ре-

зультате самоорганизации [11] контактных поверхностей. Анализ показывает, что более пластичные структуры (см. рис. 8) всегда формируются в конце подошвы нароста, обеспечивая более прочную адгезионную связь обрабатываемого металла с твердым сплавом. В этой связи были проведены исследования химического состава подошв наростов с использованием спектрального анализа (рис. 9).

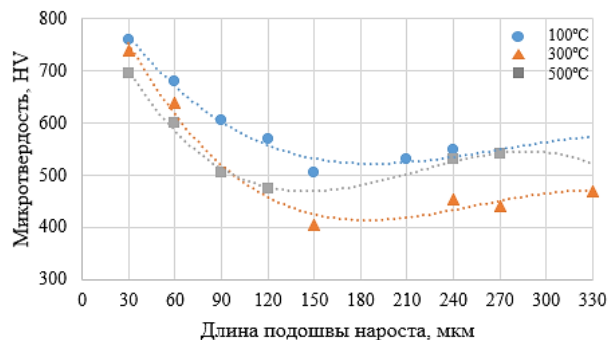
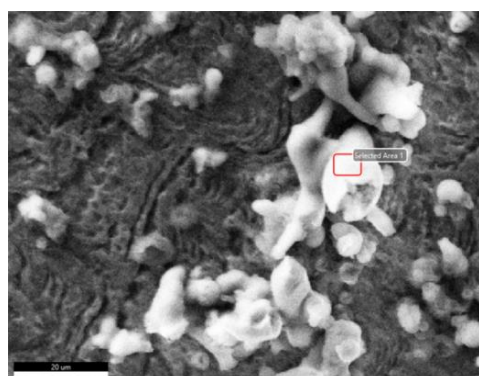


Рис. 8. Зависимость микротвёрдости $HV_{0,01}$ по длине основания нароста из стали У8 от температуры отпуска

Fig. 8. Dependence of the microhardness $HV_{0,01}$ along the length of the build-up base of U8 steel on the annealing temperature



eZAF Quant Result - Analysis Uncertainty: 8.16 %

Element	Weight %	MDL	Atomic %	Error %
O	66.5	0.39	87.4	9.8
Fe	33.1	0.38	12.4	2.1
Co	0.4	0.31	0.1	25.9

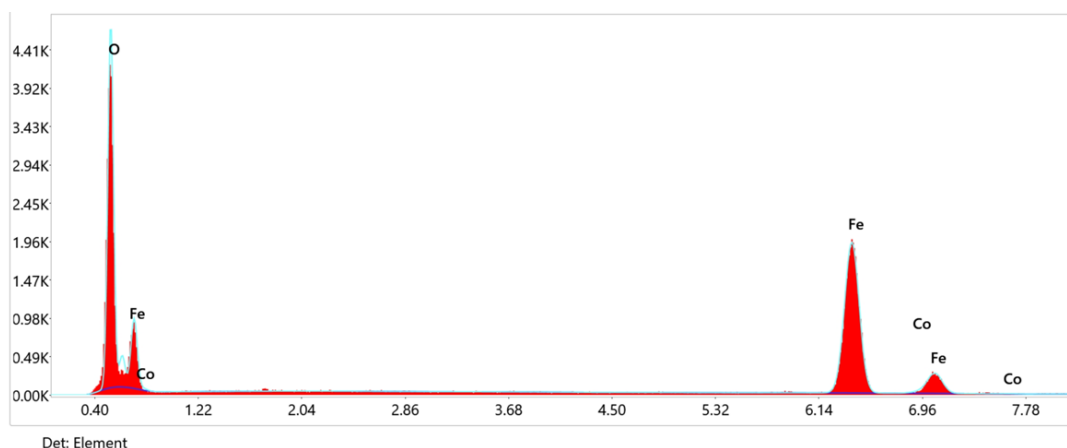


Рис. 9. Результаты спектрального анализа подошвы нароста

Fig. 9. The results of spectral analysis of the base of the build-up

Установлено, что на подошве нароста выявляются оксиды железа и частицы кобальта. Таким образом, адгезия между инструментальным материалом и железом, составляющая основу сталей, осуществляется прежде всего с более пластичной структурной составляющей твердых сплавов-кобальтом [10]. Как отмечалось выше, наиболее интенсивно адгезия, с образованием частиц металла на поверхности твердого сплава после сдвига тела нароста (см. **рис. 2**), происходит с более пластичными вторичными структурами (ферритом) подошвы нароста, которая формируется при структурных превращениях в ее конце (см. **рис. 1**). Адгезионные процессы (см. **рис. 2**) обусловлены вихревыми модами деформации при наличии высоких степеней деформации (см. **рис. 6**) [11].

Заключение

Анализ показывает, что за время нахождения частиц металла из стали 20 в приконтактных слоях стружки менее чем за 10^{-4} с температура нагрева превышает температуру плавления стали. Реализуются $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения. Далее происходит закалка и образуется мартенсит, после чего реализуется отпуск и образуется троостосорбитная структура. Кроме того, можно отметить, что в прирезцовых слоях наблюдается интенсивная диффузия углерода в направлении режущего лезвия, что подтверждается формированием значительной области чистого феррита, как показано на **рис. 4**.

Вопрос о механизме образования γ -фазы в углеродистой стали является одним из важнейших в теории фазовых переходов. В работах [8, 9, 11] указывается, что $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения при нагреве с большими скоростями делает возможным образование аустенита даже с малым содержанием углерода без притока извне за счет сегрегации его по границам феррита. Причем возможно и направленное выделение углерода не только из феррита, но и цемента.

Однако описанные выше неравновесные структуры при трении в условиях резания (см. **рис. 4, 6, 7**), на наш взгляд, обусловлены как градиентом температуры по длине контакта стружки с инструментом, так и распределением контактных напряжений при обработке того или иного материала. Экспериментальные данные (см. **рис. 4, а**) свидетельствуют об аномальном массопереносе и микродиффузии на достаточно большие расстояния (> 1 мкм) за период времени, равный долям секунды (10^{-4} с).

Таким образом, в отличие от скоростного лазерного нагрева [8], фазовые превращения при трении в условиях резания реализуются как при скоростном нагреве, так и при больших давлениях и градиенте температур.

Список источников

1. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Mashgiz, 1956. 367 с.

2. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
4. Мокрицкий Б.Я. Особенности лезвийной механической обработки труднообрабатываемых материалов: учеб. пособие. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 97 с.
5. Гуляев А.П., Гуляев А.А. Металловедение: учебник для вузов. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Альянс, 2023. 722 с.
6. Astakhov V., Shvets S. The assessment of plastic deformation in metal cutting // Journal of Materials Processing Technology. 2004, no. 146, pp. 193-202.
7. Study of Phase Transformations and Interface Evolution in Carbon Steel under Temperatures and Loads Using Molecular Dynamics Simulation / Wen C., Li Z., Wu H., Gu J. // Metals. 2024, no. 14, p. 752.
8. Jiao Y., Dan W., Zhang W. The strain-induced martensitic phase transformation of Fe-C alloys considering C addition: A molecular dynamics study // Journal of Materials Research. 2020, vol. 35, no. 14, pp. 1803-1816.
9. Новиков Н.В. Твердосплавные инструменты в процессах механической обработки / под ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2015. 368 с.
10. Утяшев Ф.З., Рааб Г.И., Валитов В.А. Деформационное наноструктурирование металлов и сплавов: монография. СПб.: Научное издание, 2020. 185 с.
11. Кабалдин Ю.Г. Самоорганизация и механизм трения при резании / Ю.Г. Кабалдин, А.А. Башков // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102, № 2. С. 167-173. DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-2-167-173. EDN QPEWOW.
12. Кабалдин Ю.Г. Нейронное моделирование процессов трения при резании / Ю.Г. Кабалдин, А.А. Башков, С.В. Иванов, И.Д. Замураев // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. № 19. С. 52-58. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-19-52-58. EDN MIXCZV.

References

1. Zorev N.N. *Voprosy mekhaniki protsessa rezaniya metallov* [Questions of the metal cutting process mechanics]. Moscow: Mashgiz, 1956, 367 p. (In Russ.)
2. Granovsky G.I., Granovsky V.G. *Rezanie metallov* [Metal cutting]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985, 304 p. (In Russ.)
3. Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of metal cutting theory]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975, 344 p. (In Russ.)
4. Mokritskiy B.Ya. *Osobennosti lezviynoy mekhanicheskoy obrabotki trudnoobrabatyvaemykh materialov: ucheb. posobie* [Features of blade machining of hard-to-process material: study guide]. Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2023, 97 p. (In Russ.)
5. Gulyaev A.P., Gulyaev A.A. *Metallovedenie: uchebnik dlya vuzov. 8-e izd., pererab. i dop.* [Metal science: textbook for universities. 8th edition, revised and expanded]. Moscow: Alliance, 2023, 722 p. (In Russ.)
6. Astakhov V., Shvets S. The assessment of plastic deformation in metal cutting. Journal of Materials Processing Technology. 2004;(146):193-202.

7. Wen C., Li Z., Wu H., Gu J. Study of Phase Transformations and Interface Evolution in Carbon Steel under Temperatures and Loads Using Molecular Dynamics Simulation. *Metals*. 2024;(14):752.
8. Jiao, Y., Dan, W. and Zhang, W. (2020) The strain-induced martensitic phase transformation of Fe–C alloys considering C addition: A molecular dynamics study. *Journal of Materials Research*. 2020;35(14):1803-1816.
9. Novikov N.V., Klimenko S.A. *Tverdosplavnye instrumenty v protsessah mekhanicheskoy obrabotki* [Carbide tools in machining processes]. Kyiv: V. Bakul Institute for Superhard Materials, 2015, 368 p. (In Russ.)
10. Utyashev F.Z., Raab G.I., Valitov V.A. *Deformatsionnoe nanostrukturirovanie metallov i splavov: monografiya* [Deformation nanostructuring of metals and alloys. Monograph]. St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2020, 185 p. (In Russ.)
11. Kabaldin Y.G., Bashkov A.A. Self-organization and the mechanism of friction during cutting. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering]. 2023;102(2):167-173. (In Russ.) DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-2-167-173. EDN QPEWOW.
12. Kabaldin Y.G., Bashkov A.A., Ivanov S.V., Zamuraev I.D. Neural network modeling of friction processes during cutting. *Transportnoe, gornoe i stroitelnoe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo* [Transport, mining and construction engineering: science and production]. 2023;(19):52-58. (In Russ.) DOI: 10.26160/2658-3305-2023-19-52-58. EDN MIXCZV.

Поступила 02.02.2025; принята к публикации 07.08.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 02/02/2025; revised 07/08/2025; published 30/09/2025

Кабалдин Юрий Георгиевич – доктор технических наук, профессор,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: uru.40@mail.ru. ORCID 0000-0003-4300-6659.

Аносов Максим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332.

Башков Андрей Алексеевич – аспирант кафедры «Технология и оборудование машиностроения»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: kicliu@mail.ru. ORCID 0000-0002-6658-0197.

Рябов Дмитрий Александрович – старший преподаватель, научный сотрудник,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: ryabovdm1996@gmail.com. ORCID 0000-0002-0486-598X.

Акулова Анна Александровна – инженер кафедры «Технология и оборудование машиностроения»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: akulova.anna98@mail.ru.

Yuri G. Kabaldin – DrSc (Eng.), Professor,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: uru.40@mail.ru. ORCID 0000-0003-4300-6659.

Maxim S. Anosov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332.

Andrey A. Bashkov – Postgraduate Student at the Department of Technology and Equipment
of Mechanical Engineering,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: kicliu@mail.ru. ORCID 0000-0002-6658-0197.

Dmitrii A. Ryabov – Senior Lecturer, Researcher,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: ryabovdm1996@gmail.com. ORCID 0000-0002-0486-598X.

Anna A. Akulova – Engineer of the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: akulova.anna98@mail.ru.



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.5
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-122-128

ДЕТЕКЦИЯ ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДАМИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ YOLOv5

Кузнецов С.В., Роговик А.А., Кузнецова Е.С.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. С появлением новых средств и технологий в современном мире у специалистов в области машиностроения появляется все больше технических возможностей для реализации своих профессиональных задач с их использованием. Одним из таких средств являются нейронные сети и, в частности, те, которые могут распознавать объекты на видео и изображениях. Основные плюсы от их применения это существенное повышение производительности труда и снижение числа ошибок в процессе работы. На наш взгляд, одной из лучших представительниц моделей для распознавания объектов на основе нейронной сети является модель YOLOv5, но, к сожалению, не было никакой информации о возможности её применения для работы с чертежами, в частности детекции деталей, получаемых методами токарной обработки. Целями описанной далее работы стали, во-первых, проверка возможности YOLOv5 определять детали тела вращения с различным отношением длины L к их диаметру D на графических изображениях (чертежах) и группировать их по трем группам и, во-вторых, проверка возможности обеспечения высокой точности и скорости работы при решении задачи детекции данных деталей. В ходе работы были использованы два основных метода: метод обучения модели для распознавания объектов на основе нейронной сети и метод работы с набором графических изображений (чертежей) с использованием полученной модели. По итогу, опираясь на первый метод, была получена новая модель, способная распознавать токарные детали на графических изображениях, и в дальнейшем, опираясь на второй метод, была проверена её эффективность. После проведенных тестов можно определенно сказать, что полученная модель может эффективно решать задачу нахождения токарных деталей на чертежах, также стоит отметить, что полученные в ходе работы характеристики обученной модели являются весьма высокими, и, исходя из этого, можно сказать, что модель является довольно-таки перспективной для работы с чертежами. Полученные результаты смогут помочь автоматизировать процесс классификации деталей за счет определения их геометрических характеристик, а также открыть новые перспективы для применения группирования деталей.

Ключевые слова: механическая обработка, токарная обработка, детали типа тел вращения, детекция объектов, нейронные сети, YOLOv5

© Кузнецов С.В., Роговик А.А., Кузнецова Е.С., 2025

Для цитирования

Кузнецов С.В., Роговик А.А., Кузнецова Е.С. Детекция деталей, получаемых методами токарной обработки, с использованием модели для распознавания объектов YOLOv5 // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 122-128. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-122-128>



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

DETECTION OF PARTS OBTAINED BY TURNING METHODS USING THE YOLOv5 OBJECT RECOGNITION MODEL

Kuznetsov S.V., Rogovik A.A., Kuznetsova E.S.

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. With the advent of new tools and technologies in the modern world, specialists in the field of mechanical engineering have more and more technical opportunities to realize their professional tasks. One of these tools is neural networks, and in particular those that can recognize objects in videos and images. The main advantages of using them are a significant increase in labor productivity and a reduction in the number of errors during the work process. In our opinion, one of the best representatives of neural network-based object recognition models is the YOLOv5 model but, unfortunately, there was no information about the possibility of using it to work with drawings, in particular, the detection of details obtained by turning methods. The objectives of the work described below were: firstly, to test the YOLOv5's ability to identify body parts with different ratios of length L to diameter D in graphical images (drawings) and form them into three groups, and secondly, to test the ability to ensure high accuracy and speed of operation when solving the problem of detecting these parts. In the course of the work, two main methods were used: the method of training a model for recognizing objects based on a neural network and the method of working with a set of graphic images (drawings) using the resulting model. As a result, based on the first method, a new model was obtained that can recognize turning parts in graphic images, and further based on the second method, its performance was tested. After the tests, we can definitely say that the resulting model can effectively solve the problem of finding turning parts in drawings, it is also worth noting that the characteristics of the trained model obtained during the work are very high, and based on this, we can say that the model is quite promising for working with drawings. The results obtained can help automate the process of classifying parts by determining their geometric characteristics, as well as open up new perspectives for the use of grouping parts.

Keywords: mechanical processing, turning, parts such as bodies rotation, object detection, neural networks, YOLOv5

For citation

Kuznetsov S.V., Rogovik A.A., Kuznetsova E.S. Detection of Parts Obtained by Turning Methods Using the YOLOv5 Object Recognition Model. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 122-128. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-122-128>

Введение

В современных условиях в машиностроении и, в частности, в металлообработке, просматривается четкая тенденция к автоматизации технологических процессов. Этому способствует появление новых технических и технологических решений, направленных на интенсификацию труда, снижение времени на подготовку технологической документации и повышение качества ее разработки. Поиск способов и технических решений, направленных на повышение производительности труда при реализации процессов механической обработки, является весьма актуальной задачей.

Одним из перспективных средств являются нейронные сети, которые уже находят широкое применение в различных отраслях машиностроения, где они доказывают эффективность и преимущества их использования [1-5].

Данная статья может быть интересна всем специалистам в области машиностроения, в частности металлообработки, так как до сих пор раскрыты не все перспективы применения нейронных сетей в данной области.

На данном этапе развития машиностроения их уже применяют для решения многих задач:

- для подбора оптимальных режимов резания металлов;
- в качестве систем диагностики процессов, производящих онлайн-мониторинг различных параметров процесса резания;
- в качестве систем автоматического управления технологическими процессами, позволяющими реализовывать адаптивный ход обработки;
- для проектирования различных инженерных продуктов;
- для контроля состояния оборудования, прогноза их надежности и долговечности с возможностью получения оценок о необходимости проведения их технического обслуживания и ремонта.

Описанный в данной статье метод использования модели на основе нейронной сети может применяться как инструмент при планировании производства деталей типа тел вращения, таких как валы, оси, фланцы, втулки, диски и др. Перспективы использования такого подхода были ранее описаны в некоторых работах [6].

Данный способ может быть применен для группирования и типизации изготавливаемых токарных деталей, который показывает хорошие результаты по повышению производительности и эффективности, осо-

бенно в мелкосерийном и единичном производстве. Суть метода состоит в объединении различных деталей в группы по схожим конструктивным и технологическим признакам и дальнейшее их производство совместно всей группой, а не по отдельности [7-9].

В статье рассматривается решение задачи детекции деталей, получаемых методами токарной обработки, на чертежах с использованием модели для обнаружения объектов на основе нейронной сети YOLOv5. Представленные методы и подходы позволяют автоматизировать процесс классификации деталей за счет определения их геометрических характеристик, что способствует повышению производительности и снижению вероятности ошибок инженеров области машиностроения при классификации больших объемов различных токарных деталей.

Современные методы, основанные на нейронных сетях, предлагают эффективные решения задачи нахождения графических объектов на картинках. Одним из таких методов является модель, основанная на нейронной сети YOLOv5 (You Only Look Once version 5), которая обеспечивает одну из самых высоких скоростей работы и точность детекции объектов. Этот алгоритм успешно применяется в различных областях, включая обнаружение объектов на изображениях и видео.

Данная нейронная сеть основана на архитектуре DarkNet, которая изначально разрабатывалась для задач компьютерного зрения. YOLOv5 работает по принципу «выделения признаков» (feature extraction), когда сеть выделяет наиболее информативные признаки из исходного изображения. Затем происходит классификация этих признаков на основе предварительно обученной модели. Преимущества и способы работы с моделью YOLO были описаны во многих статьях [10, 11]. В случае детекции токарных деталей на чертежах алгоритм использует набор признаков, характерных для различных форм и размеров этих деталей.

На этапе просмотра имеющейся информации по работе с нейронными сетями было рассмотрено множество ранее выпущенных работ [12-14]. Далее в качестве рабочей модели была выбрана YOLOv5, так как она показывает одни из лучших точностных показателей при решении задачи детекции объектов, обеспечивая при этом высокую скорость работы. К сожалению, отсутствует информация о возможности применения этой модели для работы с чертежами, следовательно, было решено проверить данную возможность на практике.

Целью статьи стала проверка перспектив применения YOLOv5 для работы с чертежами токарных деталей, в частности возможности обеспечения высокой точности и скорости работы при решении задачи их детекции.

Этапы работы

Первый этап – это определение групп и их признаков. В качестве базового документа был использо-

ван ОК 012-93 «Классификатор ЕСКД», класс 71 [15]. Из этого документа берется класс 71 – детали — тела вращения. Данный класс делится на три группы по соотношению длины L и наибольшего наружного диаметра D :

– L до $0,5D$ включительно. К этой группе относятся детали типа: фланцы, катушки, кольца, диски и др. Далее в работе эта группа будет иметь название flange;

– L свыше $0,5$ до $2D$ включительно. К этой группе относятся детали типа: втулки, стаканы, катушки, шкивы и др. Далее эта группа будет называться bush;

– L свыше $2D$. К этой группе относятся детали типа: валы, шпиндели, оси, штоки и др. Далее эта группа будет называться shaft.

Второй этап – это создание набора данных (DataSet) для машинного обучения. Было собрано по 80 чертежей каждой группы для тренировки нейронной сети в сумме 240 и по 20 чертежей каждого вида для валидации (проверки во время обучения модели) – в сумме 60. Все собранные чертежи были преобразованы в формат JPEG, с которым работает модель YOLO. Стоит отметить, что создание правильного набора данных – это один из самых важных этапов в машинном обучении.

Далее все они были вручную размечены при помощи специального, предназначенного для этого программного обеспечения. На **рис. 1** видно, как была размечена одна из деталей из каждой группы.

В данном случае при разметке выбираем вид, который отображает отношение длины к диаметру. В конечном итоге обученная модель должна будет отображать подобные «прямоугольники» на проверочном и тестовом наборе чертежей и выдавать результат, какой объект находится на изображении с вероятностью того, что это именно определенный объект, а не другой.

Третий этап – это обучение модели YOLOv5, которая обучается на наборе данных, сбор которого был произведен на предыдущем этапе и который содержит изображения токарных деталей различных форм и размеров. Обучение происходит в несколько этапов:

- 1) инициализация модели случайными весами;
- 2) подача на вход модели изображений с размеченными деталями;
- 3) оптимизация весов модели с помощью алгоритма стохастического градиентного спуска;
- 4) оценка точности детекции на валидационном наборе данных.

Исходные данные для обучения:

- разрешение изображений – 640×640 ;
- количество шагов – 16;
- количество эпох обучения – 30.

На **рис. 2** можно увидеть, как модель находила и выделяла объекты на чертежах, в нашем случае детали из трех групп.

В итоге получилась модель, имеющая 157 слоев и 7018216 параметров. Итоговые показатели эффективности обученной модели, полученные на проверочном наборе данных, представлены в **таблице**.

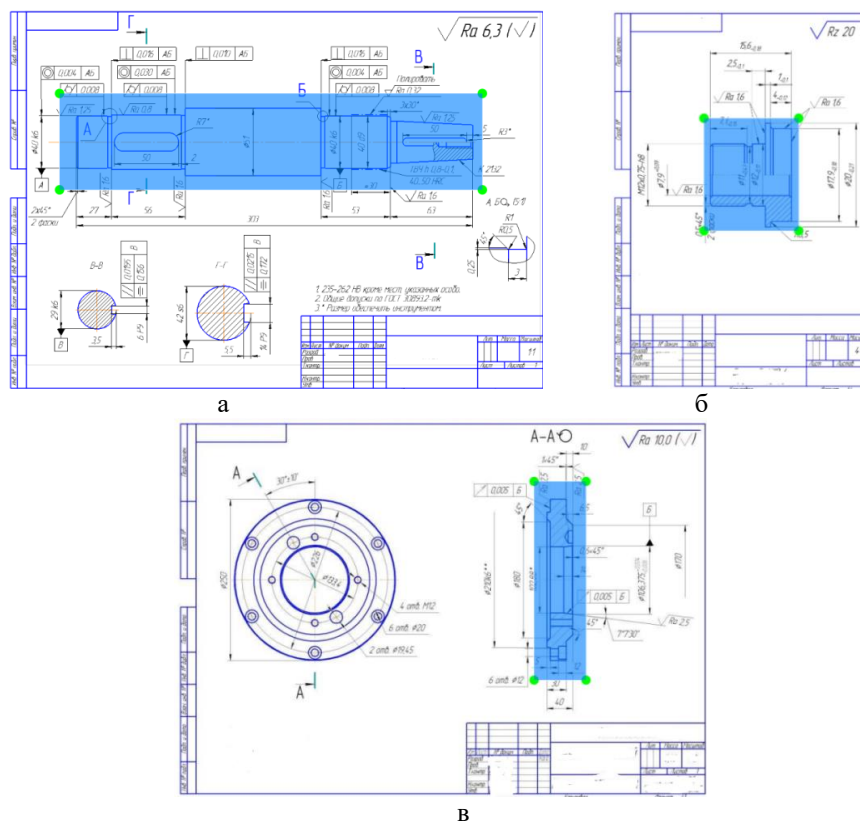


Рис. 1. Разметка деталей из трех групп на изображениях: а – Shaft (L свыше $2D$); б – Bush (L свыше $0,5$ до $2D$); в – Flange (L до $0,5D$)

Fig. 1. Marking of parts from three groups in the images: а is Shaft (L over $2D$); б is Bush (L over 0.5 to $2D$); в is Flange (L up to $0.5D$)

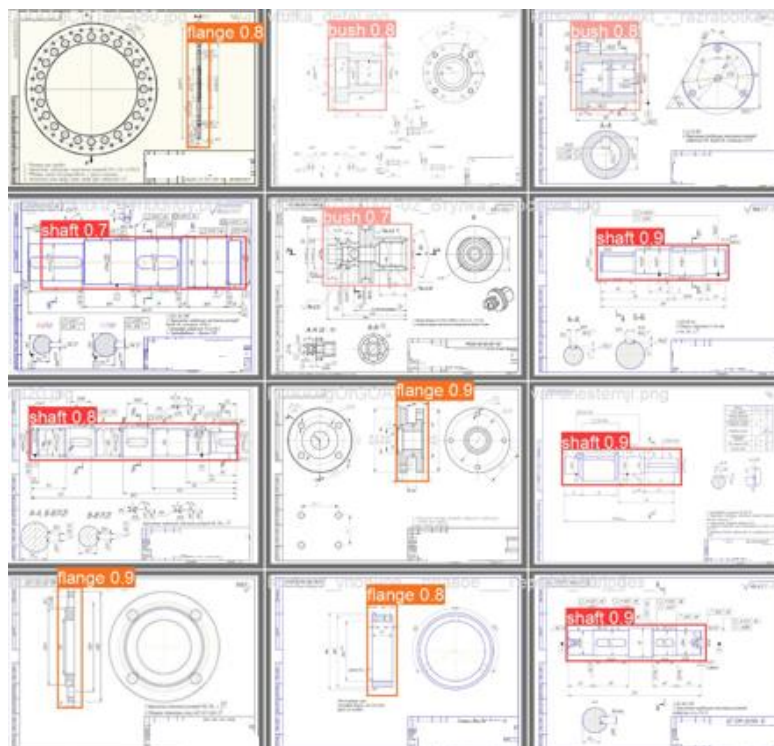


Рис. 2. Отображение результатов обучения на проверочном наборе данных

Fig. 2. Displaying learning outcomes on a validate dataset

Таблица. Показатели эффективности обученной модели

Table. Performance indicators of the trained model

Группа	Images	Instances	P	R	mAP50	mAP50-95
Суммарно	60	60	0,94	0,89	0,931	0,609
Shaft (L свыше $2D$)	60	20	0,98	1	0,995	0,774
Bush (L от 0,5 до $2D$)	60	20	0,86	0,92	0,965	0,608
Flange (L до $0,5D$)	60	20	0,98	0,75	0,834	0,445

Четвертый этап – это оценка эффективности получившейся модели и дальнейшее проведение тестирования.

Оценка производится на основе показателей, приведенных в таблице (P, R, mAP50, mAP50-95). Проанализируем каждый из них.

Первый показатель P – это точность модели. Он отображает, сколько обнаруженных объектов в проверочном наборе были определены правильно. Суммарно по всем трем группам имеем 94%, что является хорошим результатом.

Второй показатель R – это отзывчивость. Показывает способность модели находить все группы объектов на изображениях. В нашем случае он не имеет

особую роль, так как обычно на чертеже представлен только представитель одной группы, хотя и тут тоже имеем хороший показатель.

Третий показатель mAP50 – средняя точность при 50% пороге IoU (объем перекрытия двух прямоугольников, первого – размеченного вручную объекта и второго – определенного моделью). Хорошим считается показатель, превышающий 0,5, мы суммарно имеем 0,93.

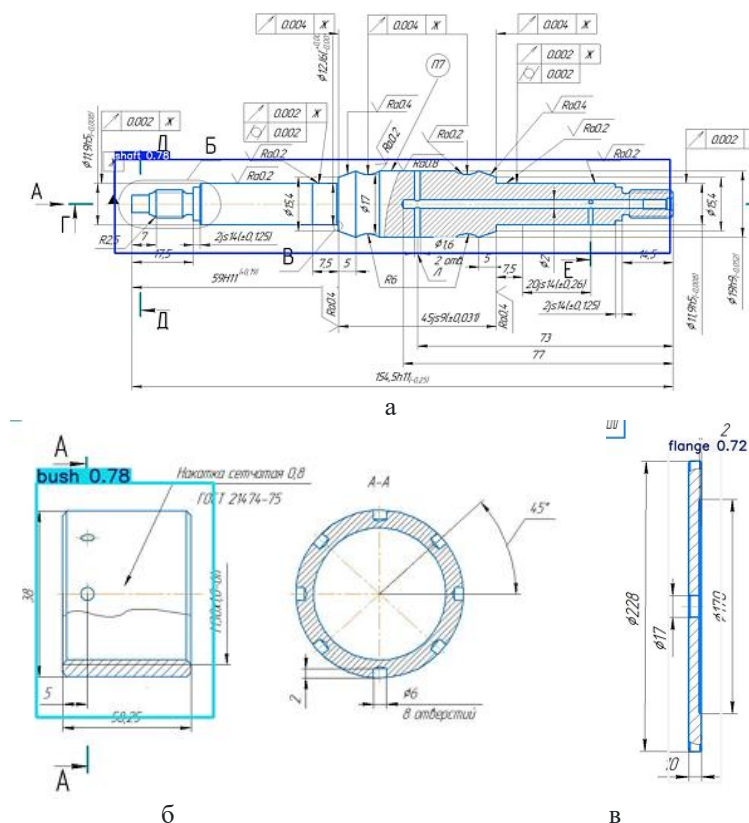
Четвертый показатель mAP50-90 – среднее значение средней точности, которое определяется на разных степенях перекрытия от 0,50 до 0,95. Хорошим считается показатель, превышающий 0,3, мы суммарно имеем 0,61.

Тест полученной модели

Далее был произведен тест обученной модели на подготовленном для этого наборе данных, состоящем из 10 случайных изображений чертежей токарных деталей.

После обработки моделью YOLOv5 все объекты, а именно Shaft (L свыше $2D$), Bush (L свыше 0,5 до $2D$) и Flange (L до $0,5D$), были правильно определены моделью.

На рис. 3 представлены образцы определенных деталей из тестового набора из каждой группы.



По итогам проведенного теста и оценок получившихся характеристик модели можно сделать вывод, что полученная в ходе обучения модель может весьма эффективно определять токарные детали на чертежах.

Заключение

Таким образом, можно определенно сказать, что модель для распознавания объектов на основе нейронной сети YOLOv5 может эффективно решать задачу нахождения токарных деталей на чертежах. Модель способна определять детали тела вращения с различным отношением длины L к их диаметру D , а именно детали с L свыше $2D$ (валы, оси, шпильки и т.п.), с L свыше 0,5 до $2D$ (втулки, фланцы и т.п.) и с L до $0,5D$ (диски, кольца и т.п.) и группировать их по трем этим группам.

Также можно предположить, что модель является весьма перспективной для работы с чертежами, так как полученные в ходе работы показатели обученной модели являются весьма высокими и заметно выше значений, которые считаются хорошими при определении качества конкретной полученной модели для нахождения тех или иных объектов. Также модель была успешно испытана на тестовом наборе данных и показала отличный результат – все объекты из тестового набора данных были определены с высокой долей уверенности модели, что это именно этот объект.

В дальнейшем полученные результаты смогут помочь автоматизировать процесс классификации деталей за счет определения их геометрических характеристик, открыть новые перспективы для применения группирования деталей и, как следствие, повысить эффективность мелкосерийного и единичного производств. Применение модели на основе нейронной сети способствует двум основным положительным эффектам: существенному повышению производительности труда и снижению вероятности ошибок инженеров из машиностроительной области при классификации больших объемов различных токарных деталей.

Список источников

1. Суздалева Н. Н. Потенциал использования нейросетей промышленными предприятиями в условиях российской действительности // Региональная и отраслевая экономика. 2022. №11 (173). С. 91-94.
2. Алтунина К.А., Соколова М.В. Применение нейронных сетей для моделирования процесса токарной обработки // Вестник ТГТУ. 2016. Т. 22. № 1. С. 122-133.
3. Сверточные нейронные сети для выявления дефектов и повреждений конструкций / Степанов Д.В., Макаров А.В., Молотов А.М., Облетов Е.Н. // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 9. С. 52-58.
4. Веретельников А.С., Гавлицкий А.И. Применение искусственного интеллекта в металлообрабатывающей промышленности // Электронный научный журнал «Дневник науки». 2022. №12. №37.

5. Алханов А.А. Машинное обучение и его применение в современном мире // Проблемы науки. 2021. №7 (66). С. 25-27.
6. Кузнецов С.В., Роговик А.А. Перспектива применения нейронных сетей для планирования загрузки участка механической обработки // International Journal of Humanities and Natural Sciences, 2024, № 9. С. 115-117.
7. Митрофанов С.П. Научная организация машиностроительного производства. Ленинград: Машиностроение, 1976. 712 с.
8. Определение коэффициентов штучного времени деталей типа «вал» на основе их подобия / Кузнецов С.В., Аносов М.С., Роговик А.А., Муругов Ю.С. // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 6. С. 72-75.
9. Кузнецов С.В., Роговик А.А., Муругов Ю.С. Подбор оптимальной группировки деталей типа «Вал» для увеличения серийности при планировании производства // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2023. №1. С. 51-55.
10. Bochkovskiy A., Wang, C. YOLOv5: Creating State-of-the-Art Object Detectors in Real Time. [S. l.] // ArXiv. 2021. С. 214–219.
11. Bochkovskiy A. YOLOv7: Trainable Boosted Data-Driven Layer for Real-Time Object Detection. [S. l.] // ArXiv. 2023. С. 5147–5155.
12. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017, pp. 7263–7271.
13. Redmon J., Shooji F., Farhadi A. YOLOv5 Training and Improving Object Detectors and Segmentation Models with One Click // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022, pp. 962–972.
14. Feature Pyramid Networks for Object Detection / Lin T.-Y., Dollár P., Girshick R., He, K., Hariharan, B., Belongie, S. // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017, pp. 936–944.
15. ОК 012-93. Общероссийский классификатор изделий и конструкторских документов (Классификатор ЕСКД). М.: Изд-во стандартов, 2004. 40 с.

References

1. Suzdaleva N.N. The potential of using neural networks by industrial enterprises in the context of Russian reality. *Regionalnaya i otraslevaya ekonomika* [Regional and sectoral economics], 2022;(11(173)):91-94. (in Russ.)
2. Altunina K.A., Sokolova M.V. Application of neural networks for modeling the turning process. *Vestnik TGTU* [Bulletin of TSTU], 2016 22(1):122-133. (in Russ.)
3. Stepanov D.V., Makarov A.V., Molotov A.M., Bolotov E.N. Convolutional neural networks for detecting defects and damage to structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and civil engineering], 2024;(9):52-58. (in Russ.)
4. Veretelnikov A.S., Gavlitisky A.I. Application of artificial intelligence in the metalworking industry. *Elektronniy nauchniy zhurnal «Dnevnik nauki»* [Electronic scientific journal "Diary of Science"], 2022;(12(37)). (in Russ.)
5. Alkhanov A.A. Machine learning and its application in the modern world. *Problemy nauki* [Problems of Science], 2021;(7(66)):25-27. (in Russ.)

6. Kuznetsov S.V., Rogovik A.A. The prospect of using neural networks to plan the loading of a machining site. [International Journal of Humanities and Natural Sciences], 2024;(9):115-117. (in Russ.)
7. Mitrofanov S.P. *Nauchnaya organizatsiya mashinostroitel'nogo proizvodstva* [Scientific organization of machine-building production]. Leningrad: Mashinostroenie, 1976, 712 p. (in Russ.)
8. Kuznetsov S.V., Anosov M.S., Rogovik A.A., Murugov Yu.S. Determination of the unit time coefficients of "shaft" type parts based on their similarity. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Bulletin of the Volga region], 2024;(6):72-75. (in Russ.)
9. Kuznetsov S.V., Rogovik A.A., Murugov Yu.S. Selection of the optimal grouping of the "shaft" type parts to increase seriality in production planning. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Mashinostroenie: online electronic scientific journal], 2023;(1):51-55. (in Russ.)
10. Bochkovsky A., Wang C. YOLOv5: Creating State-of-the-Art Object Detectors in Real Time. [S. l.]. ArXiv. 2021:214-219.
11. Bochkovsky A. YOLOv7: Trainable Boosted Data-Driven Layer for Real-Time Object Detection. [S. l.]. ArXiv. 2023:5147-5155.
12. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017:7263-7271.
13. Redman J., Shoji F., Farhadi A. YOLOv5 Training and Improving Object Detectors and Segmentation Models with One Click. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022:962-972.
14. Lin T.-Y., Dollár P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Feature Pyramid Networks for Object Detection. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017:936-944.
15. OK 012-93. All-Russian classifier of products and design documents (ESCD classifier) Moscow: Standards Publishing House, 2004, 40 p. (In Russ.)

Поступила 19.02.2025; принята к публикации 19.03.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 19/02/2025; revised 19/03/2025; published 30/09/2025

Кузнецов Сергей Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машиностроительные технологические комплексы», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: ks251072@yandex.ru. ORCID 0009-0004-9532-1671

Роговик Артем Алексеевич – аспирант, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: artem-rogovik@mail.ru. ORCID 0009-0004-4099-7324

Кузнецова Елена Сергеевна – ассистент кафедры «Машиностроительные технологические комплексы», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: lena-kuzn2014@yandex.ru ORCID 0009-0008-7950-4039

Sergey V. Kuznetsov – PhD(Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Machine-Building Technological Complexes, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
E-mail: ks251072@yandex.ru . ORCID 0009-0004-9532-1671

Artem A. Rogovik – Student, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email address: artem-rogovik@mail.ru . ORCID 0009-0004-4099-7324

Elena S. Kuznetsova – Assistant of the Department of Machine-Building Technological Complexes, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: lena-kuzn2014@yandex.ru ORCID 0009-0008-7950-4039



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.791.05:622.24.053.6
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-129-140

УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ

Атамашкин А.С.¹, Приймак Е.Ю.^{1,2}, Исаева А.В.^{1,2}, Тулибаев Е.С.^{1,2}, Сёмка Я.С.¹

¹Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

²АО «Завод бурового оборудования», Оренбург, Россия

Аннотация. Исследовано усталостное поведение сварных соединений бурильных труб, полученных ротационной сваркой трением, из сталей 32Г2, 32ХГМА (тело трубы) и 40ХН2МА (замковая часть) в состоянии после сварки и после отпуска при температуре 550°C. Испытания на усталость проводились на цилиндрических образцах со сварным соединением с двухопорным креплением вращающегося образца при знакопеременном изгибе с вращением, что позволило выявить наиболее слабую зону в образце. Полученные значения предела выносливости сварных соединений сопоставлялись со значениями предела выносливости цельных образцов из базовых сталей тела бурильной трубы – 32Г2 и 32ХГМА. Установлено, что сварное соединение сталей 32Г2-40ХН2МА уступает по пределу выносливости базовой стали 32Г2 на 15% в исходном состоянии и на 28% после отпуска, в то время как сварное соединение сталей 32ХГМА-40ХН2МА обладает усталостной прочностью как в исходном состоянии, так и после отпуска, соизмеримой с базовой сталью 32ХГМА. Результаты исследований дополнены металлографическим анализом микроструктуры сварных соединений. На основании результатов исследований с помощью EBSD-анализа установлены микроструктурные особенности уязвимых периферийных участков зоны сварочного воздействия, контролирующие сопротивление усталостным нагрузкам.

Ключевые слова: ротационная сварка трением, среднеуглеродистые стали, сварное соединение, зона термомеханического влияния, усталостная прочность, предел выносливости

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01311, <https://rscf.ru/project/23-79-01311/>

© Атамашкин А.С., Приймак Е.Ю., Исаева А.В., Тулибаев Е.С., Сёмка Я.С., 2025

Для цитирования

Усталостная прочность сварных соединений высокопрочных бурильных труб / Атамашкин А.С., Приймак Е.Ю., Исаева А.В., Тулибаев Е.С., Сёмка Я.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 129-140. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-129-140>



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

FATIGUE STRENGTH OF WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH DRILL PIPES

Atamashkin A.S.¹, Priymak E.Y.^{1,2}, Isaeva A.V.^{1,2}, Tulibaev E.S.^{1,2}, Semka Y.S.¹¹FSBEI HE Orenburg State University, Orenburg, Russia²ZBO Drill Industries, Orenburg, Russia

Abstract. The fatigue behavior of welded joints of drill pipes obtained by rotary friction welding from 32G2, 32KhGMA (pipe body) and 40KhN2MA (tool joint part) steels in the state after welding and after tempering at a temperature of 550°C. Fatigue tests were carried out on cylindrical samples with a welded joint with a two-support mounting of a rotating sample with alternating bending with rotation, which made it possible to identify the weakest zone in the sample. The obtained values of the endurance limit of welded joints were compared with the values of the endurance limit of solid samples from the 32G2 and 32KhGMA base steels of the drill pipe body. It was found that the welded joint of 32G2-40KhN2MA steels is inferior in endurance to the base steel 32G2 by 15% in the initial state and by 28% after tempering, while the welded joint of 32KhGMA-40KhN2MA steels has fatigue strength both in the initial state and after tempering, commensurate with the 32KhGMA base steel. The research results are supplemented by metallographic analysis of welded joints microstructure. Based on the research results using the EBSD analysis, microstructural features of vulnerable peripheral areas of the welding impact zone that control fatigue load resistance have been established.

Keywords: rotary friction welding, medium carbon steels, welded joint, thermo-mechanically affected zone, fatigue strength, endurance limit.

The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 23-79-01311, <https://rscf.ru/project/23-79-01311/>

For citation

Atamashkin A.S., Priymak E.Y., Isaeva A.V., Tulibaev E.S., Semka Y.S. Fatigue Strength of Welded Joints of High-Strength Drill Pipes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 129-140. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-129-140>

Введение

Освоение новых месторождений полезных ископаемых непрерывно связано с совершенствованием бурового инструмента, в частности бурильных труб, испытывающих сложнагруженное состояние в процессе бурения. Доминирующей причиной выхода из строя бурильных труб является разрушение, обусловленное воздействием знакопеременных усталостных нагрузок. Поэтому характеристики усталостной прочности материала и конструкции бурильных труб преимущественно определяют надежность и долговечность колонны.

В большинстве случаев бурильные трубы представляют собой сварную конструкцию, состоящую из тела трубы и привариваемых посредством ротационной сварки трением (РСТ) замковых деталей [1, 2]. Достоинствами способа РСТ являются возможность получения качественного сварного соединения между ограниченно и трудносвариваемыми материалами, из которых изготавливаются элементы бурильных труб, высокая производительность, повторяемость и автоматизация процесса [3, 4]. При разработке высокопрочных бурильных труб для капитального ремонта нефтяных и газовых скважин, не имеющих высаженных частей в зоне сварного шва, необходимо рационально

подойти к выбору материала с точки зрения экономичности и обеспечения необходимых свойств. Сталь 32Г2 является наиболее экономичным материалом для изготовления трубной продукции. При оптимально подобранных режимах закалки и отпуска она может обеспечивать группу прочности «Л» согласно ГОСТ Р 50278-92 [5]. Более высокую прочность (группы «М» и «Р» согласно ГОСТ Р 50278-92) обеспечивают среднеуглеродистые стали марок 26Х1МФ, 32ХМА, 32ХГМА и др., легированные Cr, Mo и Mn [6]. Однако их стоимость несколько выше. В качестве материала замковых деталей обычно используются стали с большим содержанием углерода для дополнительного увеличения прочности, жесткости и износостойкости резьбовых соединений, с помощью которых осуществляется сборка бурильной колонны. К ним относятся стали 40ХН, 40ХН2МА и др. [7].

В процессе РСТ замковой части и тела бурильной трубы их приконтактные области подвергаются термическому и деформационному воздействию, в результате чего образуется зона термомеханического влияния (ЗТМВ). Данная зона характеризуется неоднородной, градиентной микроструктурой, определяющей механические свойства соединений, в том числе сопротивление усталостным нагрузкам. Ранними исследованиями установлено, что при оптимально

подобранных режимах РСТ механические свойства сварных соединений из среднеуглеродистых легированных сталей не уступают механическим свойствам исходных материалов при растяжении [8, 9]. Однако для обеспечения надежности и долговечности буровых труб важно также обеспечить усталостную прочность сварных соединений по возможности на уровне материала тела трубы.

Поиск и анализ литературных источников, освещающих проблемы усталостной прочности сварных соединений, выполненных способом РСТ, показал ограниченность информации в этой области. Очевидно, что характеристики усталостной прочности сварных соединений будут зависеть как от параметров сварки, так и от природы исходных материалов и их химического состава и от послесварочной термической обработки. В работе [10] представлены исследования влияния параметров РСТ на усталостную прочность соединения алюминиевых сплавов AA7075-AA5083, по результатам которых достигнута искомая усталостная прочность свариваемых материалов. В работах [11, 12] приводятся результаты положительного влияния отжига на усталостную прочность однородных сварных соединений титановых сплавов Ti-6242 и Ti-6Al-4V. Образование интерметаллидов в разнородном сварном соединении среднеуглеродистой стали AISI 1040 и аустенитной нержавеющей стали AISI 304 снизило усталостную прочность соединения на 30% относительно AISI 1040 и на 40% относительно AISI 304 [13].

Целью настоящей работы является оценка сопротивления усталостному разрушению сварных соединений буровых труб из комбинаций среднеуглеро-

дистых легированных сталей в сравнении с наименее прочной базовой сталью в исследуемом сочетании.

Материалы и методы исследования

Исследуемые сварные соединения представляли собой сочетание среднеуглеродистых легированных сталей 32Г2-40ХН2МА и 32ХГМА-40ХН2МА. Химический состав указанных сталей представлен в табл. 1.

Сварку трубных заготовок наружным диаметром 73 мм и толщиной стенки 9 мм осуществляли на машине с непрерывным приводом «Thompson-60». Режимы сварки были следующими: сила притирки – 50 кН, сила при нагреве – 145 кН, силы проковки – 260 кН, частота вращения – 600 об/мин, линейная осадка при нагреве – 7 мм. Заготовки предварительно были подвергнуты термической обработке (закалке и отпуску) для достижения требуемых механических свойств. Микроструктура исходных сталей представляет собой отпущенную мартенситно-бейнитную смесь для сталей 32Г2 и 32ХГМА (рис. 1, а, б) и отпущенный мартенсит для стали 40ХН2МА (рис. 1, в).

Механические свойства сталей и сварных соединений на их основе, полученные в результате испытаний на растяжение, представлены в табл. 2.

Из трубных заготовок со сварным соединением методом электроэрозионной обработки были вырезаны продольные образцы для металлографических исследований и испытаний на усталостную прочность. Часть образцов со сварным соединением были подвергнуты послесварочному отпуску в лабораторной печи SNOL при температуре 550°C в течение 1 ч.

Таблица 1. Химический состав сталей, предназначенных для производства буровых труб, мас. %

Table 1. Chemical composition of steels intended for the production of drill pipes, wt. %

Марка стали	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
32Г2 (тело трубы)	0,34	1,4	0,28	0,012	0,012	0,08	0,07	0,12	-
32ХГМА (тело трубы)	0,32	0,82	0,36	0,005	0,01	0,98	0,15	0,14	0,31
40ХН2МА (замковая часть)	0,44	0,55	0,31	0,004	0,01	0,75	1,32	0,22	0,16

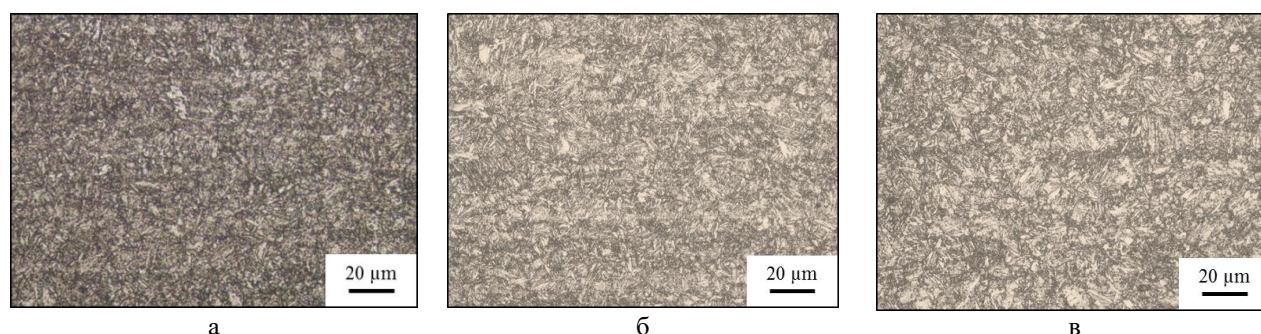


Рис. 1. Микроструктура сталей в состоянии перед сваркой: а – 32Г2; б – 32ХГМА; в – 40ХН2МА

Fig. 1. Microstructure of steels in the pre-welding state: а is 32Г2; б is 32KhGMA; в is 40KhN2MA

Таблица 2. Механические свойства сварных соединений 32Г2-40ХН2МА и 32ХГМА-40ХН2МА и сталей на их основе [8, 9]

Table 2. Mechanical properties of welded joints 32G2-40KhN2MA and 32KhGMA-40KhN2MA and steels based on them [8, 9]

Тип образца	σ_{02} , МПа	σ_B , МПа	δ , %
32Г2	774	878	14,5
32ХГМА	861	952	15,5
40ХН2МА	870	984	10,5
32Г2-40ХН2МА	768	840	16,0*
32ХГМА-40ХН2МА	834	933	23,0*

* δ рассчитано по отношению к расчетной длине наименее прочной стали

Изучение микроструктуры сварных соединений проводили с помощью светового микроскопа Nikon ECLIPSE 100 на поперечных шлифах после травления 4%-м раствором азотной кислоты в этаноле. Измерения микротвердости по протяженности ЗТМВ осуществляли в соответствии с ГОСТ 9450-76 на микротвердомере HVS-1000 при приложении нагрузки 0,2 Н в течение 10 с с шагом измерения 0,5 мм. Детальное исследование микроструктуры периферийных областей ЗТМВ осуществляли с применением сканирующей электронной микроскопии с приставкой EBSD (Electron Back-Scattering Diffraction). Исследования проводились на растровом электронном микроскопе Thermo Science Scios 2 LoVac с приставкой Oxford Instrument Symmetry EBSD Detector с использованием программного комплекса AZtec. Параметры микроскопа в момент съемки: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 410 нА, шаг сканирования –

0,1 мкм. Построение карт рекристаллизации осуществлялось на основе критерия Хамфри для определения рекристаллизованных зерен (зерна не должны иметь субструктуру; зерна должны быть окружены большеугловыми границами (БУГ); размер зерен должен быть до 4 мкм). Если средний угол разориентировки в зерне превышал 2° , то зерно идентифицировалось как деформированное. Если внутренняя разориентировка в субзерне не превышала 2° , а от субзерна к субзерну превышал, то зерно идентифицировалось как субструктурное (полигонизованное). Если же средний угол разориентировки не превышал 2° , то зерно рекристаллизованное.

Образцы для испытаний на усталость принадлежали типу II согласно ГОСТ 25.502 и имели диаметр рабочей части 5 мм, длину рабочей части 50 мм, диаметр захватной части 7,5 мм (рис. 3).

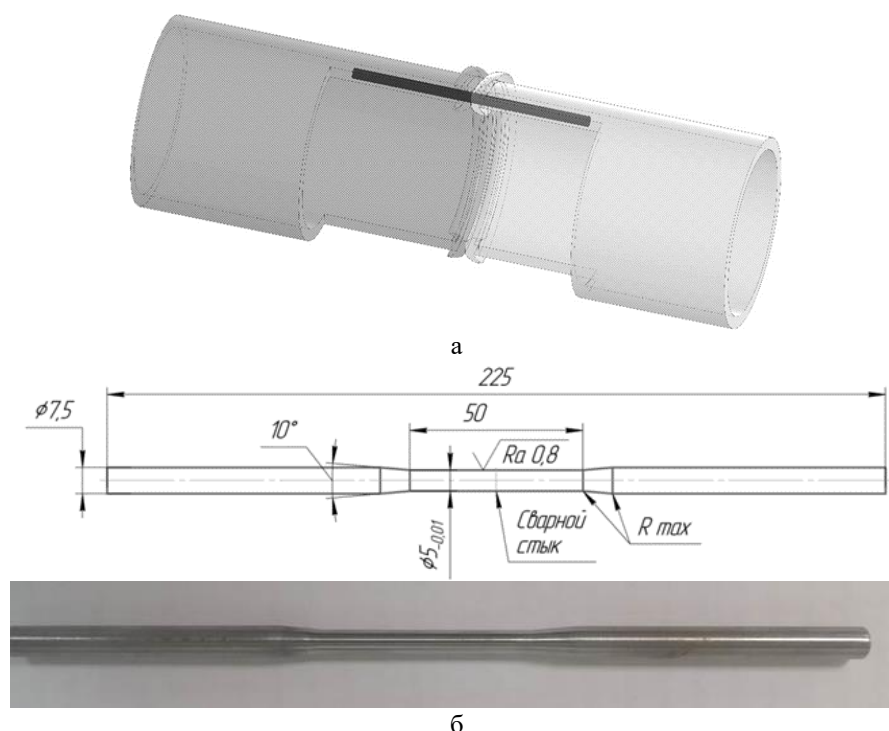


Рис. 3. Схема вырезки образца из трубы со сварным швом (а) и образец со сварным соединением для испытаний на усталость II тип, ГОСТ 25.50282 (б)

Fig. 3. Diagram of cutting a sample from a pipe with a welded seam (a) and a sample with a welded joint for fatigue testing type II, GOST 25.50282 (б)

Испытания на многоцикловую усталость проводили на испытательной машине с двухопорным креплением вращающегося образца при действии постоянного крутящего и изгибающего момента в рабочей части. Такая схема нагружения позволяет выявить наиболее слабые участки в образце со сварным соединением, так как нагрузка распределяется равномерно по всей длине рабочей части. В процессе испытаний воспроизводится симметричный цикл нагружения с постоянными амплитудными значениями напряжений при синусоидальной форме цикла. Коэффициент асимметрии цикла $R = -1$. Частота вращения образца составила 3000 об/мин. Число пройденных циклов регистрировалось счетчиком.

Построение панорамных изображений микроструктуры разрушенных образцов производили с помощью цифрового микроскопа OLYMPUS DSX 1000. Микрофрактографический анализ осуществляли на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6460LV.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование микроструктуры и усталостной прочности сварных соединений в состоянии после сварки. На рис. 4, 5 представлены микроструктуры сварных соединений в различных областях (зоне сопряжения и периферийных областях ЗТМВ). Микроструктура сталей 32ХГМА и 40ХН2МА вблизи границы раздела представляет собой крупноиглочатый ре-чечный мартенсит с участками нижнего бейнита (рис. 4, б, 5, б). В стали 32Г2 вблизи границы раздела имеет место образование грубой бейнитной микроструктуры с крупными вытянутыми карбидами цементитного типа (см. рис. 4, б). Наличие структур, образованных в результате сдвигового превращения аустенита, связано с локальным разогревом заготовок до температур, пре-

вышающих критическую точку A_{c3} , и дальнейшим ускоренным охлаждением в холодные слои металла. Различие образованных микроструктур в исследуемых сочетаниях сталей обусловлено наличием легирующих элементов в сталях 32ХГМА и 40ХН2МА, повышающих их прокаливаемость.

При удалении от границы раздела в результате снижения температуры и степени деформации микроструктура ЗТМВ изменяется. В сталях 32ХГМА и 40ХН2МА возрастает доля бейнитной фазы. В периферийных областях ЗТМВ данных сталей на фоне рекристаллизованной микроструктуры базового металла наблюдаются мелкие зерна мартенсита, что свидетельствует о том, что температура в этих областях превысила критическую точку A_{c1} (рис. 4, в, 5, а, в). Далее следует основной металл, микроструктура которого практически не изменилась по сравнению с исходным состоянием. То есть кратковременное воздействие температуры, превышающей температуру отпуска исходных материалов, не привело к существенным изменениям микроструктуры базовой стали 32ХГМА и 40ХН2МА.

В стали 32Г2 наблюдается другая картина. Периферийная область ЗТМВ в данной стали характеризуется отсутствием явных признаков превращений по сдвиговому механизму. Здесь в результате рекристаллизационных процессов, происходящих в области субкритических температур, образовались мелкие равноосные зерна феррита размером 1-3 мкм и ферритоцементитной смеси. Подобный характер изменения микроструктуры предположительно связан с тем, что температура развития рекристаллизации при деформации стали 32Г2 меньше температуры критической точки A_{c1} данной стали.

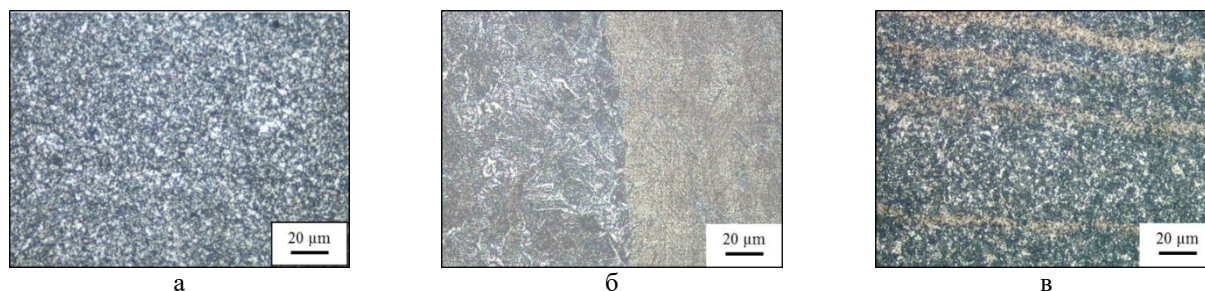


Рис. 4. Микроструктура сварного соединения сталей 32Г2-40ХН2МА
Fig. 4. Microstructure of the welded joint of 32G2-40KhN2MA steels

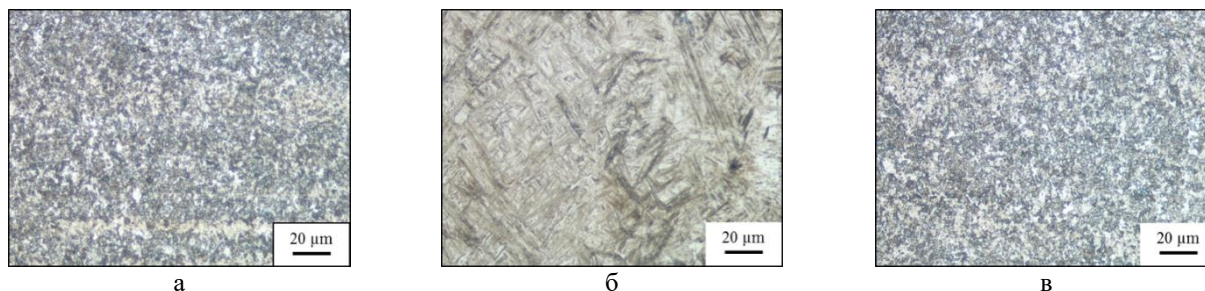


Рис. 5. Микроструктура сварного соединения сталей 32ХГМА-40ХН2МА
Fig. 5. Microstructure of the welded joint of 32KhGMA-40KhN2MA steels

Характер микроструктурных изменений в сварных соединениях отражают профили микротвёрдости, которые имеют несимметричный характер (рис. 6). Максимальной микротвёрдостью вблизи границы сопряжения обладает сталь 40ХН2МА (до 614 НВ). При удалении от зоны сопряжения микротвёрдость снижается, достигая значений исходных сталей, которые составляют 271-288 НВ для стали 32ХГМА и 310-347 НВ для стали 40ХН2МА. Однако в стали 32Г2 в периферийных участках ЗТМВ наблюдается область разупрочнения по отношению к основному металлу. В данной области микротвёрдость составляет 216-246 НВ, в то время как у основного металла она находится в диапазоне 254-266 НВ.

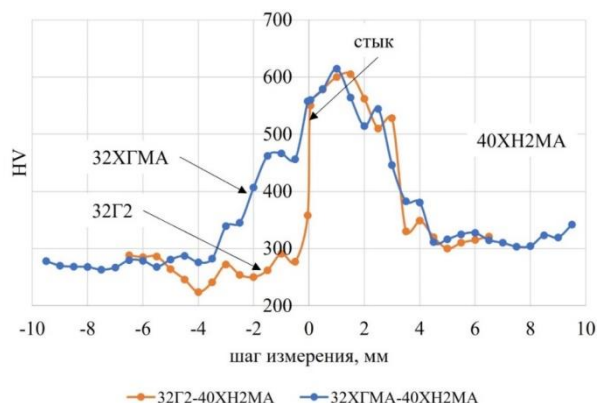
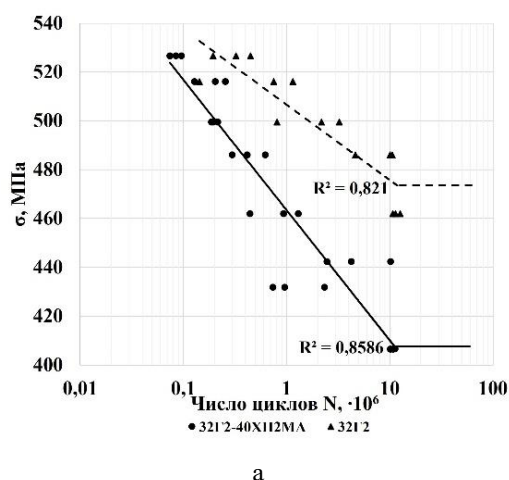
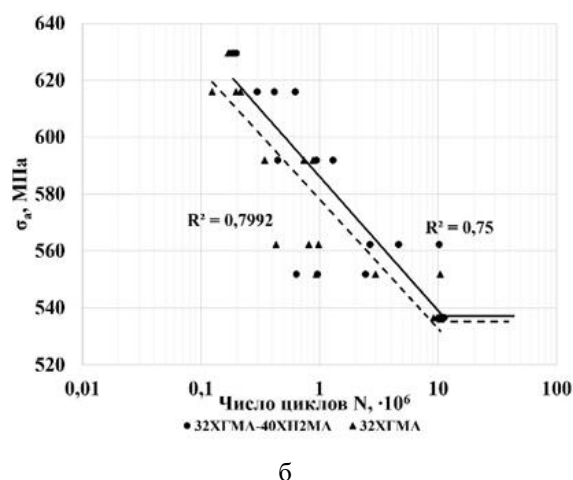


Рис. 6. Распределение микротвёрдости сварного соединения 32Г2-40ХН2МА, 32ХГМА-40ХН2МА в состоянии после сварки

Fig. 6. Microhardness distribution of the welded joint 32G2-40KhN2MA, 32KhGMA-40KhN2MA in the state after welding



а



б

Рис. 7. Кривые усталости базовой стали тела буровой трубы и сварных соединений на ее основе: а – 32Г2-40ХН2МА и 32Г2; б – 32ХГМА-40ХН2МА и 32ХГМА

Fig. 7. Fatigue curves of the base steel of the drill pipe body and welded joints based on it: а is 32G2-40KhN2MA and 32G2; б is 32KhGMA-40KhN2MA and 32KhGMA

На рис. 7 показаны кривые Вёлера, построенные по результатам усталостных испытаний сварных соединений. Полученные результаты показывают, что циклическая долговечность сварных образцов из сталей 32ХГМА-40ХН2МА при всех уровнях амплитуды напряжений несколько выше, чем цельных образцов из стали 32ХГМА. Однако предел выносливости в обоих случаях составляет примерно 540 МПа (рис. 7, б).

Сварное соединение сталей 32Г2-40ХН2МА уступает по усталостной прочности не только сварному соединению сталей 32ХГМА-40ХН2МА, но и базовой стали 32Г2 (рис. 7, а). Количество пройденных сварным соединением циклов при всех уровнях амплитуды напряжений существенно меньше базового металла 32Г2. Предел выносливости сварных образцов в данном случае ниже на 18 % базовой стали, у которой он составляет около 470 МПа.

Характерным в исследуемых образцах со сварным соединением является место разрушения в условиях усталостного нагружения. В сочетании сталей 32ХГМА-40ХН2МА зарождение и развитие усталостной трещины в 93% случаев находится в зоне основного металла 32ХГМА на расстоянии 12-15 мм от границы сопряжения сталей (рис. 8, а), а в остальных случаях – в периферийных областях ЗТМВ стали 32ХГМА. В случае сталей 32Г2-40ХН2МА место разрушения всех образцов фиксируется в периферийных областях ЗТМВ стали 32Г2 в зоне локального разупрочнения микроструктуры (рис. 8, б).

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что периферийные области ЗТМВ стали 32Г2 в сварном соединении 32Г2-40ХН2МА являются наиболее уязвимыми при воздействии усталостных нагрузок. В соединении сталей 32ХГМА-40ХН2МА периферийные области 32ХГМА и основной металл данной стали в целом равнопрочны.

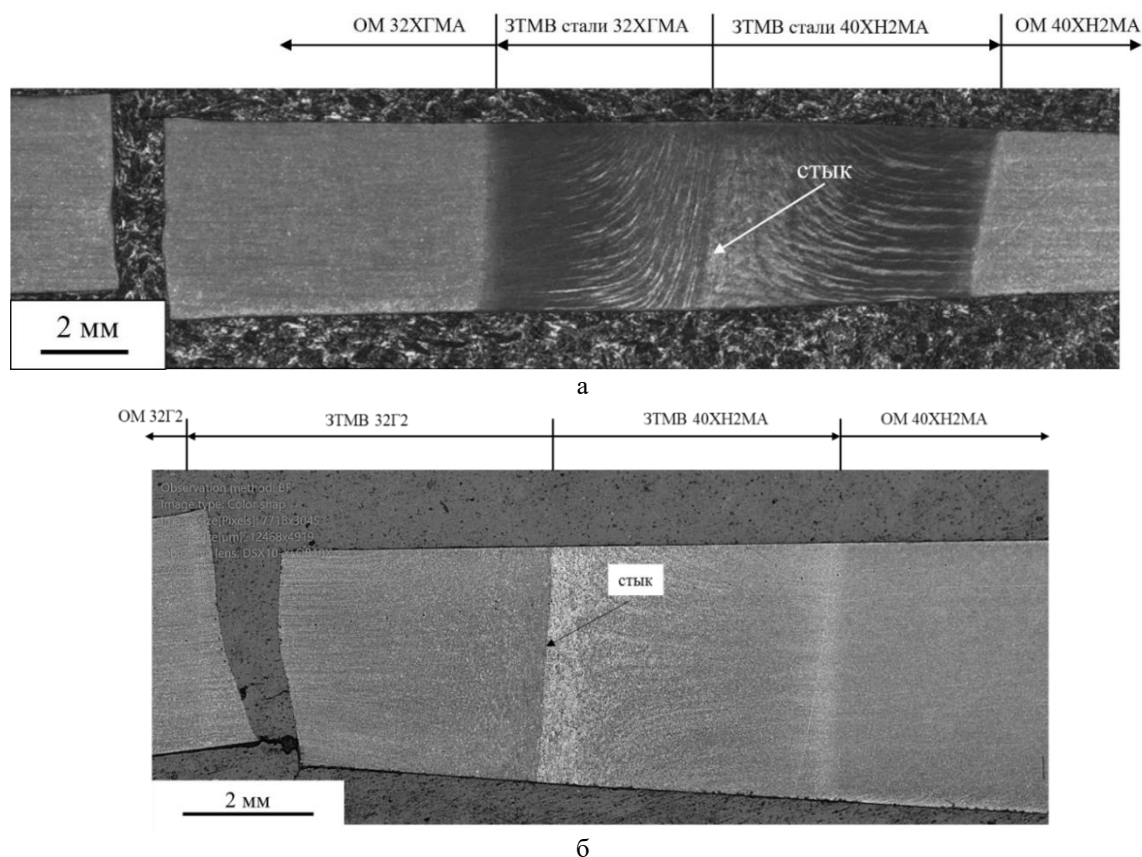


Рис. 8. Микроструктура образцов со сварным соединением, иллюстрирующая место разрушения в условиях многоциклового усталости: а – 32ХГМА-40ХН2МА; б – 32Г2-40ХН2МА

Fig. 8. Microstructure of samples with a welded joint, illustrating the point of fracture under conditions of multi-cycle fatigue: а is 32KhGMA-40KhN2MA; б is 32G2-40KhN2MA

Исследование микроструктуры и усталостной прочности сварных соединений после высокого отпуска. Микроструктура сварных соединений после отпуска представлена на рис. 9, 10.

Воздействие отпуска привело к развитию диффузионных процессов, сопровождающихся рекристаллизацией бейнитных и мартенситных участков α -фазы и выделением карбидных частиц. При этом пластинчатая морфология, характерная для микрострук-

туры в зоне сопряжения сталей, сохранилась (рис. 9, б, 10, б). В периферийных областях ЗТМВ сталей 32ХГМА и 40ХН2МА объем выделений карбидов увеличился (рис. 9, в, 10, а, в). Микроструктура в этих областях мелкодисперсная и представляет собой смесь α -фазы и карбидных частиц различной морфологии. В стали 32Г2 в периферийных областях ЗТМВ наблюдается увеличение доли ферритной фазы и рост ферритных зерен (рис. 10, а).

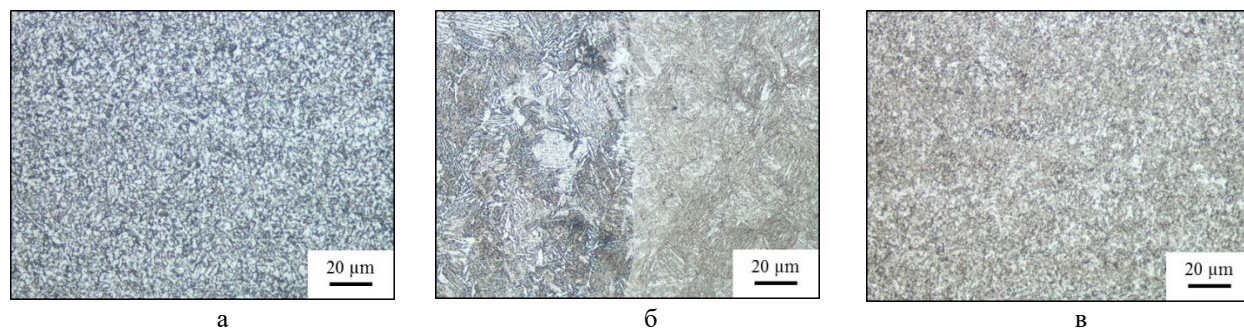


Рис. 9. Микроструктура сварного соединения сталей 32Г2-40ХН2МА после отпуска: а – ЗТМВ 32Г2; б – зона сопряжения (слева 32Г2); в – ЗТМВ 40ХН2МА

Fig. 9. Microstructure of the welded joint of 32G2-40KhN2MA steels after tempering: а is TMAZ 32G2; б is interface zone (32G2 on the left); в is TMAZ 40KhN2MA

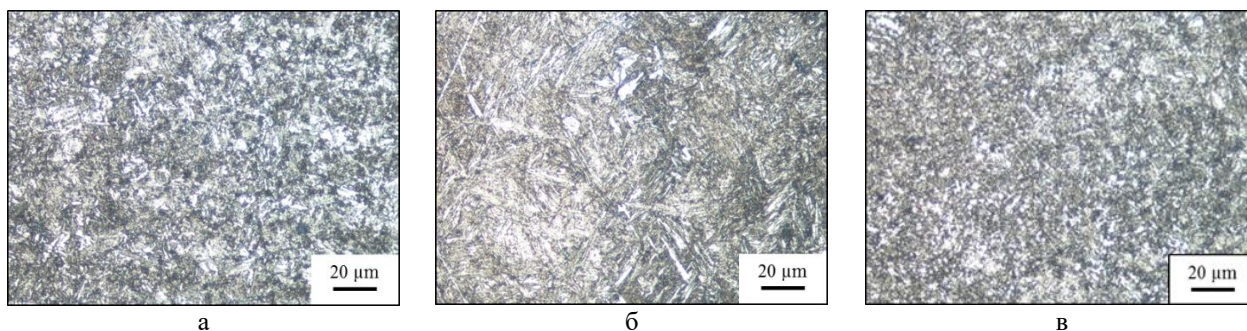


Рис. 10. Микроструктура сварного соединения сталей 32Г2ХГМА-40ХН2МА: а – ЗТМВ 32ХГМА; б – зона сопряжения (слева 32ХГМА); в – ЗТМВ 40ХН2МА

Fig. 10. Microstructure of the welded joint of 32G2KhGMA-40KhN2MA steels: а is TMAZ 32KhGMA; б is interface zone (32KhGMA on the left); в is TMAZ 40KhN2MA

Указанные структурные изменения послужили причиной изменения микротвердости (рис. 11). В области сопряжения сталей 32ХГМА-40ХН2МА значения микротвердости снизились до уровня 386-411 HV, а в соединении сталей 32Г2-40ХН2МА со стороны стали 32Г2 – до 268-274 HV. В периферийных участках ЗТМВ в стали 32ХГМА наблюдается некоторое локальное разупрочнение при переходе к основному металлу. Микротвердость в этой области составляет 245-260 HV против 264-280 HV в основном металле. Дополнительное разупрочнение в этой области наблюдается и в стали 32Г2. Здесь микротвердость после отпуска снизилась до 202-216 HV.

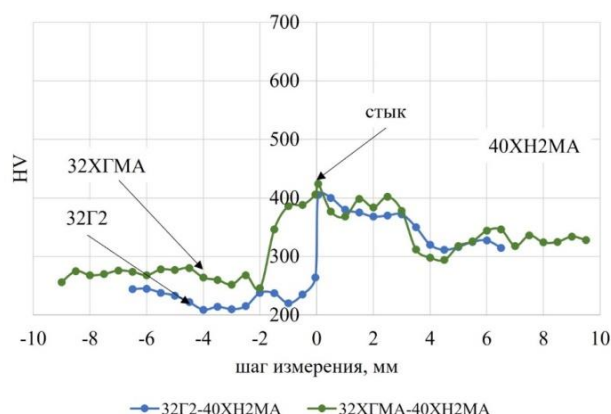


Рис. 11. Распределение микротвердости сварного соединения 32Г2-40ХН2МА, 32ХГМА-40ХН2МА в состоянии после отпуска

Fig. 11. Microhardness distribution of the welded joint 32G2-40KhN2MA, 32KhGMA-40KhN2MA in the state after tempering

Для подробного анализа изменения зёрновой микроструктуры в зоне разупрочнения при отпуске были проведены исследования с помощью EBSD-анализа. Полученные карты рекристаллизации представлены на рис. 12.

В состоянии после сварки периферийные области ЗТМВ стали 32Г2 состоят преимущественно из суб-

структурных (полигонизованных) зерен (66 %) (рис. 12, а). Остальную часть данной области составляют деформированные (22%) и рекристаллизованные зерна (12%). В стали 32ХГМА существенно доминируют деформированные зерна (80%) (рис. 12, б). Воздействие послесварочного отпуска в той или иной мере приводит к развитию процессов полигонизации и рекристаллизации, приближающие микроструктуру к равновесному состоянию. В результате этого в стали 32Г2 доля рекристаллизованных зерен существенно увеличилась и составила примерно половину площади исследуемой области (рис. 12, в). В то время как в стали 32ХГМА карбидные частицы сдерживали развитие процессов полигонизации и рекристаллизации при отпуске, вследствие чего доля полигонизованных зерен возросла до 52%, а доля деформированных зерен снизилась до 35%. Рекристаллизованные зерна в данной стали после отпуска составляют около 13%.

Результаты EBSD доказывают, что процессы локального разупрочнения в периферийных участках ЗТМВ связаны с процессами полигонизации и рекристаллизации микроструктуры, сформированной в процессе деформации при сварке. Карбидообразующие элементы, присутствующие в химическом составе стали 32ХГМА, замедляют процессы рекристаллизации, тем самым препятствуют разупрочнению микроструктуры при отпуске.

Результаты усталостных испытаний отпущенных сварных образцов в сравнении с базовой сталью представлены на рис. 13. Для соединения сталей 32ХГМА-40ХН2МА влияние отпуска на усталостную прочность незначительно. Предел выносливости находится на том же уровне напряжений, что и в исходном состоянии, и составляет 540 МПа (рис. 13, б). Заслуживает внимания тот факт, что в 89 % случаях место зарождения и развития усталостной трещины, так же как и в образцах без отпуска, произошло в основном металле стали 32ХГМА, а в остальных случаях – в ЗТМВ данной стали.

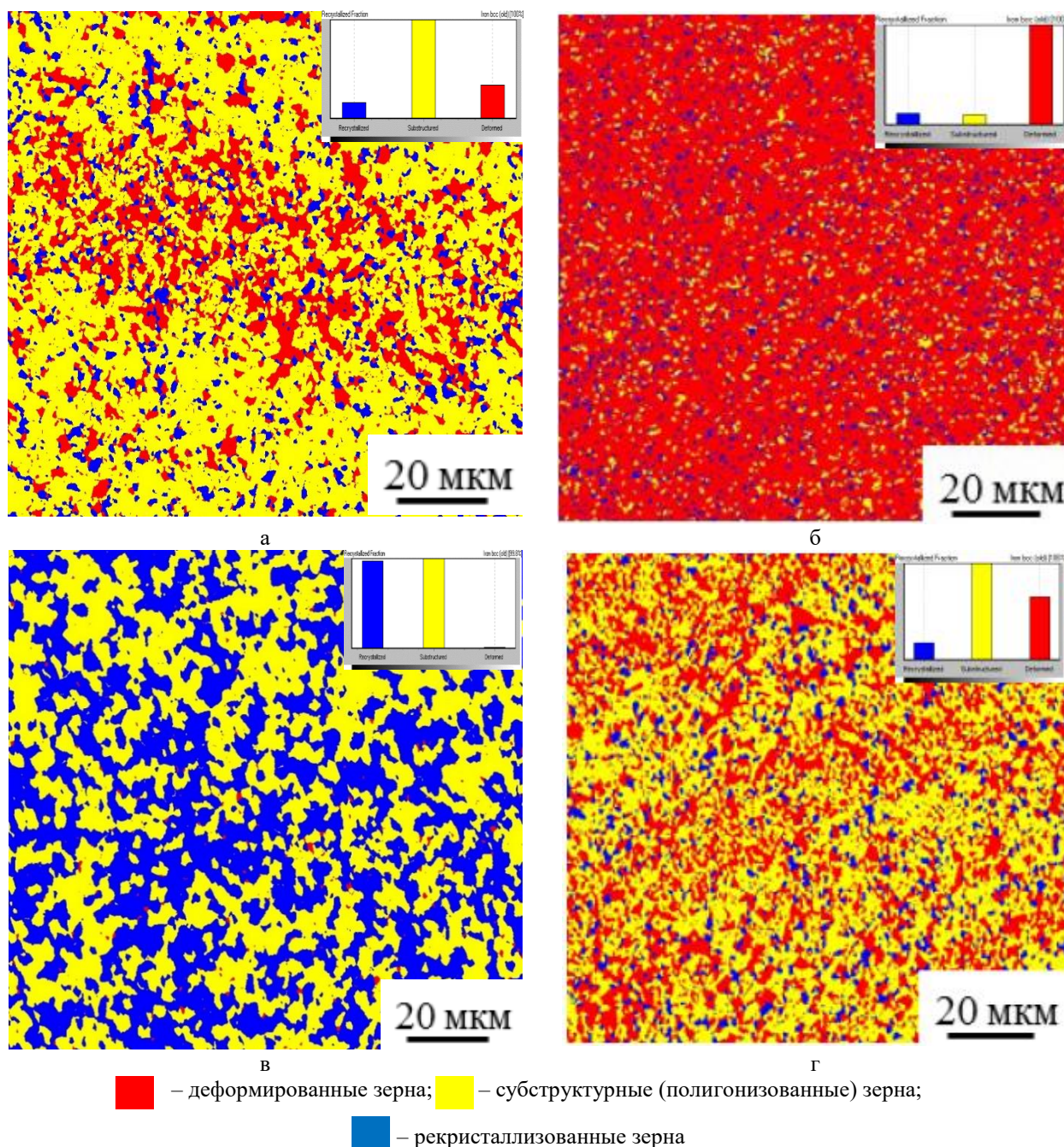


Рис. 12. Карты рекристаллизации периферийной области ЗТМВ, построенные по результатам EBSD:

а, в – сталь 32Г2; б, г – сталь 32ХГМА; а, б – исходное состояние; в, г – отпуск при 550°C

Fig.12. Recrystallization maps based on the EBSD results of the peripheral area of the TMAZ: а, в are steel 32Г2; б, г are steel 32ХГМА; а, б are initial state; в, г are tempering at 550°C

В соединении 32Г2-40ХН2МА наблюдается иной характер. Локальное разупрочнение ЗТМВ при отпуске существенно снизило количество пройденных сварным соединением циклов при всех уровнях амплитуды напряжений (рис. 13, а). Снижение предела выносливости относительно сварного соединения без

отпуска составило около 15% и около 28% относительно базовой стали 32Г2. Зарождение и развитие усталостной трещины происходило в ЗТМВ стали 32Г2 на расстоянии 1,7-2,3 мм от сварного стыка, как проиллюстрировано на рис. 14.

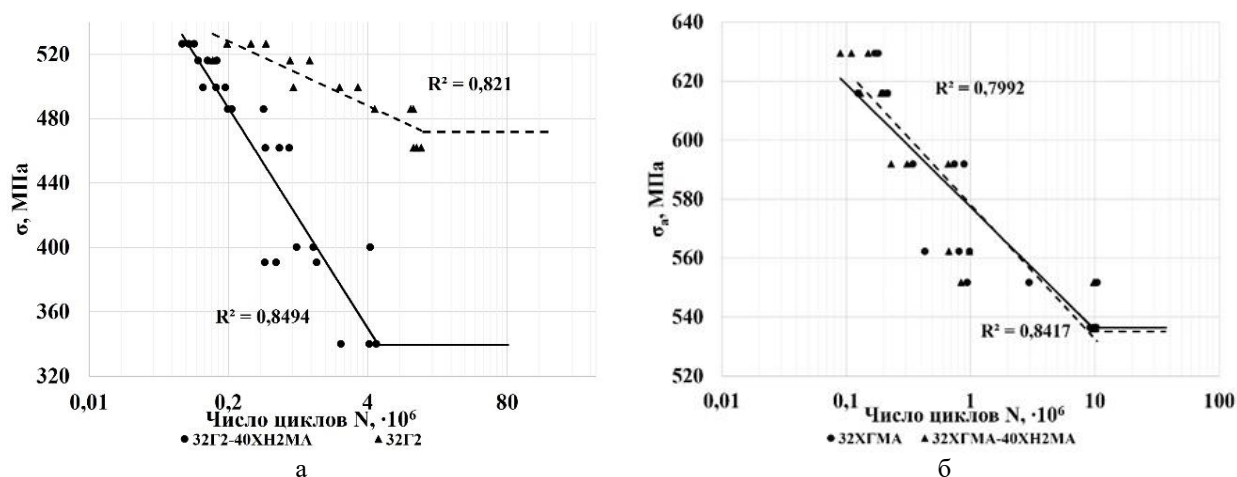


Рис. 13. Кривые усталости базовой стали тела буровой трубы и сварных соединений на ее основе после отпуска при 550°C: а – 32Г2-40ХН2МА и 32Г2; б – 32ХГМА-40ХН2МА и 32ХГМА

Fig. 13. Fatigue curves of the base steel of the drill pipe body and welded joints based on it after tempering at 550°C: a is 32G2-40KhN2MA and 32G2; б is 32KhGMA-40KhN2MA and 32KhGMA

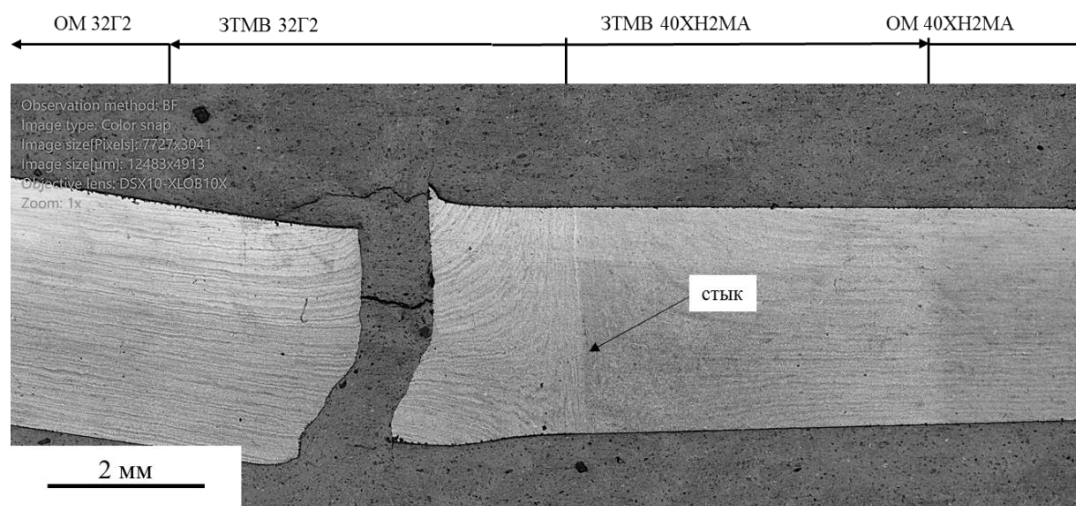


Рис. 14. Микроструктура образца со сварным соединением сталей 32Г2-40ХН2МА после отпуска при 550°C, иллюстрирующая место разрушения при многоциклового усталости

Fig. 14. Microstructure of a sample with a welded joint of 32G2-40KH2MA steels after tempering at 550°C, illustrating the point of fracture during multi-cycle fatigue

Закключение

На основании проведенных исследований усталостной прочности сварных соединений буровых труб из сталей 32Г2-40ХН2МА и 32ХГМА-40ХН2МА, полученных ротационной сваркой трением, сделаны следующие выводы:

1. Несмотря на наличие неоднородной, градиентной микроструктуры ЗТМВ, сварные соединения сталей 32ХГМА и 40ХН2МА, полученные РСТ, равнопрочны базовой стали 32ХГМА в условиях циклического нагружения как после сварки, так и после отпуска при температуре 550 °С. Предел выносливости в обоих случаях составляет 540 МПа, а место за-

рождения и развития усталостной трещины преимущественно развивается в зоне базовой стали 32ХГМА.

2. Усталостная прочность сварного соединения сталей 32Г2-40ХН2МА уступает базовой стали 32Г2 на 15% в состоянии после сварки и на 28% после отпуска. Снижение усталостной прочности обусловлено процессами локального разупрочнения микроструктуры в периферийных участках ЗТМВ, развивающимися при сварке и интенсифицирующимися при последующем отпуске. Для сварного соединения из данного сочетания сталей послесварочный отпуск оказывает негативное влияние на предел выносливости.

3. Для получения равнопрочных конструкций сварных соединений высокопрочных буровых

труб, выполненных способом РСТ, рекомендуется применение среднеуглеродистых сталей, содержащих карбидообразующие элементы, роль которых заключается в дисперсионном упрочнении периферийных участков ЗТМВ и замедлении процессов рекристаллизации при высоком отпуске сварного соединения.

Список источников

1. Технология бурения нефтяных и газовых скважин: учебник для студентов вузов. В 5 т. / под общ. ред. В. П. Овчинникова. Тюмень : ТюмГНГУ, 2014. Т. 1. 568 с.
2. Стрик Ю.Н., Ильяш В.В. Бурение разведочных скважин. Воронеж, 2004. 62 с.
3. Вилль В.И. Сварка металлов трением. М.: Машиностроение, 1970. 176 с.
4. Сварка трением: справочник / В. К. Лебедев [и др.] Л.: Машиностроение, 1987. 236 с.
5. Исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства горячекатаных труб, изготовленных из стали 32Г2 / В.В. Ивашко, О.М. Кириленко, И.И. Вегера и др. // Литье и металлургия. 2011. № 4 (63). С. 108–114.
6. Разработка и освоение материалов в производстве высокопрочных бурильных труб со специальными свойствами / Е.М. Засельский, Н.Т. Тихонцева, И.П. Савченко и др. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2021. № 2. С. 37–40.
7. Evaluation of friction welded dissimilar pipe joints between AISI 4140 and ASTM A 106 Grade B steels used in deep exploration drilling / Khadeer Sk.A., Babu P.R., Kumar B.R. and others // Journal of Manufacturing Processes. 2020, vol. 56, pp. 197–205.
8. Optimization of rotary friction welding parameters for dissimilar joints of exploration drill pipes / A. Isaeva, E.Yu. Priimak, A.S. Atamashkin and others // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023, vol. 126, no. 11–12, pp. 5325–5337. DOI: 10.1007/s00170-023-11382-5.
9. Influence of force parameters of rotary friction welding on the microstructure and mechanical properties of welded joints of high-strength drill pipes / A. Atamashkin, E. Priimak, E. Tulibaev and others // International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2024. DOI: ORG/10.1007/S12008-024-02011-W
10. Effect of Rotational Speed on Static and Fatigue Properties of Rotary Friction Welded Dissimilar AA7075/AA5083 Aluminium Alloy Joints. / A. Sasmito, M.N. Ilman; P.T. Iswanto and others // Metals 2022, 12, 99. <https://doi.org/10.3390/met12010099> Metals 2022, 12, 99. DOI: ORG/10.3390/MET12010099
11. Fatigue life prediction for rotary friction welded Ti-6Al-4V under variable amplitude fatigue loading / Van der Merwe H.B., James M.N., Hatting D.G., Rall W. // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2019, 104, pp. 1–11. DOI: ORG/10.1016/J.TAFMEC.2019.102321
12. Microstructure, Tensile Properties, and Fatigue Behavior of Linear Friction-Welded Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si / Sidharth Rajan; Priti Wanjara; Javad Gholipour; Abu Syed Kabir // Materials. 2021, 14, 30. DOI: ORG/10.3390/MA14010030
13. Paventhan R., Lakshminarayanan P.R., Balasubramanian V. Fatigue behaviour of friction welded medium carbon steel and austenitic stainless steel dissimilar joints // Materials and Design. 2011, vol. 32, pp. 1888–1894. DOI: ORG/10.1016/J.MATDES.2010.12.011

References

1. Ovchinnikov V.P. *Tekhnologiya bureniya neftyanyh i gazovykh skvazhin: uchebnik dlyz studentov vuzov* [Technology of drilling oil and gas wells: a textbook for university students]. Tyumen: Tyumen State University, 2014, vol. 1, 568 p. (In Russ.)
2. Strik Yu.N., Ilyash V.V. *Bureniye razvedochnykh skvazhin* [Drilling of exploration wells]. Voronezh, 2004, 62 p. (In Russ.)
3. Vill V.I. *Svarka metallov treniem* [Welding of metals by friction]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970, 176 p. (In Russ.)
4. Lebedev V.K. et al. *Svarka treniem: spravochnik* [Friction welding: A reference book]. Leningrad: Mashinostroenie, 1987, 236 p. (In Russ.)
5. Ivashko V.V., Kirilenko O.M., Vegera I.I. et al. Investigation of the effect of heat treatment modes on the structure and mechanical properties of hot-rolled pipes made of 32G2 steel. *Litie i metallurgiya* [Casting and Metallurgy]. 2011;(4(63)):108–114. (In Russ.)
6. Zaslenskiy E.M., Tikhontseva N.T., Savchenko I.P. et al. Development of materials in the production of high-strength drill pipes with special properties. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya* [Problems of ferrous metallurgy and materials science]. 2021;(2):37–40. (In Russ.)
7. Khadeer Sk.A., Babu P.R., Kumar B.R. et al. Evaluation of friction welded dissimilar pipe joints between AISI 4140 and ASTM A 106 Grade B steels used in deep exploration drilling. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020;56:197–205.
8. Isaeva A., Priimak E.Yu., Atamashkin A.S. et al. Optimization of rotary friction welding parameters for dissimilar joints of exploration drill pipes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;126(11–12):5325–5337. doi: 10.1007/s00170-023-11382-5.
9. Atamashkin A., Priimak E., Tulibaev E. et al. Influence of force parameters of rotary friction welding on the microstructure and mechanical properties of welded joints of high-strength drill pipes. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2024. doi: org/10.1007/s12008-024-02011-w
10. Sasmito A., Ilman M.N., Iswanto P.T. Effect of Rotational Speed on Static and Fatigue Properties of Rotary Friction Welded Dissimilar AA7075/AA5083 Aluminium Alloy Joints. *Metals*. 2022;12:99. doi:org/10.3390/met12010099
11. Van der Merwe H.B., James M.N., Hatting D.G., Rall W. Fatigue life prediction for rotary friction welded Ti-6Al-4V under variable amplitude fatigue loading. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2019;104:1–11. doi:org/10.1016/j.tafmec.2019.102321
12. Sidharth Rajan, Priti Wanjara; Javad Gholipour. Microstructure, Tensile Properties, and Fatigue Behavior of Linear Friction-Welded Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si. *Materials*. 2021;14:30. doi:org/10.3390/ma14010030

13. Paventhan R., Lakshminarayanan P.R., Balasubramanian V. Fatigue behaviour of friction welded medium carbon steel and austenitic stainless steel dissimilar joints. *Materials and Design*. 2011;32:1888-1894. doi:org/10.1016/j.matdes.2010.12.011

Поступила 23.04.2025; принята к публикации 06.05.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 23/04/2025; revised 06/05/2025; published 30/09/2025

Атамашкин Артём Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НОЦ новых материалов и перспективных технологий, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия.
Email: atamashkin2017@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3727-8738

Приймак Елена Юрьевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НОЦ новых материалов и перспективных технологий, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; заведующий лабораторией металловедения и термической обработки, АО «Завод бурового оборудования», Оренбург, Россия.
Email: elena-pijmak@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4571-2410

Исаева Анна Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры производственных технологий обработки материалов, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия; ведущий инженер-металловед, АО «Завод бурового оборудования», Оренбург, Россия.
Email: stepan4uckova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1050-3504

Тулибаев Егор Сагитович – главный конструктор, АО «Завод бурового оборудования», Оренбург, Россия; старший преподаватель кафедры механики материалов, конструкций и машин, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия.
Email: tulibaew@zbo.ru.

Сёмка Ярослав Сергеевич – аспирант кафедры производственных технологий обработки материалов, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия.
Email: semkazbo@bk.ru.

Artem S. Atamashkin – PhD (Eng.), Senior Researcher at the Research and Educational Center for New Materials and Advanced Technologies, Orenburg State University, Orenburg, Russia.
Email: atamashkin2017@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3727-8738

Elena Y. Priymak – PhD (Eng.), Senior Researcher at the Research and Educational Center for New Materials and Advanced Technologies, Orenburg State University, Orenburg, Russia; Head of the Laboratory of Metal Science and Heat Treatment, ZBO Drill Industries, Orenburg, Russia.
Email: elena-pijmak@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4571-2410

Anna V. Isaeva – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial Technologies for Materials Processing, Orenburg State University, Orenburg, Russia; Leading Metallurgical Engineer, ZBO Drill Industries, Orenburg, Russia.
Email: stepan4uckova@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1050-3504

Egor S. Tulibaev – Chief Designer, ZBO Drill Industries, Orenburg, Russia; Senior Lecturer of Department of Mechanics of Materials, Structures and Machines, Orenburg State University, Orenburg, Russia.
Email: tulibaew@zbo.ru.

Yaroslav S. Semka – Postgraduate Student of the Department of Industrial Technologies for Materials Processing, Orenburg State University, Orenburg, Russia.
Email: semkazbo@bk.ru.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 65.011:004.94
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-141-150



МЕТОДИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Мартынец Е.Р.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Внесение изменений и перепроектирование изделия, как правило, многократно увеличивает стоимость и длительность цикла разработки, а также увеличивает количество натурных испытаний и опытных образцов изделия. Так, недостаточная эффективность проектов может быть выражена в большой длительности и стоимости, в связи с чем в данном исследовании предложена методика внедрения технологии цифровых двойников в целях совершенствования процесса разработки изделий. Целью исследования выступает формирование основных этапов, целевых показателей и требований, способствующих совершенствованию процесса разработки изделий высокотехнологичной промышленности. В работе представлена практикоориентированная методика совершенствования процесса разработки изделий машиностроительных предприятий. Материалы исследования основаны как на существующем опыте отечественных и зарубежных авторов в области внедрения цифровых технологий, включая цифровые двойники, так и на научно-исследовательских проектах, реализуемых инжиниринговыми подразделениями крупнейших отечественных корпораций. Кроме того, в основу предлагаемого метода заложены основные положения национального стандарта ГОСТ Р 57700.37–2021 «Цифровые двойники изделий» и результаты применения технологии цифровых двойников в деятельности Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ (CompMechLab®). В работе представлены сформированные группы требований к процессу разработки изделий машиностроения, при этом рассмотрены целевые показатели процесса разработки, которые включают длительность, стоимость, трудоемкость, удовлетворение требованиям процесса разработки и удовлетворение требованиям технического задания. Также в работе представлен алгоритм разработки цифрового двойника изделия. Тем самым возможно достижение высокого уровня эффективности процесса разработки изделия высокотехнологичной промышленности, что обеспечит технологическое лидерство страны и национальное превосходство.

Ключевые слова: цифровой двойник, разработка, цифровые (виртуальные) испытания, моделирование, длительность, стоимость, изделие, требования, процесс

© Мартынец Е.Р., 2025

Для цитирования

Мартынец Е.Р. Методика совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 141-150. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-141-150>



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

METHODOLOGY FOR IMPROVING THE PRODUCT DEVELOPMENT PROCESS USING DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

Martynets E.R.

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia

Abstract. Making changes and redesigning a product frequently significantly increases the cost and duration of the development cycle, as well as increases the number of field tests and prototypes of the product. Thus, the insufficient effectiveness of projects can be expressed in a long duration and cost, and therefore this study suggests a methodology for implementing digital twin technology in order to improve the product development process. The purpose of the study is to form the main stages, targets and requirements that contribute to the improvement of the product development process in the high-tech industry. The paper presents the practice-oriented methodology for improving the product development process of machine-building enterprises. The research materials are based both on the existing experience of domestic and foreign authors in the field of digital technology implementation, including digital twins, and on research projects implemented by engineering divisions of the largest domestic corporations. In addition, the proposed method is based on the main provisions of the national standard GOST R 57700.37–2021 "Digital twins of products" and the results of the use of digital twins technology in the activities of SPbPU Engineering Center "Computer-Aided Engineering Center" (CompMechLab®). The paper presents the formed groups of requirements for the process of developing mechanical engineering products, while considering the target indicators of the development process, which include duration, cost, labor intensity, meeting the requirements of the development process and meeting the requirements of the terms of reference. The paper presents an algorithm for developing a digital twin of product. Thus, it is possible to achieve a high level of efficiency of the product development process in high-tech industry, which ensures the country's technological leadership and national superiority.

Keywords: digital twin, development, digital (virtual) testing, modeling, duration, cost, product, requirements, process.

For citation

Martynets E.R. Methodology for Improving the Product Development Process Using Digital Twin Technology. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 141-150. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-141-150>

Введение

Традиционный процесс разработки изделий обычно подразумевает прохождение ряда итераций (шагов), направленных на перепроектирование изделия, что вызвано внесением изменений в конструкцию по результатам натурных испытаний, в том числе вследствие неудовлетворения требований к изделию [1, 2]. Тем самым многократно увеличивается стоимость процесса разработки – требуются затраты на производство и испытания опытных образцов, оплату труда инженеров-конструкторов и инженеров-расчетчиков и пр. [3] Кроме того, значительно увеличивается длительность стадии разработки изделия, в связи с чем могут возникать переносы сроков передачи конструкторской документации в производство. Согласно существующей практике, проекты по разработке более чем в половине случаев задерживаются не менее чем на 1 год от планируемого срока [4].

Обозначенное выше свидетельствует о низкой эффективности традиционного подхода, поскольку наступают риски неудовлетворения требований к изделию, нарушения сроков и бюджета проекта, а также возникает вероятность неучета тех или иных целевых показателей, критически важных для данной конструкции и сфер применения изделия. По данной

причине, а также вследствие стремления промышленных организаций, в том числе занятых процессами инжиниринга и разработки конструкций и систем, к соответствию тенденциям цифровой трансформации экономики все большее внимание уделяется внедрению передовых цифровых и производственных технологий.

Среди отечественных авторов можно выделить труды Антипова Д.В. [5–8], Губановой О.Г. [5], Гороховой Д.А. [6, 7], Антиповой О.И. [9, 10], Хаймович И.Н. [10, 11] и других научных исследователей и ученых [12–16], посвященные анализу практик применения передовых цифровых и производственных технологий, формированию новых и совершенствованию существующих методов организации процессов разработки изделий, а также вопросам качества разрабатываемой продукции при удовлетворении требований. Значительная доля проводимых исследований в данной области приходится на вопросы внедрения автоматизированных систем проектирования (CAD, Computer-Aided Design), систем инженерного анализа (CAE, Computer-Aided Engineering) и систем управления жизненным циклом (PLM, Product Lifecycle Management). Учитывая современный уровень развития вычислительной техники и повсеместное применение

CAD-, CAE-, PLM-систем, предлагаемые методы совершенствования процессов разработки являются довольно зрелым и проработанным вопросом.

Кроме того, в ходе исследования проанализирована деятельность по выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в интересах промышленности на основе опыта и компетенций Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ (CompMechLab®), а также ряда высокотехнологичных предприятий, составляющих партнерскую сеть Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, в том числе входящих в Госкорпорацию «Ростех» и Госкорпорацию «Росатом».

Проведенный анализ методов и подходов к процессам разработки позволяет сделать вывод, что предприятиям, осуществляющим разработку и последующее производство высокотехнологичной продукции, в том числе в наукоемких и критически важных отраслях, рекомендуется анализ и реорганизация процессов, направленных на создание и выпуск изделий, за счет внедрения инновационных цифровых технологий, включая цифровые двойники, что на текущий момент составляет малую долю исследований отечественных и зарубежных авторов. В данном исследовании приведены ключевые этапы, а также целевые показатели и требования к процессам, человеческим и материально-техническим ресурсам, которые составляют основу разработанной методики совершенствования процесса разработки изделий машиностроения с применением цифровых двойников.

Академическая направленность текущего исследования подразумевает формирование типовой методики для машиностроительных предприятий, при этом особенности и специфика конкретных отраслей промышленности, а также технологических процессов может требовать адаптации методики и внесения уточнений.

Материалы и методы исследования

Предлагаемый подход учитывает тенденции к повсеместному распространению и внедрению цифровых инструментов в деятельность промышленных компаний, в том числе в управленческие, производственные и технологические процессы производства. Это будет способствовать повышению эффективности инжиниринговых и производственных систем, совершенствованию научно-методологической основы обеспечения показателей и требований к процессу разработки, разрабатываемому изделию и уровню качества.

В ходе проведения исследования были применены такие общенаучные методы, как теоретический анализ подходов к оценке и организации процессов разработки продукции, методы сравнительного анализа, методы процессного и системного подходов, методы теории алгоритмов, методы оценки эффек-

тивности освоения новой продукции, а также другие общенаучные методы.

Теоретической и научно-методологической основой исследования послужили работы российских и зарубежных ученых по использованию цифровых инструментов и внедрению методов повышения эффективности при разработке изделий предприятиями машиностроения, в том числе передовых цифровых и производственных технологий, а также нормативно-технические документы.

В 2021 году утвержден национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [17]. Значимость утверждения национального стандарта определяется его фокусировкой на создании цифровых двойников изделий высокотехнологичной промышленности, а именно машиностроения, и лежащих в основе цифрового двойника математических и компьютерных моделей, основанных на законах физики, механики и математики [3].

Согласно приведенному в национальном стандарте ГОСТ Р 57700.37–2021 определению, **цифровой двойник изделия** – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями [17]. В процессе разработки цифрового двойника изделия создается многоуровневая система требований – матрица требований, целевых показателей и ресурсных ограничений, которая обеспечивает удовлетворение требований к изделию и позволяет проанализировать взаимное влияние целевых показателей [18].

Также следует выделить основные положения технологии цифровых двойников, детальный обзор сформированных отечественных и зарубежных цепочек цифровых двойников, примеры внедрения технологии в различных отраслях промышленности и секторах экономики, приведенные в монографии «Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности», составленной коллективом авторов из Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [19].

Полученные результаты и их обсуждение

Разработка цифрового двойника изделия обеспечивает рациональное сочетание всех показателей проектируемого изделия и, как следствие, высокий уровень качества разрабатываемой продукции, а также снижение финансовых и временных ресурсов [1]. Это происходит за счет минимизации количества изменений, вносимых в конструкцию изделия при производстве и проведении испытаний опытных образцов за счет проведения множества цифровых (виртуальных) испытаний при разработке изделия с применением технологии цифровых двойников [1]. Тем самым снижается количество опытных образцов и проводимых натурных испытаний.

Достижение обозначенных выше эффектов может быть подтверждено рядом значительных примеров отечественной высокотехнологичной промышленности. В частности, технология цифровых двойников способствовала снижению длительности и стоимости процессов разработки изделий, а также повышению эффективности процессов в ряде проектов, реализованных предприятиями АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» (АО «ОДК», входит в Госкорпорацию «Ростех») [20], Госкорпорации «Росатом» [21], ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация» (ПАО «ОАК», входит в Госкорпорацию «Ростех») [22], и др. [1, 19, 23, 24]

В ходе проведенного анализа были сформированы основные требования к организации разработки изделия (рис. 1). Обозначенные требования составляют часть предлагаемой методики в разрезе ресурсной обеспеченности процесса разработки, поскольку выполнение обозначенных требований делает возможным получение заявленных эффектов от внедрения методики в процесс разработки.

Так, требования к ресурсной обеспеченности составляют 4 группы показателей:

1. Требования к материально-технической оснащенности, проектно-технологической, инженерной инфраструктуре (Hardware и Software).

1.1. Наличие актуального верифицированного и валидированного специализированного инженерного программного обеспечения, обладающего высоким уровнем адекватности.

1.2. Наличие платформенного решения (например, программно-технологической платформы в со-

ответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 [17]), обеспечивающего эффективный обмен данными, их надежное хранение и управление ими, интеграцию и взаимодействие между инженерным программным обеспечением.

1.3. Оборудованные инженерные рабочие места.

1.4. При необходимости – наличие оборудованной опытно-промышленной и испытательной площадки.

1.5. При необходимости – наличие вычислительных мощностей (высокопроизводительных вычислительных систем), центров обработки и хранения данных и др.

2. Требования к персоналу (Brainware [19]).

2.1. Мультидисциплинарная команда инженеров-конструкторов, инженеров-расчетчиков, инженеров-технологов, обладающих компетенциями в области цифрового проектирования и моделирования, знаниями системного цифрового инжиниринга [25], компетенциями разработки и эксплуатации цифровых двойников, численного моделирования, а также опытом выполнения НИР и НИОКР в данной отрасли и в разрезе областей наук (гидроаэродинамика, механика деформированного твердого тела и др.).

2.2. Административная команда, включающая системных инженеров, руководителей проектов и направлений, проектных менеджеров, обладающих компетенциями в области проектного менеджмента, знаниями в части внедрения и организации системной работы, эффективного процесса разработки систем и др.



*MBSE (Model-Based Systems Engineering) – модельно-ориентированный системный инжиниринг
КД – конструкторская документация

Рис. 1. Схема взаимосвязи требований к организации разработки изделия (источник: составлено автором)

Fig. 1. Scheme of requirements interrelation to the product development organization (source: compiled by the author)

2.3. При необходимости – команда по направлению программирования, обладающая компетенциями в обеспечении функционирования программно-инженерного стека, включая работу программно-технологической (цифровой) платформы, инженерного программного обеспечения, а также знаниями в адаптации программных средств под особенности процессов предприятия.

3. Требования к технологиям.

3.1. Возможность формирования матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений [2, 18, 19, 26, 27], содержащей основные требования к изделию, удовлетворение которых обеспечивает выполнение технического задания и требуемый уровень надежности, качества, функциональности и ресурса продукции.

3.2. Обеспечение системного подхода к разработке на основе методов и концепций модельно-ориентированного системного инжиниринга [19].

3.3. Технологии проведения цифровых (виртуальных) испытаний на основе разработанных математических и компьютерных моделей высокого уровня адекватности в соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 [17].

3.4. Технологии разработки цифровых двойников и обеспечения процессов применения цифровых двойников на всех стадиях жизненного цикла (разработки, производства, эксплуатации).

3.5. При необходимости – возможность организации процессов сбора и обработки потоков данных, поступающих от изделия при проведении натурных испытаний, технологических процессах и производственных операциях, а также процессах эксплуатации, возможность организации обратных корректирующих действий от цифрового двойника, размещенного на программно-технологической платформе, к функционирующему изделию (формирование двусторонних информационных связей между цифровым двойником и изделием с применением инструментов промышленного интернета вещей [19]).

4. Требования к документации (конструкторской, технологической, эксплуатационной, ремонтной, сертификационной) – требования могут быть сформированы отраслевыми экспертами применительно к конкретным наукоемким изделиям высокотехнологичной промышленности.

Эффективность процесса разработки в соответствии с предлагаемой методикой оценивается с позиции пяти характеристик – целевых показателей (рис. 2):

1. Длительность процесса разработки t [1].
2. Стоимость процесса разработки S [3].
3. Трудоемкость процесса разработки L .
4. Удовлетворение требованиям процесса разработки (УТР).
5. Удовлетворение требованиям технического задания (матрицы требований) (УТЗ).

В рамках методики предполагается влияние на обозначенные выше целевые показатели за счет прохождения алгоритма по разработке цифрового двойника при соблюдении требований к ресурсам. Возможность снижения *временных и финансовых затрат* в процессе разработки цифрового двойника объясняется снижением количества вносимых изменений, повышением количества цифровых (виртуальных) испытаний, снижением необходимого количества опытных образцов и проводимых натурных испытаний [3]. Снижение *стоимости* разработки изделия является одной из целевых функций цифрового двойника [3].

Длительность процесса разработки t , в свою очередь, может быть раскрыта через показатели:

M_{sim} – количество итераций (шагов), связанных с разработкой моделей и проведением цифровых (виртуальных) испытаний изделия; показатель M_{sim} отражает оптимальное количество проведенных цифровых испытаний изделия (чем больше цифровых испытаний, тем выше уровень адекватности разрабатываемых моделей и выше вероятность удовлетворения требованиям [1]) при соблюдении оптимального объема трудозатрат и стоимости организации процессов моделирования;

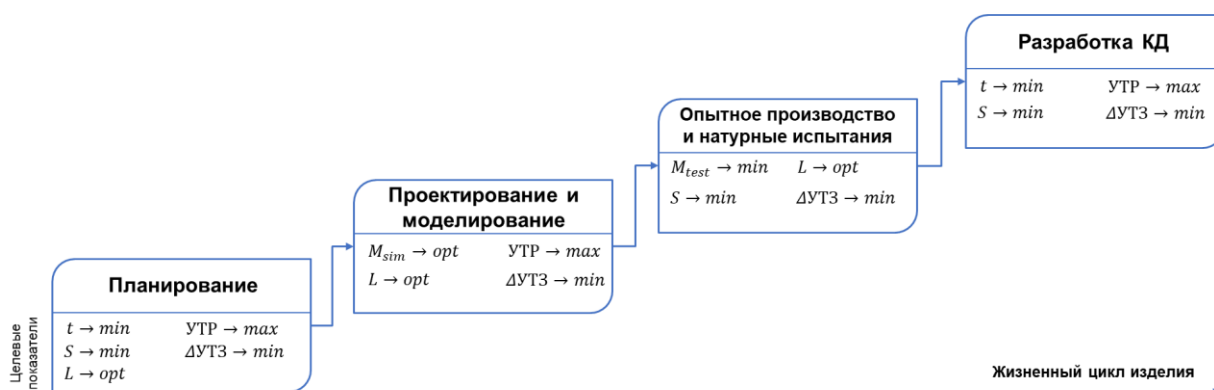


Рис. 2. Целевые показатели методики совершенствования процесса разработки изделий с применением технологии цифровых двойников (источник: составлено автором)

Fig. 2. Target indicators of the methodology for improving the product development process using digital twin technology (source: compiled by the author)

M_{test} – количество итераций (шагов), связанных с производством и испытаниями опытных образцов; показатель M_{test} отражает оптимальное количество натурных испытаний (чем больше натурных испытаний, тем выше стоимость и длительность разработки изделия и выше вероятность прохождения сертификационных и приемочных испытаний) при соблюдении оптимального объема трудозатрат, длительности и стоимости организации процессов испытаний и вывода продукции на рынок.

Трудоемкость процесса разработки напрямую влияет на эффективность разработки цифрового двойника по причине существующей тенденции, вызванной смещением ролей инженера-конструктора (К), инженера-расчетчика (Р) и инженера-технолога (Т), а также расширением роли инженеров-расчетчиков [19, 28]. Увеличение числа инженерных расчетов в процессе разработки изделия требует пересмотра кадрового ландшафта инженерных подразделений и внедрения в процесс разработки системных инженеров, в задачи которых войдет обеспечение работы инженеров в формате параллельного взаимодействия с учетом системного инжиниринга применительно к разрабатываемому изделию (формат обмена между инженерами: $K \leftrightarrow P \leftrightarrow T$) взамен традиционного подхода, когда обмен информацией происходил по итогам работы одного инженера и передаче проекта другому, что вызывало множество итераций, возврат к предыдущим стадиям и «доводку» [16] изделия до требуемых характеристик (формат обмена между инженерами: $K \rightarrow P \rightarrow T \rightarrow K \rightarrow \dots \rightarrow T$). Так, согласно статистике, более 30% рабочего времени инженера-конструктора занимает организация процесса передачи данных [29]. В связи с этим возможно внедрение платформенных решений и методов системного инжиниринга, что обеспечит бесперебойное и регулярное взаимодействие инженеров в процессе реализации проекта и позволит уменьшить время, связанное с передачей информации и возвращением на предыдущие этапы в целях «доводки» изделия.

Удовлетворение требованиям процесса разработки, в свою очередь, подразумевает как удовлетворение требованиям к организации разработки изделия с точки зрения ресурсной обеспеченности (см. **рис. 1**), так и с точки зрения обеспечения факторов конкурентоспособности предприятия, таких как соотношение «цена – качество», эффективность процессов предприятия и пр.

Удовлетворение требованиям технического задания (при разработке цифрового двойника – матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений изделия) (УТЗ) подразумевает снижение разницы между эталонным значением показателя матрицы и фактическим значением показателя матрицы, то есть проведение балансировки матрицы требований, в результате которой достигаются и удовлетворяются все требования, заявленные заказчиком,

обеспечиваются высокие показатели надежности и качества разрабатываемой продукции, а также технологичность изделия (подробнее о балансировке матрицы см. [26, 18, 27]). Кроме того, удовлетворение требованиям технического задания тесно связано с достижением высокого уровня качества изделия [2].

Таким образом, в соответствии с заявленными показателями эффективности *цель разработки цифрового двойника* в соответствии с предлагаемой методикой совершенствования процесса разработки заключается в проектировании изделия под заданную стоимость S и длительность t с учетом трудоемкости процессов разработки L и требований к процессу разработки УТР для удовлетворения требованиям к продукции УТЗ.

Реализация вышеприведенной методики в части достижения целевых показателей с учетом ресурсной обеспеченности, как было обозначено выше, возможна за счет прохождения алгоритма по разработке и применению цифрового двойника изделия [3, 30]. Сформированная группа требований к ресурсам оказывает влияние на ключевые процессы разработки изделия, которые выделены в качестве блоков разработки изделия на алгоритме разработки цифрового двойника (**рис. 3**):

0 – подготовительные процессы (как правило, проводятся со стороны заказчика и формируют исходные данные для последующих этапов);

1 – процессы планирования;

2 – процессы проектирования и моделирования, проведения цифровых (виртуальных) испытаний;

3 – процессы проведения опытного производства и натурных испытаний;

4 – процессы формирования конструкторской документации (КД) для серийного производства [30] (данный процесс неразрывно связан с предыдущими этапами и ведется параллельно с ними, при этом является результатом прохождения всех необходимых натурных испытаний, в связи с чем на алгоритме не выделен в отдельный блок).

Отдельно следует отметить, что в рамках исследования определены возможности обеспечения и повышения качества изделия в процессе разработки цифрового двойника – основные характеристики качества закладываются на этапе проектирования конструкции.

На приведенном алгоритме выделение этапов зеленым цветом демонстрирует основные процессы, за счет которых происходит влияние на достижение приведенных в методике показателей при процессах проектирования и моделирования системы и подсистем, проведения цифровых (виртуальных) испытаний, удовлетворении матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений, производстве опытных образцов и проведении натурных испытаний [30].

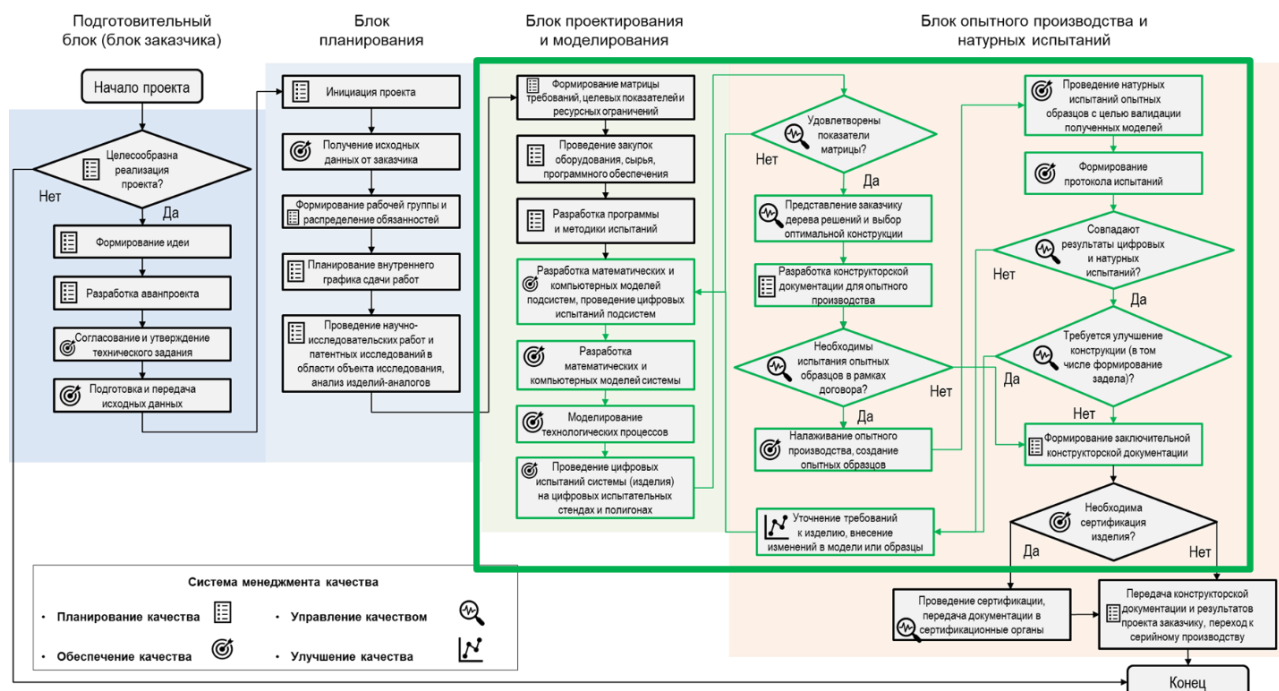


Рис. 3. Алгоритм разработки цифрового двойника изделия (источник: составлено автором [3, 30])
 Fig. 3. Algorithm for developing the digital twin of product (source: compiled by the author)

Заключение

Таким образом, в ходе исследования разработана методика совершенствования процесса разработки изделия с применением технологии цифровых двойников, которая включает соблюдение требований к ресурсной обеспеченности, достижение целевых показателей разработки изделий и прохождение этапов разработки и применения цифрового двойника, что обеспечивает практикоориентированность предлагаемой методики.

Комплексность поставленных задач определяется возможностью дальнейшего применения разработанного подхода на предприятиях различных отраслей общего машиностроения. Основным преимуществом предлагаемого подхода выступает реализация задач государственного значения, направленных на совершенствование технологического уровня промышленных предприятий и обеспечение конкурентоспособности отечественных производств. Реализация поставленных задач позволит применить технологию цифровых двойников как глобальный тренд цифровой трансформации промышленности для повышения эффективности разработки и производства высокотехнологичных изделий, что напрямую обеспечит технологический суверенитет и технологическое лидерство России, заявленное в качестве национальной цели до 2036 года (в соответствии с Указом Президента РФ от 7 мая 2024 года № 309).

Список источников

1. Мартынец Е.Р., Корниенко А.В., Левенцов В.А. Процессная модель технической подготовки производства с фокусировкой на технологии цифровых двойников // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2024. № 1. С. 72–78.
2. Мартынец Е.Р., Левенцов В.А. Факторы повышения качества наукоемкой продукции с применением передовых производственных технологий // Управление качеством продукции на основе передовых производственных технологий: сборник тезисов докладов IV Международного форума «Передовые цифровые и производственные технологии». СПб., 2023. С. 12–17.
3. Мартынец Е.Р., Левенцов В.А. Эффективность применения технологии разработки цифровых двойников в промышленности // Качество образования и устойчивое развитие – основа международного сотрудничества: материалы конференции Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в рамках программы Петербургского Международного экономического форума. СПб., 2024. С. 281–287.
4. Срывы сроков крупных проектов – кто виноват и что делать? URL: <https://pmexcellence.com/news/article/sryvy-srokov-kрупnykh-proektov-kto-vinovat-i-chto-delat/> (дата обращения: 03.01.2025).
5. Антипов Д.В., Губанова О.Г. Процессный подход в определении модели учета и анализа затрат на качество // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2023. Т. 26. № 3. С. 41–52.
6. Антипов Д.В., Горохова Д.А., Клентак А.С. Организация эффективного процесса проектирования и разработки новой продукции на основе специальных требо-

- ваний автопроизводителя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 9. С. 433–439.
7. Управление качеством проектирования и разработки новой продукции / Антипов Д.В., Горохова Д.А., Артюхов А.В., Клентак А.С. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24. № 4 (108). С. 131–136.
8. Автоматизированная система нормирования труда на предприятии / Пяткова Е.В., Тареева А.Д., Лузик А.Д., Антипов Д.В. // От качества инструментов к инструментам качества: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. Тула, 2023. С. 432–437.
9. Антипов Д.В., Антипова О.И., Еськина Е.В. Экспресс-программа повышения производительности труда в производстве // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 11. С. 542–551.
10. Управление качеством конструкторско-технологической подготовки производства с использованием базовой концептуальной модели данных / Антипова О.И., Хаймович И.Н., Чекмарев А.Н., Чурилин С.В. // Вестник Самарского муниципального института управления. 2020. № 1. С. 7–19.
11. Основные элементы проектного управления и предпроектного анализа бизнес-процесса запуска нового изделия в производство / Черкасов К.Ю., Хаймович И.Н., Булатов А.А., Агаповичева Я.А. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26. № 2 (118). С. 63–69.
12. Буткевич Р.В., Клочков Ю.С. Особенности применения экспертного метода оценивания продукции на различных этапах жизненного цикла продукции // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: сборник статей 79-й всероссийской научно-технической конференции. Самара, 2022. С. 1162–1169.
13. Grieves M. Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins // Complex Systems Engineering: Theory and Practice. 2019. С. 175–200.
14. Grieves M. Intelligent digital twins and the development and management of complex systems // Digital Twin. 2022. № 2:8. С. 1–18.
15. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication: White Paper. 2014.
16. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Агеев А.Б. Разработка и применение цифровых двойников в судостроении и кораблестроении // МОРИНТЕХ-ПРАКТИК – Информационные технологии в судостроении-2019: сб. тр. XX междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2019. С. 9–14.
17. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 10 с.
18. Мартынец Е.Р., Корниенко А.В., Левенцов В.А. Универсальная матрица требований, целевых показателей и ресурсных ограничений при проектировании наукоемкого производства // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. СПб., 2022. С. 111–119.
19. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: монография / Боровков А.И., Рябов Ю.А., Щербина Л.А., Мартынец Е.Р. и др.; ред. Боровков А.И. СПб.: Политех-пресс, 2022. 492 с.
20. ОДК завершает работу над созданием цифрового двойника морского газотурбинного двигателя. URL: <https://www.uecrus.com/press/odk-zavershaet-rabotu-nad-sozdaniem-tsifrovogo-dvoynika-morskogo-gazoturbinnogo-dvigatelya/> (дата обращения: 03.01.2025).
21. На предприятии научного дивизиона Росатома созданы цифровые двойники устройств для радиационных испытаний. URL: <https://rosatom-energy.ru/media/rosatom-news/na-predpriyatii-nauchnogo-divizionna-rosatoma-sozdali-tsifrovye-dvoyniki-ustroystv-dlya-radiatsionnykh/> (дата обращения: 03.01.2025).
22. Цифровое проектирование: как создаются «безбумажные» самолеты. URL: <https://roste.ru/media/news/tsifrovoe-proektirovanie-kak-sozdayutsya-bezbumazhnye-samolety-/> (дата обращения: 03.01.2025).
23. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 4 / Боровков А.И., Ефимов-Сойни Н.К., Мартынец Е.Р. и др. // САПР и графика. 2024. № 5. С. 4–12.
24. Цифровая платформа по разработке и применению цифровых двойников «Digital Twins» CML-Bench®. Часть 5 / Боровков А.И., Чишко С.Д., Мартынец Е.Р. и др. // САПР и графика. 2024. № 7. С. 4–16.
25. Математическое моделирование как основа цифрового инжиниринга / Болдырев Ю.Я., Левенцов В.А., Мартынец Е.Р., Щербина Л.А. // Цифровой инжиниринг: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. СПб., 2024. С. 13–20.
26. Корниенко А.В., Левенцов В.А. Математическая модель уравнивания матрицы целевых показателей и ресурсных ограничений при использовании технологии «цифровых двойников» на наукоемких производствах // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. СПб., 2021. С. 63–69.
27. Корниенко А.В., Мартынец Е.Р., Левенцов В.А. Совершенствование наукоемкого производства с использованием системы комплексных технологических решений // Передовые производственные технологии: компьютерные (суперкомпьютерные) технологии и организация наукоемких производств: сборник тезисов докладов Национальной научно-практической конференции с международным участием. СПб., 2022. С. 22–29.
28. Barthenheier K. Simulation Process and Data Management: Presentation for Global Product Data Interoperability Summit. Boeing Management Company, 2014. URL: <http://gpdisonline.com/wp-content/uploads/past->

presentations/PLM_73_Boeing-Barthenheier-SPDM.pdf (дата обращения: 28.12.2024).

29. ЛАНИТ на конференции DATADVANCE 2024 – Ведомости. URL: https://www.vedomosti.ru/press_releases/2024/12/03/lanit-na-konferentsii-datadvance-2024 (дата обращения: 03.01.2025).
30. Мартынец Е.Р., Корниенко А.В., Левенцов В.А. Цифровые двойники изделий как инструмент обеспечения качества на стадии разработки // Управление инновациями в условиях цифровой трансформации : сборник научных трудов III Всероссийской студенческой учебно-научной конференции, Санкт-Петербург, 12–13 апреля 2024 года. СПб., 2024. С. 286–290.

References

1. Martynets E.R., Kornienko A.V., Leventsov V.A. A process model of technical pre-production with a focus on digital twin technology. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna. Seriya 4: Promyshlennye tekhnologii* [Bulletin of the St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies], 2024;(1):72–78. (In Russ.)
2. Martynets E.R., Leventsov V.A. Factors for improving the quality of high-tech products using advanced manufacturing technologies. *Upravlenie kachestvom produktii na osnove peredovykh proizvodstvennykh tekhnologii: sbornik tezisev dokladov IV Mezhdunarodnogo foruma «Peredovye tsifrovye i proizvodstvennye tekhnologii»* [Product quality management based on advanced manufacturing technologies. Proceedings of the IV International Forum on Advanced Digital and Manufacturing Technologies]. St. Petersburg, 2023, pp. 12–17. (In Russ.)
3. Martynets E.R., Leventsov V.A. The efficiency of digital twin development technology in industry. *Kachestvo obrazovaniya i ustoychivoe razvitiye – osnova mezhdunarodnogo sotrudnichestva: Materialy konferentsii Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta Petra Velikogo v ramkah programmy Peterburgskogo Mezhdunarodnogo ekonomicheskogo foruma* [Quality of education and sustainable development are the basis of international cooperation. Proceedings of the conference of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University within the framework of the program of the Petersburg International Economic Forum]. St. Petersburg, 2024, pp. 281–287. (In Russ.)
4. Sryvyi srokov krupnykh proektov – kto vinovat i chto delat? [Deadlines for major projects – who is to blame and what to do?]. Available at: <https://pmexcellence.com/news/article/sryvyi-srokov-krupnykh-proektov-kto-vinovat-i-cto-delat/> (Accessed January 3, 2025).
5. Antipov D.V., Gubanov O.G. The process approach in defining the accounting model and quality cost analysis. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of IzhSTU named after M.T. Kalashnikov], 2023;26(3):41–52. (In Russ.)
6. Antipov D.V., Gorohova D.A., Klentak A.S. Organization of an effective process of designing and developing new products based on the special requirements of the automaker. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2022;9:433–439. (In Russ.)
7. Antipov D.V., Gorohova D.A., Artyuhov A.V., Klentak A.S. Quality management of design and development of new products. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2022;24(4(108)):131–136. (In Russ.)
8. Pyatkova E.V., Tareeva A.D., Luzik A.D., Antipov D.V. Automated labor rationing system at the enterprise. *Ot kachestva instrumentov k instrumentam kachestva: Sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [From the quality of tools to quality tools. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Tula, 2023, pp. 432–437. (In Russ.)
9. Antipov D.V., Antipova O.I., Eskina E.V. Express program for increasing labor productivity in manufacturing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences], 2021;(11):542–551. (In Russ.)
10. Antipova O.I., Khaymovich I.N., Chekmarev A.N., Churilin S.V. Quality management of design and technological preparation of manufacturing using the basic conceptual data model. *Vestnik Samarskogo munitsipalnogo instituta upravleniya* [Bulletin of the Samara Municipal Institute of Management], 2020;(1):7–19. (In Russ.)
11. Cherkasov K.Yu., Khaymovich I.N., Bulatov A.A., Agapovicheva Ya.A. Basic elements of project management and pre-project analysis of the business process of launching a new product into manufacturing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2024;26(2(118)):63–69. (In Russ.)
12. Butkevich R.V., Klochkov Yu.S. Features of the application of the expert method of product evaluation at various stages of the product life cycle. *Traditsii i innovatsii v stroitelstve i arhitekture. Stroitelstvo i stroitelnye tekhnologii: Sbornik statey 79-oy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Traditions and innovations in construction and architecture. Construction and construction technologies. Proceedings of the 79th All-Russian Scientific and Technical Conference]. Samara, 2022, pp. 1162–1169. (In Russ.)
13. Grieves M. *Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins. Complex Systems Engineering: Theory and Practice*. 2019:175–200.
14. Grieves M. Intelligent digital twins and the development and management of complex systems. *Digital Twin*. 2022;2:8:1–18.
15. Grieves M. *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication: White Paper*. 2014.
16. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Ageev A.B. Development and application of digital twins in shipbuilding. *MORINTEH-PRAKTIK – Informatsionnye tekhnologii v sudostroyeniye-2019* [MORINTECH-PRAKTIK - Information technologies in shipbuilding-2019]. St. Petersburg, 2019, pp. 9–14. (In Russ.)
17. State standard GOST R 57700.37-2021. Computer models and modeling. Digital twins of products. General provisions. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021, 10 p. (In Russ.)

18. Martynets E.R., Kornienko A.V., Leventsov V.A. Universal matrix of requirements, target indicators and resource constraints in the design of high-tech manufacturing. *Peredovye proizvodstvennye tekhnologii: kompyuternye (superkompyuternye) tekhnologii i organizatsiya naukoemkikh proizvodstv: Sbornik tezisev dokladov Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Advanced manufacturing technologies: computer (supercomputer) technologies and the organization of high-tech industries. Proceedings of the National Scientific and Practical Conference with international participation]. St. Petersburg, 2022, pp. 111-119. (In Russ.)
19. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Shcherbina L.A., Martynets E.R. et al. *Tsifrovye dvoyniki v vysokotekhnologichnoy promyshlennosti: monografiya* [Digital twins in the high-tech industry: monograph]. St. Petersburg: POLITEH-PRESS, 2022, 492 p. (In Russ.)
20. ODK zavershaet rabotu nad sozdaniem tsifrovogo dvoynika morskogo gazoturbinnogo dvigatelya [UEC is completing work on the creation of a digital twin of an offshore gas turbine engine]. Available at: <https://www.uecrus.com/press/odk-zavershaet-rabotu-nad-sozdaniem-tsifrovogo-dvoynika-morskogo-gazoturbinnogo-dvigatelya/> (Accessed January 3, 2025).
21. Na predpriyatii nauchnogo diviziona Rosatoma sozdany tsifrovye dvoyniki ustroystv dlya radiatsionnykh ispytaniy [Digital twins of devices for radiation testing have been created at the enterprise of the Rosatom scientific division]. Available at: <https://rosatom-energy.ru/media/rosatom-news/na-predpriyatii-nauchnogo-diviziona-rosatoma-sozdali-tsifrovye-dvoyniki-ustroystv-dlya-radiatsionnykh/> (Accessed January 3, 2025).
22. *Tsifrovoe proektirovanie: kak sozdayutsya «bezbumazhnye» samolety* [Digital design: how paperless airplanes are created]. Available at: <https://rostec.ru/media/news/tsifrovoe-proektirovanie-kak-sozdayutsya-bezbumazhnye-samolety/> (Accessed January 3, 2025).
23. Borovkov A.I., Efimov-Soyni N.K., Martynets E.R. et al. Digital platform for the development and application of digital twins "Digital Twins" CML-Bench®. Part 4. *SAPR i grafika* [CAD and graphics], 2024;(5):4-12. (In Russ.)
24. Borovkov A.I., Chishko S.D., Martynets E.R. et al. Digital platform for the development and application of digital twins "Digital Twins" CML-Bench®. Part 5. *SAPR i grafika* [CAD and graphics], 2024;(7):4-16. (In Russ.)
25. Boldyrev Yu.Ya., Leventsov V.A., Martynets E.R., Shcherbina L.A. Mathematical modeling as the basis of digital engineering. *Tsifrovoy inzhiniring: kompyuternye (superkompyuternye) tekhnologii i organizatsiya naukoemkikh proizvodstv: sbornik tezisev dokladov Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Digital engineering: computer (supercomputer) technologies and the organization of high-tech industries. Proceedings of the National Scientific and Practical Conference with international participation]. St. Petersburg, 2024, pp. 13-20. (In Russ.)
26. Kornienko A.V., Leventsov V.A. Mathematical model of balancing a matrix of target indicators and resource constraints when using "digital twins" technology in high-tech industries. *Peredovye proizvodstvennye tekhnologii: kompyuternye (superkompyuternye) tekhnologii i organizatsiya naukoemkikh proizvodstv: Sbornik tezisev dokladov Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Advanced manufacturing technologies: computer (supercomputer) technologies and the organization of high-tech industries. Proceedings of the National Scientific and Practical Conference with international participation]. St. Petersburg, 2021, pp. 63-69. (In Russ.)
27. Kornienko A.V., Martynets E.R., Leventsov V.A. Improvement of high-tech manufacturing using a system of integrated technological solutions. *Peredovye proizvodstvennye tekhnologii: kompyuternye (superkompyuternye) tekhnologii i organizatsiya naukoemkikh proizvodstv: Sbornik tezisev dokladov Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Advanced manufacturing technologies: computer (supercomputer) technologies and the organization of high-tech industries. Proceedings of the National Scientific and Practical Conference with international participation]. St. Petersburg, 2022, pp. 22-29. (In Russ.)
28. Barthenheier K. Simulation Process and Data Management: Presentation for Global Product Data Interoperability Summit. Boeing Management Company, 2014. Available at: http://gpdisonline.com/wp-content/uploads/past-presentations/PLM_73_Boeing-Barthenheier-SPDM.pdf (Accessed December 28, 2024).
29. LANIT na konferentsii DATADVANCE 2024 – Vedomosti [LANIT at the DATADVANCE 2024 conference – Vedomosti]. Available at: https://www.vedomosti.ru/press_releases/2024/12/03/lanit-na-konferentsii-datadvance-2024 (Accessed December 28, 2024).
30. Martynets E.R., Kornienko A.V., Leventsov V.A. Digital twins of products as a quality assurance tool at the development stage. *Upravlenie innovatsiyami v usloviyakh tsifrovoy transformatsii: sbornik nauchnykh trudov III Vserossiyskoy studencheskoy uchebno-nauchnoy konferentsii* [Innovation management in digital transformation. Proceedings of the III All-Russian Student Educational and Scientific Conference]. St. Petersburg, 2024, pp. 286-290. (In Russ.)

Поступила 05.01.2025; принята к публикации 06.02.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 05/01/2025; revised 06/02/2025; published 30/09/2025

Мартынец Екатерина Романовна – аспирант, младший научный сотрудник, ведущий специалист, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.
Email: katya_martynets@inbox.ru. ORCID 0000-0001-8796-0917

Ekaterina R. Martynets – Postgraduate Student, Junior Researcher, Lead Specialist, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia.
Email: katya_martynets@inbox.ru. ORCID 0000-0001-8796-0917

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 66 (091)
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-151-158



ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛАТИНА

Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Шувалова М.М., Репина А.А., Лизогуб В.А., Шибеева А.С.

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

Аннотация. В данной работе приведены технологические решения по синтезу биоразлагаемых органических полимеров на основе желатина и глицерина. Представлен анализ существующих категорий полимерных материалов. Разработана методика синтеза биоразлагаемой композиции экополимера на основе природной матрицы. Основа матрицы синтезируемого биополимера включала два основных компонента: желатин и глицерин в различных модельных соотношениях. Представлены результаты исследования по установлению влияния компонентного состава матрицы и технологических параметров синтеза на эксплуатационные свойства готового продукта. Исследована возможность повышения эксплуатационных характеристик готового продукта за счет введения в матрицу биокомпозита моделирующих добавок, направленных на упрочнение межмолекулярных связей полимерной структуры. Дана сравнительная характеристика основных эксплуатационных свойств синтезируемых образцов природного биополимера в сравнении с аналоговыми образцами синтетических полимерных материалов на основе полиэтилена и полипропилена. По итогам полученных данных сформулированы основные преимущества биоразлагаемых природных композитов и синтетических материалов. Отмечено что, синтетические полимерные композиции на основе полиэтилена и полипропилена по основным прочностным показателям в большей или меньшей степени превосходят природные экокомпозиты на основе желатина и глицерина, однако экологичность и безопасность эксплуатации разработанной матрицы экополимера является перспективным базисом для дальнейших исследований. Представлены результаты кинетики процесса биоразложения синтезированных образцов экополимера в почве. Сформулированы выводы о возможности эффективного применения синтезированных образцов экополимера в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: биоразлагаемые экополимеры, желатин, глицерин, модифицирующие добавки, прочностные свойства, деструкция

© Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Шувалова М.М., Репина А.А., Лизогуб В.А., Шибеева А.С., 2025

Для цитирования

Технология синтеза биоразлагаемых полимерных материалов на основе желатина / Мишурина О.А., Муллина Э.Р., Шувалова М.М., Репина А.А., Лизогуб В.А., Шибеева А.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 151-158. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-151-158>



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

TECHNOLOGY OF SYNTHESIS OF BIODEGRADABLE POLYMER MATERIALS BASED ON GELATIN

Mishurina O.A., Mullina E.R., Shuvalova M.M., Repina A.A., Lizogub V.A., Shibaeva A.S.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. This paper presents technological solutions for the synthesis of biodegradable organic polymers based on gelatin and glycerin. An analysis of existing categories of polymeric materials is presented. A method for synthesizing a biodegradable polymer composition based on a natural matrix is developed. The matrix base of the synthesized biopolymer included two main components: gelatin and glycerin in various model ratios. The results of the study on establishing the influence of the component composition of the matrix and technological parameters of synthesis on the operational properties of the finished product are presented. The possibility of increasing the operational characteristics of the finished product by introducing modeling additives into the biocomposite matrix aimed at strengthening the intermolecular bonds of the polymer structure is investigated. A comparative characteristic of the main operational properties of the synthesized samples of natural biopolymers is given in comparison with analogous samples of synthetic polymeric materials based on polyethylene and polypropylene. Based on the results of the data obtained, the main advantages of biodegradable natural composites and synthetic materials are formulated. It is noted that synthetic polymer composites based on polyethylene and polypropylene are superior to natural eco-composites based on gelatin and glycerin to a greater or lesser extent in terms of their main strength indicators, however, the environmental friendliness and safety of operation of the developed eco-polymer matrix is a promising basis for further research. The results of the kinetics of the biodegradation process of the synthesized polymer samples in the soil are presented. Conclusions are formulated about the possibility of effective application of the synthesized ecopolymer samples in various industries.

Keywords: biodegradable polymers, gelatin, glycerin, modifying additives, strength properties, destructio

For citation

Mishurina O.A., Mullina E.R., Shuvalova M.M., Repina A.A., Lizogub V.A., Shibaeva A.S. Technology of Synthesis of Biodegradable Polymer Materials Based on Gelatin. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 151-158. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-151-158>

Введение

В настоящее время трудно представить себе привычный образ жизни современного человека без использования различных полимерных материалов. При этом следует отметить ярко выраженную тенденцию неуклонного роста их производства, что связано с высокими темпами их всеобщего потребления. Так, мировое производство синтетических пластмасс в настоящее время уже достигло 150 млн т в год и продолжает расти [1].

По классическим технологическим схемам современные пластики синтезируются преимущественно из искусственных полимерных материалов, структурные элементы которых не встречаются в природной экосистеме, следовательно, в условиях окружающей среды они не могут самопроизвольно подвергаться биодеструкции. Как следствие, основной нарастающей проблемой гиперпотребления синтетических материалов является их химическая устойчивость к различным факторам окружающей среды (температура, свет, влажность, наличие окислителей и др.), позволяющая оставаться нетронутыми в течение многих десятилетий [2]. Только в России объемы полимерных отходов уже составляют около

75 тыс. т в год, и при этом только от 3 до 10% подвергаются вторичной переработке [3].

Данные аспекты указывают на актуальность проведения исследований в области разработки инновационных экополимерных композитов, включающих в базисной матрице природные полимеры, позволяющие встраиваться в экосистему без урона окружающей среде и при этом по своим потребительским свойствам не уступающие обычным пластикам и пленкам. К данной категории полимерных материалов относятся биоразлагаемые полимеры. Биополимеры – это полимеры, которые могут самопроизвольно разрушаться под действием факторов внешней среды, при этом не нанося вред экосистеме.

В условиях эксперимента структура матрицы композита биополимера разрабатывалась на основании взаимосвязи между физико-химическими особенностями молекулярной структуры биополимера, а также его химическими свойствами и естественными процессами окружающей экосистемы.

Процессы природной биодеструкции синтезируемого экополимера обусловлены, прежде всего, действием микроорганизмов в аэробных и анаэробных условиях, конечными продуктами распада которых являются диоксид углерода, метан, вода и различные

неорганические соединения. Конечные продукты биораспада исследуемых полимерных композитов являются питательной средой для микроорганизмов. Под действием ферментативного катализа протекают химические процессы, в результате которых структурированные полимерные цепи расщепляются на продукты биотического разложения, и в большинстве случаев являются экзотермическими. Суммарно образующиеся в результате биодеструкции биохимические продукты нетоксичны и являются составной частью окружающей биосистемы [4-6].

На кинетику процесса биодеструкции экополимера в условиях окружающей среды оказывают влияние следующие параметры системы: базовая матрица полимера, ферменты, участвующие в химических реакциях, и условия протекания биохимических процессов. В итоге суммарно все реакции природной биодеструкции полимера можно разделить на два основных типа: реакции, основанные на окислительно-восстановительных процессах, и реакции, основывающиеся на процессах гидролиза (в различных средах). Оба процесса могут протекать как одновременно, так и последовательно, поэтапно.

Признаки биодеструкции полимерных материалов отмечаются, прежде всего, по ухудшению основных характеристик эксплуатационных свойств полимера. Такие процессы могут объясняться частичным разрушением длины полимерных цепочек, которые напрямую определяют прочностные характеристики полимера. Укорачивание полимерных звеньев приводит к потере физико-механических характеристик (прочности, предела прочности при разрыве, предела прочности при изгибе и др.).

Следующим этапом процесса биодеструкции экополимера является аккумуляция продуктов расщепления полимера микроорганизмами. Данная стадия биораспада является лимитирующей, так как фрагменты деструкции полимера синтезируются в конечные минеральные продукты под действием микроорганизмов [7]. Таким образом, суммарные процессы биодеструкции природного полимера абсолютно безвредны для окружающей среды.

Синтезируемая из биопластика одноразовая посуда и другая потребительская продукция полностью безопасна для здоровья человека. Для данной категории материалов характерна прежде всего высокая биологическая совместимость с организмом человека, благодаря чему они наиболее востребованы в косметологии, медицине и пищевой промышленности [8]. Актуальность использования биопластика обусловлена также тем, что он может изготавливаться не только из ископаемого сырья, запасы которого ограничены, но и из возобновляемых материалов (например, из полимолочной кислоты, капролактона, модифицированного крахмала, целлюлозы, хитина, хитозана и других углеводов) [9]. В связи с этим необходимо разрабатывать и внедрять экологически безопасные материалы, кото-

рые смогут заменить доминирующую долю синтетического пластика.

Биоразлагаемые полимеры изготавливались из растительных материалов, таких как кукуруза, картофельный крахмал, пшеница и сахарный тростник, начиная с 1960-х годов. Однако затраты на производство были слишком высокими, тогда как качество полимера – далеко неудовлетворительным. В 1980-х годах в США, Италии и Германии на рынке упаковки появились первые биоразлагаемые полимеры, сочетающие крахмал и различные синтетические смолы. Они сохранили характеристики синтетических материалов, но приобрели способность разлагаться естественным образом под воздействием природных компонентов. Толчком к развитию этого материала послужили нефтяные потрясения 1970-х годов, которые привели к росту цен на традиционное полимерное сырье [10]. Актуальность и востребованность биоразлагаемых материалов также обусловлены ресурсо-воспроизводящим аспектом, а именно данная категория полимеров синтезируется преимущественно из природных, а следовательно, возобновляемых ресурсов, таких как модифицированные формы крахмала, целлюлоза, хитин, хитозан, желатин и другие органические соединения. Современные тенденции указывают на значительное увеличение объемов производства биополимеров, что позволяет сделать вывод – данный сегмент производства полимерных материалов имеет значительный потенциал для освоения и коммерциализации.

Цель представленной работы состояла в разработке технологии синтеза биоразлагаемой композиции экополимера со стабильными эксплуатационными качествами.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Рассмотреть существующие категории полимерных материалов.
2. Разработать методику синтеза биоразлагаемой композиции экополимера на основе природной матрицы.
3. Исследовать влияние компонентного состава матрицы полимера и технологических параметров синтеза на эксплуатационные свойства готового продукта.
4. Оценить параметр биоразлагаемости синтезированных образцов биополимера в почвенной среде.

Основа матрицы синтезируемого биополимера включала два основных компонента: желатин и глицерин в различных модельных соотношениях.

Использование желатина в базисной матрице синтезируемого биополимера обусловлено его высокой способностью к образованию устойчивой лиофильной коллоидной системы при стандартных условиях, что обеспечивает высокую связывающую и упрочняющую составляющую в структуре полимера. Данные параметры компонента напрямую обусловлены особенностями строения и химической природы

желатина. Желатин является основным продуктом переработки коллагена, поэтому по аминокислотному и элементарному составу желатин очень близок к коллагену [11]. Основными потребительскими свойствами желатина является высокая вязкость диспергированных растворов, стабильность гелеобразной структуры коллоида, температура плавления и застудневания, измеренные при стандартных условиях. Актуальность его эффективного использования в базисной структуре биополимера обусловлена прежде всего его устойчивыми гелеобразующими свойствами. Оптимальная пропорция растворения желатина в воде в заявляемом решении равна 1:10.

Глицерин в составе базисной матрицы полимера использовался в качестве пластифицирующего агента пленки полимера. Его процентный состав в основе биополимера напрямую определял пластичность и гибкость синтезируемых пленок. В процессе исследований было отмечено, что при его недостатке в образцах пленки наблюдается значительное снижение параметров ее растяжимости, а при сгибах отмечается растрескивание по линии перегиба. Однако при избытке глицерина пленки плохо подвергаются процессу отвердевания, что не дает возможности формирования устойчивой гидрофобной поверхности материала.

Для «прошивки» пленочной структуры базисной матрицы полимера в работе использовали фермент трансклутаминазы в сочетании с молочной сывороткой. Данный модификатор характеризуется уникальными свойствами, направленными на эффективное «сшивание» пленок на основе природных компонентов, таких как хитозан, хитин, глицерин и желатин. Такая химическая особенность фермента трансклутаминазы обусловлена, прежде всего, образованием прочных ковалентных связей между свободными аминокислотными и гамма-карбоксамидными группами, способствуя внутри- и межмолекулярному перекрестному «сшиванию» белковых молекул [9, 12]. Установлено, что оптимальные упрочняющие свойства фермента трансклутаминазы достигаются при условии сочетания его с молочной сывороткой в соотношении 1:4. Отмечено, что при увеличении концентрации фермента трансклутаминазы по отношению к спутниковому компоненту – молочной сыво-

ротке отмечается увеличение прочностных показателей пленок, однако усиливается ломкость материала при перегибах, даже при увеличении количества пластификатора (глицерина). Кроме того, известно, что пленки, в состав которых входит фермент трансклутаминазы, характеризуются высокими антибактериальными свойствами [13, 14].

Методика синтеза

Желатин растворяют в воде в порционном соотношении 1:10 при температуре не выше 60°C. Образовавшуюся дисперсную систему оставляют набухать в течение 40 мин. Затем полученный однородный коллоидный раствор при интенсивном перемешивании смешивают с глицерином и далее вводят фермент трансклутаминазы с молочной сывороткой (взятой в исходном соотношении 1:4).

При роспуске желатина необходимо особо тщательно контролировать рабочий температурный режим коллоидной суспензии – смесь не должна закипеть или образоваться густая белая пена. В случае отклонения от заданных температурных параметров наблюдается стойкое формирование дефектов на готовой пленке в виде пузырей (рис. 1).

Процесс ферментативного «сшивания» основных компонентов базисной матрицы полимера протекает с очень высокой скоростью, поэтому после введения трансклутаминазы в суспендированную массу полимерного композита необходимо тщательное перемешивание формирующегося состава в течение 2 мин при температуре не менее 45°C и не более 50°C – данный диапазон является оптимальным для упрочняющего действия трансклутаминазы.

Формируем образцы полимерной пленки. Для этого готовую суспендированную массу полимера переносили в плоскодонные заготовки. Количество композита для каждого образца отливки варьировалось в зависимости от заданного параметра толщины пленки полимера.

Процесс отверждения пленкообразующего композита при 20–25°C протекал в течение 8–9 ч (в зависимости от формируемой толщины пленки). При увеличении температурного режима до 30°C – в течение 4–5 ч.

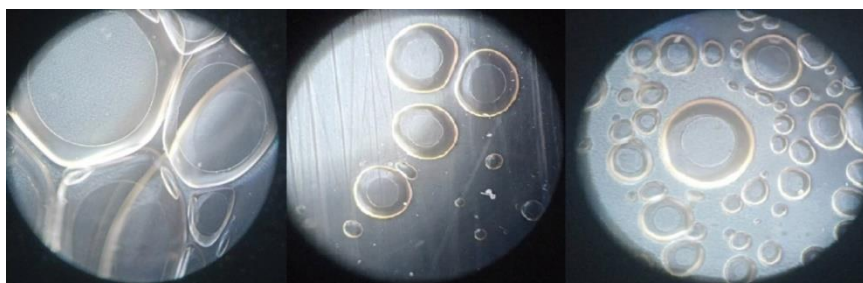


Рис. 1. Возможные дефекты на готовой пленке при нарушении температурного режима
Fig. 1. Possible defects on the finished film in case of violation of the temperature regime

По результатам эксперимента были получены однородные прозрачные образцы пленки, характеризующиеся хорошей гибкостью и прочностью. Кроме того, следует отметить что, базовый композиционный состав полимера не имеет запаха, а также может принимать различные формы в зависимости от формы сосуда, в который заливают раствор.

Материалы и оборудование

Для диспергирования суспендированных растворов использовали электромешалку VEB MLW ER-10 с различным диапазоном скоростей (в зависимости от вязкости растворов). Для нагревания и поддержания стабильной температуры дисперсной системы базисной матрицы полимера использовалась водяная баня БКЛИМ.

Для повышения температуры дисперсии устанавливали температурный режим III, после доведения реакционной системы до заданного температурного интервала температуры 50–60°C переключали водяную баню на температурный режим I и далее поддерживали постоянную температуру.

Для определения прочностных свойств уже готовой биоразлагаемой полимерной пленки использовали испытательную машину ИП 5158 – 0,5, которая определяет деформационные и прочностные характеристики полимерных материалов. Оборудование может определить прочность при растяжении и разрыве полимерной пленки, а также относительное удлинение при максимальной нагрузке и разрыве.

Полученные результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования по установлению оптимального количественного соотношения основных компонентов базисного состава биополимера проводили на различных модельных составах. Основные соотношения базисных компонентов, используемые при отработке основных технологических параметров синтеза, приведены в **таблице**.

Полученные результаты влияния различных модификаций базисного состава матрицы биополимера на прочностные характеристики готовых образцов пленки представлены на **рис. 2**.

Кроме того, представлен сравнительный анализ эксплуатационных характеристик синтезируемых образцов биополимера с основными эксплуатационными параметрами синтетических полимеров – полиэтилена и полипропилена.

Сравнительный анализ полученных данных (см. **рис. 2**) показал, что образцы № 1 и 8 характеризуются максимальными прочностными показателями, однако визуальный анализ полученных образцов пленки показал, что при сгибе пленки четко фиксируется частичное разрушение материала по месту перегиба.

Данный факт указывает на ограниченную возможность применения данных образцов пленки в качестве гибкого эластичного упаковочного материала. И наоборот, данный композит может широко применяться для получения жестких конструкционных изделий – стаканчики, подложки и т.д.

Таблица. Исследуемые образцы компонентного состава базисной матрицы синтезируемого биополимера

Table. The studied samples of the component composition of the basic matrix of the synthesized biopolymer

Варианты количественного (%) соотношения основных компонентов биополимера (в пересчете на массу сухого вещества) Желатин / Глицерин			
Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4
95% / 5%	75% / 25%	60% / 40%	50% / 50%
Образец № 5	Образец № 6	Образец № 7	Образец № 8
95% / 5%	75% / 25%	60% / 40%	50% / 50%

*Во всех вариантах матрицы использовали постоянный объем моделирующей добавки – фермент транслглютаминазы с молочной сывороткой (в исходном соотношении 1:4).

Хорошие эксплуатационные характеристики показал образец биополимера № 7 – отмечается образование прочной эластичной пленки, при сгибании которой не фиксируется никаких признаков деструкции материала в месте перегиба.

Сравнительный анализ эксплуатационных параметров полученных образцов биопленки в сравнении с аналогичными параметрами, полученными для образцов полиэтилена и полипропилена, показал, что последние имеют более высокие значения. Однако синтезируемые образцы биокompозита могут быть вполне конкурентноспособны в определенных областях потребления.

Оценка биоразлагаемости полученных образцов пленочных материалов была проведена в почвенной среде при комнатной температуре (около 25°C). Результаты процесса деструкции фиксировали визуально.

Полная деструкция непосредственно синтезируемых образцов пленки отмечалась по истечении 6 сут с момента погружения в почву. Признаки полной деструкции в почве у образцов пленки после месячного хранения при нормальных условиях были отмечены по истечении 14 сут. Для образцов пленки, выдержанных при комнатной температуре в течение трех месяцев, полное разложение в почве отмечено после 18 сут.

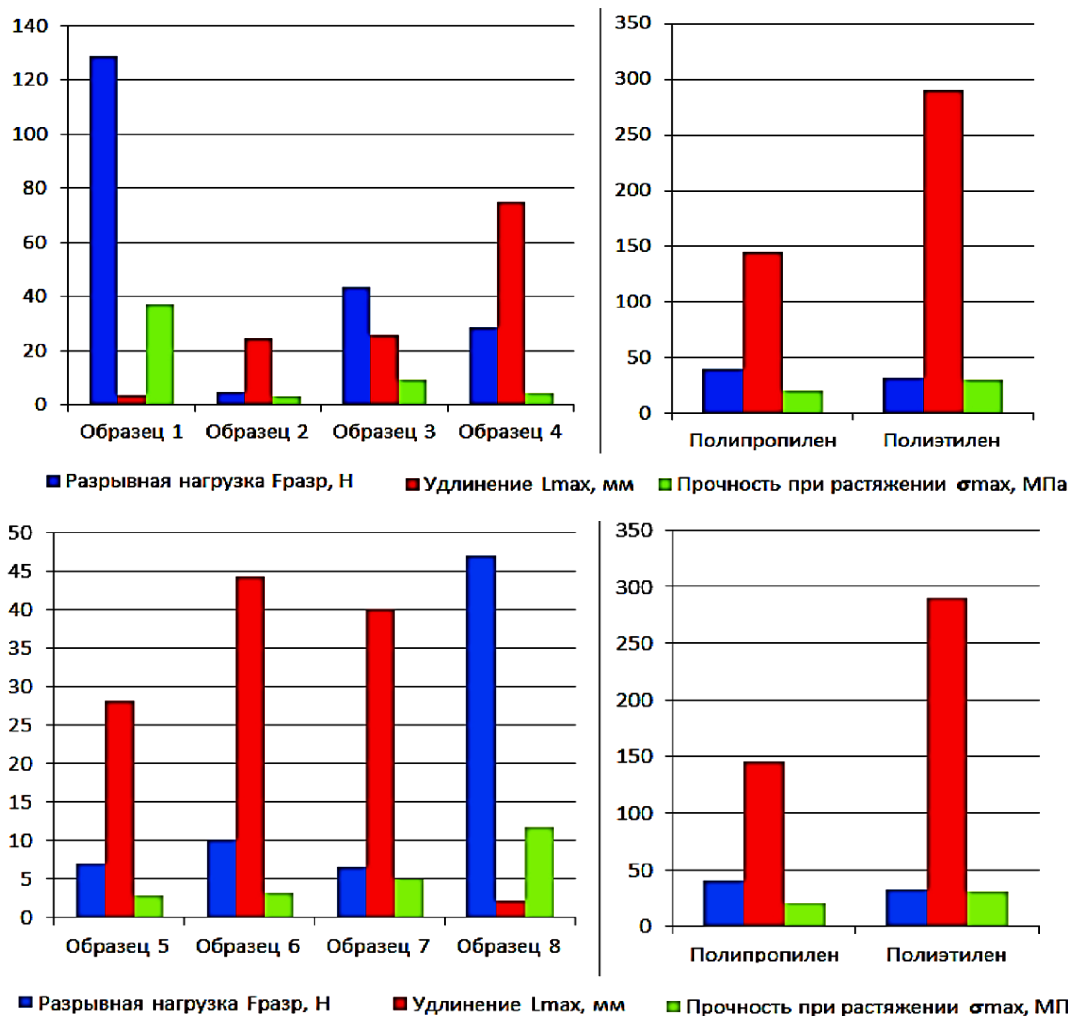


Рис. 2. Сравнительный анализ прочностных свойств готовых образцов пленки биополимера при различном соотношении основных компонентов базисной матрицы

Fig. 2. Comparative analysis of the strength properties of finished biopolymer film samples with different ratios of the main components of the basic matrix

Закключение

1. В работе разработана и апробирована методика синтеза биополимерных пленочных композитов на основе желатина и глицерина с использованием модифицирующей упрочняющей добавки – фермента транскламиназы.

2. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют утверждать, что в сравнении с существующими аналоговыми решениями разработанный композиционный состав матрицы биоразлагаемой пленки позволяет повысить показатели ее прочности на 8-12%, растяжения – на 18-27%. Кроме того, значительно сокращается временной интервал природной деструкции полученного биополимера в почвенной среде.

3. Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке эффективных технологических параметров синтеза биополимера на основе природных материалов с возможностью повы-

шения основных эксплуатационных характеристик полимера за счет введения эффективной модифицирующей добавки.

4. Полученные образцы биополимера характеризуются высокой скоростью деструкции в естественных условиях за короткий период времени без вреда для окружающей среды, обладают высокой совместимостью с биологическими системами и имеют необходимую прочность и гибкость.

Список источников

1. Сравнительный анализ физико-механических свойств биоразлагаемых и синтетических полимеров / Ершова О.В., Медяник Н.Л., Мишурина О.А., Бессонова Ю.А., Багреева К.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19, № 4. С. 56-63.
2. Васильева Н.Г. Биоразлагаемые полимеры // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 22. С. 156-157.

3. Александрова Л.В., Успенская М.В., Ишевский А.Л. Обзор: биodeградируемые упаковочные пленочные материалы // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2023. Т. 2, № 85. С. 216-225.
4. Poly(lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications / Auras R. A., Lim Loong Tak, Selke S. E., Tsuji H. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. P. 443.
5. Ершова О.В. Деструкция полимерных пленок, модифицированных оксибиоразлагаемой добавкой d2W // Успехи современного естествознания. 2016. № 11–2. С. 221–225.
6. Мухаметдинова А.А. Определение деструкции биоразлагаемых полимеров // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск, 2020. С. 30-34.
7. Бозарова Г.К., Бозарова Г.К., Хачатуров А.Е. Место биodeградируемых полимеров в общем объеме производства и использования пластиков // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 2. С. 93-99.
8. Бурак Л.Ч. Обзор разработок биоразлагаемых упаковочных материалов для пищевой промышленности // Ползуновский вестник. 2023. № 1. С. 91-105.
9. Биodeградируемые пленочные материалы на основе природных, искусственных и химически модифицированных полимеров / Закирова А.Ш., Канарская З.А., Михайлова О.С., Василенко С.В. // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 10. С. 114-121.
10. Ren J. Biodegradable Poly (Lactic Acid): Synthesis, Modification, Processing and Applications. Berlin: Springer Verlag, 2011. P. 208.
11. Исследование свойств синтетических и биоразлагаемых полимеров с целью возможности их использования в пищевой отрасли / Ершова О.В., Муллина Э.Р., Бессонова Ю.А., Багреева К.В. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. № 1 (91). С. 245-251.
12. Bastioli C. Handbook of biodegradable polymers. Shawbury, United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2005. P. 271.
13. Platt D.K. Biodegradable polymers: market report. Shawbury, United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2006. P. 2002.
14. Ершова О.В., Чупрова Л.В. Решение проблемы утилизации отходов полимерных материалов // Фундаментальные исследования. 2016. № 11–2. С. 271–275.
- Kazan Technological University], 2013;(22):156-157. (In Russ.)
3. Aleksandrova L.V., Uspenskaya M.V., Ishevsky A.L. Review: biodegradable packaging film materials. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies]. 2023;2(85):216-225. (In Russ.)
4. Auras R.A., Lim Loong Tak, Selke S.E., Tsuji H. Poly(lactic Acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011:443.
5. Ershova O.V. Destruction of polymer films modified with oxybiodegradable additive d2W. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in modern natural science], 2016;(11-2):221-225. (In Russ.)
6. Mukhametdinova A.A. Determination of the destruction of biodegradable polymers. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 78-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Current issues of modern science, technology and education. Proceedings of the 78th international scientific and technical conference]. Magnitogorsk, 2020, pp. 30-34. (In Russ.)
7. Bozarova G.K., Bozarova G.K., Khachaturov A.E. The place of biodegradable polymers in the total volume of production and use of plastics. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and Applied Ecology], 2020;(2):93-99. (In Russ.)
8. Burak L.Ch. Review of developments of biodegradable packaging materials for the food industry. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovskiy Vestnik], 2023;(1):91-105. (In Russ.)
9. Zakirova A.Sh., Kanarskaya Z.A., Mikhailova O.S., Vasilenko S.V. Biodegradable film materials based on natural, artificial and chemically modified polymers. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2014;(10):114-121. (In Russ.)
10. Ren J. Biodegradable Poly (Lactic Acid): Synthesis, Modification, Processing and Applications. Berlin: SpringerVerlag, 2011, p. 208.
11. Ershova O.V., Mullina E.R., Bessonova Yu.A., Bagreeva K.V. Study of the properties of synthetic and biodegradable polymers for the purpose of their possible use in the food industry. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2022;(1(91)):245-251. (In Russ.)
12. Bastioli C. Handbook of biodegradable polymers. Shawbury, United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2005, p. 271.
13. Platt D.K. Biodegradable polymers: market report. Shawbury, United Kingdom: Rapra Technology Limited, 2006, p. 2002.
14. Ershova O.V., Chuprova L.V. Solution to the problem of recycling polymeric materials. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2016;(11-2):271-275. (In Russ.)

References

Поступила 09.01.2025; принята к публикации 26.03.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 09/01/2025; revised 26/03/2025; published 30/09/2025

Мишурина Ольга Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры химии,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: olegro74@mail.ru. ORCID 0000-0003-3412-8902

Муллина Эльвира Ринатовна – кандидат технических наук, доцент кафедры химии,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: e.mullina@inbox.ru. ORCID 0000-0002-4254-3260

Шувалова Мария Михайловна – студент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mariashuvalova81@gmail.com.

Репина Анна Андреевна – студент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: repinaana123@gmail.com.

Лизогуб Виктория Андреевна – студент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: vikulya.lizogub@mail.ru.

Шибаета Анастасия Сергеевна, – студент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email a_shibaeva03@mail.ru.

Olga A. Mishurina – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Chemistry,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: olegro74@mail.ru. ORCID 0000-0003-3412-8902

Elvira R. Mullina – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Chemistry,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: e.mullina@inbox.ru. ORCID 0000-0002-4254-3260

Maria M. Shuvalova – Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mariashuvalova81@gmail.com.

Anna A. Repina – Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: repinaana123@gmail.com.

Victoria A. Lizogub – Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: vikulya.lizogub@mail.ru.

Anastasia S. Shibaeva – Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: a_shibaeva03@mail.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.791.92
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-159-168



ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОТВОДОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ИЗ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ 08X18H10T

Злобин Е.П.¹, Балякин А.В.¹, Хаймович А.И.¹, Котов К. А.², Кретов К.С.¹, Платонов М.С.¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Традиционно отводы для систем технологических трубопроводов на атомных электростанциях изготавливаются штамповкой. Однако при использовании данного метода возникает серьёзная проблема – высокий процент брака из-за неравномерного распределения материала по изделию. Это приводит к снижению качества продукции и увеличению затрат на производство. В связи с этим возникает необходимость поиска альтернативных методов изготовления. Одним из перспективных направлений является использование аддитивных технологий, а именно технологии прямого лазерного выращивания. Целью данной работы является изучение возможности применения прямого лазерного выращивания в качестве новой технологии для производства отводов. В рамках исследования была изготовлена опытная партия изделий и образцы для испытаний. Был проведен контроль точности геометрических параметров выращенных отводов, а также оценка физико-механических свойств и качества поверхностного слоя. Результаты исследования показали, что химический состав материала образцов соответствует требованиям, предъявляемым к марке стали 08X18H10T. Однако механические испытания выявили некоторые несоответствия в области предела текучести. Образцы обладают высокой стойкостью к межкристаллитной коррозии, а также низкую степень загрязнённости неметаллическими включениями, содержание ферритной фазы не превышает 5%. Проведённый контроль геометрических параметров отводов показал, что все размеры соответствуют конструкторским требованиям, а на поверхности отсутствуют недопустимые дефекты. На основе полученных данных были даны рекомендации по возможной корректировке технологии для обеспечения соответствия всем требованиям ГОСТ по механическим свойствам. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов для оптимизации производственных процессов и повышения качества продукции в сфере атомной промышленности.

Ключевые слова: прямое лазерное выращивание, отводы, металлопорошковая композиция, сталь 08X18H10T, металлография, механические свойства, геометрическая точность, качество поверхностного слоя, галтовка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-00765 <https://rscf.ru/project/24-19-00765/>.

© Злобин Е.П., Балякин А.В., Котов К. А., Хаймович А.И., Кретов К.С., Платонов М.С., 2025

Для цитирования

Изготовление отводов для атомной промышленности методом прямого лазерного выращивания из металлопорошковой композиции 08X18H10T / Злобин Е.П., Балякин А.В., Котов К. А., Хаймович А.И., Кретов К.С., Платонов М.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 159-168. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-159-168>



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

MANUFACTURING OF BRANCH TUBES FOR NUCLEAR INDUSTRY BY DIRECT ENERGY DEPOSITION MADE OF METAL POWDER COMPOSITION 08Cr18Ni10T

Zlobin E.P.¹, Balyakin A.V.¹, Khaimovich A.I.¹, Kotov K. A.², Kretov K.S.¹, Platonov M.S.¹

¹Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russia

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Traditionally, branch tubes for process pipeline systems at nuclear power plants are made by stamping. However, when using this method, a serious problem arises such as a high percentage of defects due to the uneven distribution of material over the product. This leads to a decrease in product quality and an increase in production costs. In this regard, there is a need to search for alternative manufacturing methods. One of the promising areas is the use of additive technologies, namely direct energy deposition. The purpose of this work is to study the possibility of using direct energy deposition as a new technology for the production of branch tubes. As part of the research, a pilot batch of parts and test samples were produced. The accuracy of the geometric parameters of the obtained branch tubes was monitored, as well as the assessment of the physical and mechanical properties and quality of the surface layer. The results of the study showed that the chemical composition of the sample material meets the requirements for the 08Cr18Ni10T steel grade. However, mechanical tests revealed some inconsistencies in the field of yield strength. The samples have high resistance to intercrystalline corrosion, as well as a low degree of contamination with non-metallic inclusions, the content of the ferrite phase does not exceed 5%. The control of the geometric parameters of the branch tubes showed that all dimensions meet the design requirements, and there are no unacceptable defects on the surface. Based on the data obtained, recommendations were made on possible adjustments to the technology to ensure compliance with all GOST requirements for mechanical properties. The practical significance of the research lies in the possibility of using the results obtained to optimize production processes and improve product quality in the nuclear industry.

Keywords: direct energy deposition, branch tubes, metal powder composition, 08Cr18Ni10T steel, metallography, mechanical properties, geometric precision, surface layer quality, tumbling

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No.24-19-00765 <https://rscf.ru/project/24-19-00765/>.

For citation

Zlobin E.P., Balyakin A.V., Khaimovich A.I., Kotov K.A., Kretov K.S., Platonov M.S. Manufacturing OF Branch Tubes for Nuclear Industry by Direct Energy Deposition Made of Metal Powder Composition 08Cr18Ni10T. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 159-168. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-159-168>

Введение

Отводы применяются в конструкциях систем технологических трубопроводов, располагающихся в зданиях и сооружениях АЭС, находящихся в контакте с радиоактивными носителями, растворами химических реагентов, а также системах, предъявляющих повышенные требования к коррозионной стойкости конструктивных элементов. Традиционно изделия изготавливаются методом штамповки из трубы 45×3,5 мм. Однако этот метод имеет ряд недостатков, главный из них – местное утолщение стенки до 4,2 мм, возникающее вследствие осадки металла при формоизменении, что недопустимо согласно рабочей конструкторской документации (РКД) [1]. В процессе доработки толщины стенки (зачистка шлифовальной машинкой) высока вероятность перевода детали в брак ввиду неравномерного снятия металла абразивным инструментом. В связи с этим возникает необходимость поиска альтернативных методов изготовле-

ния отводов, которые позволят снизить процент брака и повысить качество продукции.

В условиях современного промышленного развития, когда предприятия стремятся сократить себестоимость производства и одновременно повысить качество выпускаемой продукции, всё более актуальными становятся передовые технологии [2]. Одной из таких является прямое лазерное выращивание (ПЛВ) — метод аддитивного производства, который существенно меняет подход к созданию сложных деталей [3, 4]. Этот метод основан на послойной наплавке материала, а за счет применения шестиосевого робота-манипулятора можно эффективно воспроизводить элементы со сложной геометрией без использования поддерживающих структур [5]. Прямое лазерное выращивание обеспечивает высокую производительность в сочетании с достаточной точностью и позволяет минимизировать отходы материалов и быстро изготавливать изделия без дополнительных затрат на оснастку [6].

Целью данной работы является изучение возможности применения технологии прямого лазерного выращивания в качестве альтернативы традиционным методам производства отводов. Для этого требовалось изготовить опытную партию деталей и провести исследования, направленные на оценку качества и точности их изготовления. Также необходимо вырастить образцы-свидетели для контроля физико-механических свойств и химического состава изделий, полученных в процессе выращивания. Результаты исследования направлены на определение перспективы использования ПЛВ для производства отводов и разработку рекомендации по оптимизации технологического процесса.

Материалы и методы исследования

Для изготовления отводов и необходимых трубных заготовок использовалась отечественная установка ИЛИСТ L, разработанная институтом лазерных и сварочных технологий СПбГМТУ. Данное оборудование предназначено для изготовления металлических крупногабаритных изделий с максимальным диаметром 900 мм и высотой 600 мм при массовой производительности до 1,2 кг/ч в случае применения порошковых материалов из никелевых сплавов, нержавеющей и жаропрочных сталей. Установка ПЛВ оснащена промышленным шестиосевым роботом и позиционером грузоподъемностью до 400 кг. Также в ее состав входит волоконный иттербиевый лазер с максимальной выходной мощностью 2 кВт, чиллер для охлаждения лазера и технологический инструмент. В качестве технологического инструмента выступает лазерная оптическая система с четырехструйным соплом для фокусировки газопорошковых струй.

Перед началом выращивания был проведен входной контроль металлопорошковой композиции (МПК) 08X18H10T от производителя ОЗ «Микрон» на соответствие его заявленным характеристикам [7]. По химическому составу порошок 08X18H10T соответствовал требованиям ГОСТ 5632-2014 к нержавеющей стали марки 08X18H10T (табл. 1).

Гранулометрический состав определялся методом сухого рассева порошка 08X18H10T на виброситах. Массовая доля фракции 40-200 мкм составила 93,5%, что является оптимальным значением для процесса ПЛВ. Насыпная плотность порошка определялась с помощью анализатора BeDensi T1. Среднее арифметическое значение измерений насыпной плотности составило 4,95 г/см³.

Текучесть порошка определялась с помощью анализатора HFlow-1 методом воронки Холла с диаметром отверстия 2,5 мм. Среднее значение текучести по результатам замеров времени истечения 50 г порошка через воронку составило 12,2 с.

Форма частиц порошка определялась с помощью анализатора размера микроструктуры твердых тел по ГОСТ 25849-83. Исследование микроструктуры порошка проводилось на электронно-растровом микроскопе TESCAN VEGA. Фактор формы частиц рассчитывался как отношение максимального линейного размера проекции частицы к минимальному размеру, измерение размеров производилось вручную при помощи программного обеспечения анализатора. Полученный на сканирующем электронном микроскопе внешний вид частиц порошка показан на **рис. 1**.

По результатам расчетов фактора формы частиц порошка количество частиц сферической формы в анализируемой выборке составило 99,5%.

Таблица 1. Химический состав металлопорошковой композиции 08X18H10T

Table 1. Chemical composition of metal powder composition 08Cr18Ni10T

Химический элемент												
Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Ti	Cu	V	Mo	C	P	S	
Фактическая масса, %												
71,18	17,64	9,28	0,913	0,375	0,262	0,075	0,09	0,023	0,056	-	-	
Норма по ГОСТ 5632, %												
Основа	17-19	9-11	≤2,0	≤0,8	≤0,7	≤0,3	-	-	≤0,08	≤0,035	≤0,02	

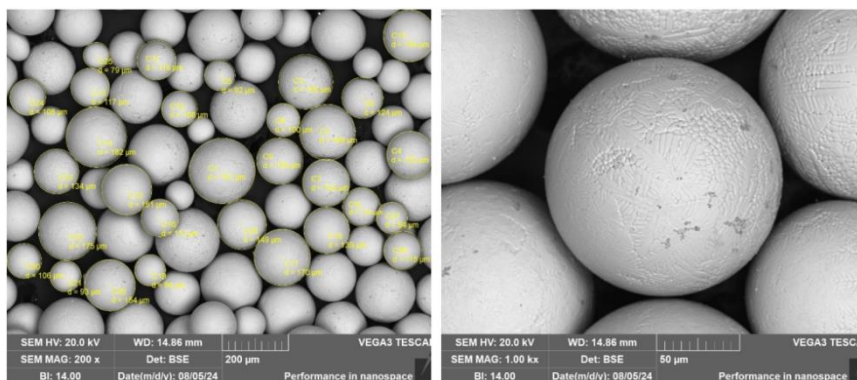


Рис. 1. Форма частиц порошка

Fig. 1. The shape of the powder particles

С целью повышения качества синтезированного материала была проведена отработка технологических параметров ПЛВ [8]. Для этого были изготовлены технологические пробы на разных режимах сплавления, для которых варьировалась мощность лазерного излучения от 1000 до 1800 Вт. Далее проводился микроструктурный анализ полученных образцов и выбирался оптимальный режим для выращивания.

Подобранный оптимальный режим ПЛВ имеет следующие технологические параметры:

- ширина валика 2 мм;
- высота слоя 0,6 мм;
- смещение между валиками 1,33 мм;
- мощность лазерного излучения 1200 Вт;
- рабочая скорость наплавки 20 мм/с;
- линейные скорости холостых перемещений 50 мм/с;
- расход защитного газа 15 л/мин;
- расход транспортного газа 4 л/мин.

Микрошлиф, полученный на оптимальных режимах, показан на **рис. 2**.

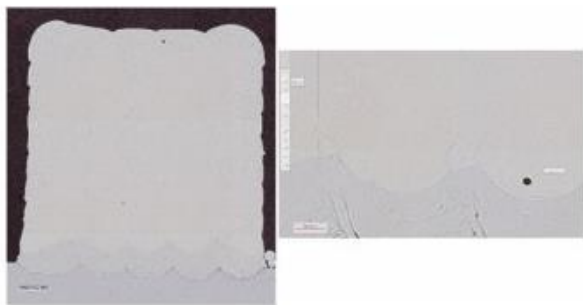


Рис. 2. Вид микрошлифа, полученного на оптимальном режиме

Fig. 2. The type of microsection obtained in the optimal mode

Для выращивания отводов была добавлена технологическая прибыль толщиной 15 мм от подложки. Это обеспечивает исключение попадания перемешанного слоя материала подложки и порошка в состав детали, а также компенсирует неровности подложки и снижает их влияние на формирование геометрии. Оптимизированная трёхмерная модель отвода для выращивания представлена на **рис. 3**.

Для изготовления отводов использовалась стратегия наплавки, при которой слой формировался в два валика с постепенным наклоном инструмента и его наплавкой последних слоев под углом 90°. Это позволило минимизировать деформации, связанные с короблением, и обеспечить необходимую толщину готового изделия. Трубные заготовки были выполнены на тех же режимах, с той же толщиной для того, чтобы конечное изделие по эксплуатационным свойствам максимально соответствовало опытным деталям.

Процесс выращивания отводов и заготовок осуществлялся в камере, заполненной аргоном и был

разделён на два этапа. На первом этапе изготавливались четыре отвода и трубы для проведения испытаний. На втором этапе были выращены ещё четыре отвода и образцы, которые использовались для контроля ферритной фазы. Процесс изготовления показан на **рис. 4**.

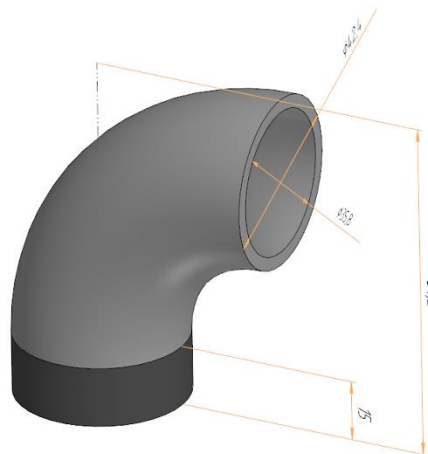


Рис. 3. 3D-модель отвода для выращивания
Fig. 3. 3D model of the branch tubes for the DED process

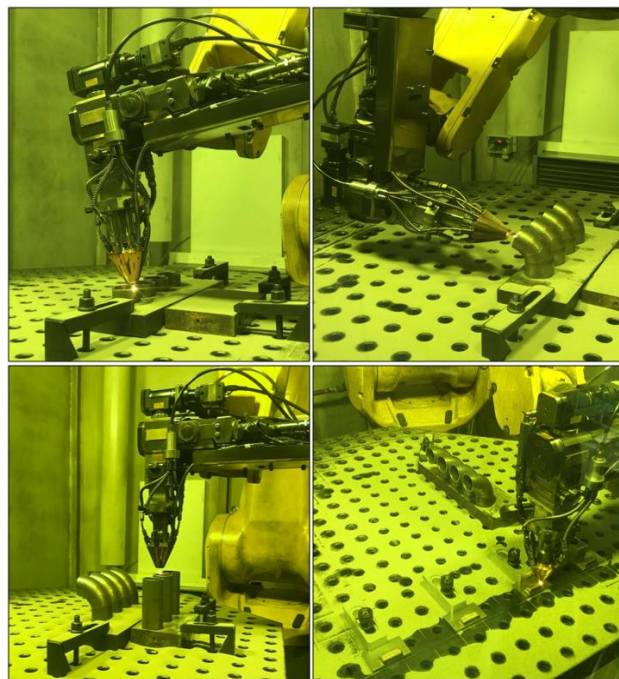


Рис. 4. Процесс выращивания отводов и образцов для испытания

Fig. 4. The process of manufacturing branch tubes and test samples

Для повышения качества поверхности и снижения шероховатости деталей применялась технология галтовки, состоящая из двух последовательных этапов – черного и чистового [9, 10]. Обработка производилась с использованием турбогалтовки ротор-

ного типа Avalon TE10 W (рис. 5). Турбогалтовки, в отличие от вибрационных машин, используют ротационное движение для создания однородного потока абразивных материалов, что является более эффективным процессом и позволяет убрать дефектный слой с поверхности изделия за более короткий промежуток времени.



Рис. 5. Внешний вид турбогалтовки Avalon TE10 W
Fig. 5. The appearance of the Avalon TE10 W rotary tumbling machine

В процессе обработки для каждого этапа использовались пластиковые абразивные тела конусной и пирамидальной формы с различной степенью абразивности. Черновая обработка длилась два часа при скорости вращения ротора 350 об/мин. На черновом этапе удалялись основные дефекты, такие как неровности сформированного слоя и налипшие частицы порошка. Чистовой этап длительностью один час проводился в галтовочных телах меньшей абразивно-

сти и при частоте оборотов 200 об/мин. Чистовой этап был направлен на сглаживание пиков шероховатости и придание поверхности блеска.

Полученные результаты и их обсуждение

Для контроля получившихся характеристик изделия было необходимо проведение следующих испытаний по ГОСТ Р 70731.2-2023:

- Контроль химического состава.
- Испытания на растяжение при комнатной температуре.
- Испытания на растяжение при повышенной температуре 350°C.
- Контроль содержания неметаллических включений.
- Контроль содержания ферритной фазы.
- Испытания на стойкость против межкристаллитной коррозии.
- Контроль диаметра, толщины стенки отвода.
- Контроль состояния поверхности отвода.

Контроль химического состава заготовок.

Определение химического состава металла заготовок проводилось по ГОСТ 54153-2010 на оптико-эмиссионном анализаторе ДФС-500. Результаты определения химического состава металла приведены в табл. 2.

По результатам исследования металла заготовок установлено, что химический состав металла соответствует требованиям, предъявляемым ГОСТ 5632-2014 к марке стали 08X18H10T, и требованиям нормативно-технической документации.

Испытание на растяжение при комнатной температуре. Определение механических свойств металла заготовок осуществлялось по ГОСТ 10006-80 с использованием машины испытательной универсальной ТРМ Tochline. Результаты испытания представлены в табл. 3. Следует отметить, что испытание металла по ГОСТ 10006-80 не предусматривает определение относительного сужения образцов.

Таблица 2. Химический состав металла

Table 2. Chemical composition of metal

Образец	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	Cu	Mo
1	0,05	0,45	1,11	0,015	0,008	17,75	9,26	0,28	0,09	0,07
2	0,04	0,49	1,08	0,020	0,005	17,08	9,26	0,31	0,09	0,09
Требования ГОСТ 5632-2014										
08X18H10T	≤ 0,08	≤ 0,80	≤ 2,00	≤ 0,040	≤ 0,020	17,00-19,00	9,00-11,00	≤ 0,70	≤ 0,30	-

Таблица 3. Результаты определения механических характеристик

Table 3. Results of mechanical properties determination

Образец	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
1	597	344	41,0
2	639	375	53,0
Среднее	618	359	45,0
Требования НТД	510-730	215-340	Не менее 35

По результатам проведенных испытаний установлено, что механические свойства металла заготовок не соответствуют требованиям нормативно-технической документации в части предела текучести (превышение не более 6%). Это является характерным явлением для прямого лазерного выращивания, так как в процессе наплавки происходит направленная кристаллизация, которая обеспечивает формирование мелкозернистой структуры, что приводит к упрочнению материала и повышению его предела текучести по сравнению с традиционными методами производства [11].

Испытание на растяжение при повышенной температуре. Определение механических свойств металла заготовок осуществлялось по ГОСТ 19040-81 с использованием испытательной машины Shimadzu AGS-X. Результаты испытания представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты определения механических характеристик при повышенных температурах

Table 4. Results of mechanical properties determination at elevated temperatures

Образец	Предел прочности σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
1	414	235	33,5
2	425	223	44,8
3	420	212	34,6
4	419	210	29,4
Среднее	419	220	36
Требования НТД	Не менее 412	177-290	Не менее 26

По результатам проведенных испытаний установлено, что механические свойства металла при повышенной температуре 350°C заготовок соответ-

ствуют требованиям нормативно-технической документации.

Контроль содержания неметаллических включений. По результатам микроструктурного анализа установлено, что металл заготовок незначительно загрязнен неметаллическими включениями: оксидами точечными 0,5 балла, силикатами недеформирующимися 0,5 балла, нитридами точечными 0,5 балла по ГОСТ 1778-2022. Степень загрязненности неметаллическими включениями соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Контроль содержания ферритной фазы. Была проведена детальная оценка ферритной составляющей, измеренной по пяти снимкам микрошлифов, сделанным на различных участках образца (рис. 6). Результаты анализа показали, что ферритная фаза составляет 5%, что соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Контроль геометрических параметров. После процесса галтовки был проведен контроль геометрических параметров и оценка отклонения формы. Для оценки изделия «Отвод» применялись комбинированные методы измерения, включающие в себя сканирование с использованием ручного сканера и измерения с помощью традиционных контрольно-измерительных инструментов – штангенциркуля и кронциркуля [12].

Для контроля геометрических параметров изделия «Отвод» использовался ручной сканер Scanform L5 с установленным разрешением сканирования 0,3 мм. Сканирование проводилось с одного торца изделия, что дало возможность получить достаточное представление о его форме и размерах. Для анализа полученных данных была использована программа Geomagic Control X. В ней было произведено совмещение 3D-модели со сканом формата stl. Результаты совмещения представлены на рис. 7.

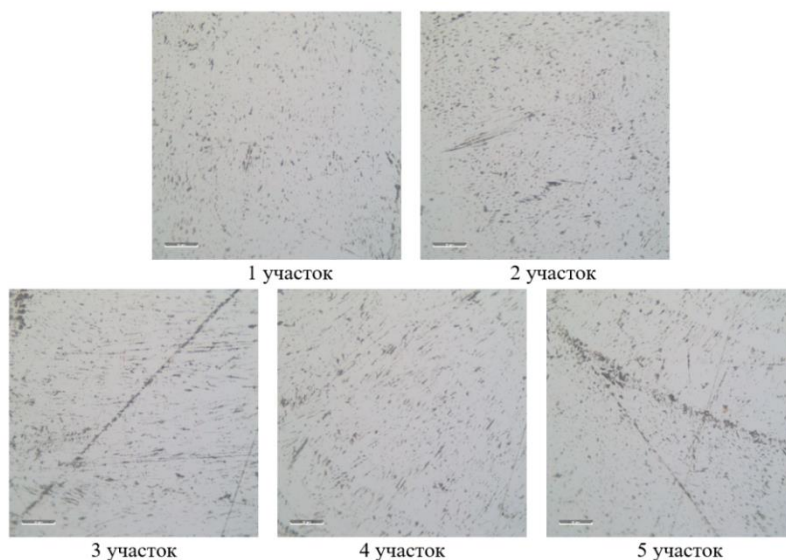


Рис. 6. Микрошлифы образца на разных участках для контроля ферритной фазы

Fig. 6. Metallographic specimen at different sites for monitoring the ferritic phase

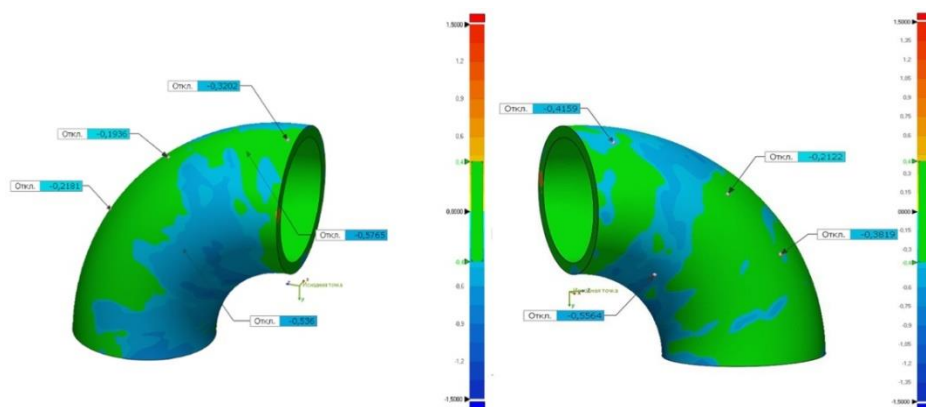


Рис. 7. Отклонение формы изготовленного отвода
Fig. 7. Shape deviation of the manufactured branch tube

Результаты сканирования показали, что максимальное отклонение от заданной геометрии составляет 0,6 мм, а минимальное -0,9 мм. Среднее значение отклонения размеров -0,3 мм. Эти данные необходимо учесть при дальнейшем анализе и корректировке технологического процесса. Чтобы минимизировать отклонения, можно использовать предкоррекцию геометрии, это позволит компенсировать потенциальные отклонения и повысить точность соответствия изделий заданным параметрам.

В табл. 5 представлены результаты измерений наружного и внутреннего диаметров отвода в четырех сечениях, которые были получены в ходе измерения с помощью штангенциркуля ШЦ-1-125 с точностью 0,1 мм. Также приведены результаты измерений толщины стенки отвода, выполненные в двух точках на его краях с помощью кронциркуля Mitutoyo 209-406 с точностью 0,01 мм.

После проведенного измерения ручным контрольно-измерительным инструментом все основные размеры находятся в допуске и соответствуют конструкторским требованиям.

Контроль состояния поверхности. После процесса выращивания на внутренних и внешних поверхностях отвода, сформированных методом послойного наложения валиков, наблюдается характерная для технологии ПЛВ волнистость, а также при-

липшие частицы МПК (рис. 8). Эти факторы способствуют формированию шероховатости по Ra до 15 мкм [13]. Характерный бронзовый оттенок отвода, наблюдаемый после выращивания, обусловлен резкими колебаниями температуры, возникающими в результате нагрева и последующего скоротечного охлаждения.

После проведенной постобработки поверхность отвода более равномерная с заметно сниженной волнистостью. На внутренней и внешней поверхностях отсутствуют дефекты в виде сколов, трещин, пленов, пор, несплавлений, а также инородные металлические и неметаллические включения. Однако на поверхности имеются локальные наплывы и ямки, которые не превышают $\pm 0,05$ мм и не выводят толщину стенки за допустимые пределы.

Измерение шероховатости отвода проводилось с помощью профилометра ИШП-210. Были получены следующие средние значения: Ra = 11,63 мкм (для внутренней поверхности) и Ra = 5,96 мкм (для наружной поверхности). Шероховатость внутренней поверхности изделия больше, чем наружной, поскольку она обрабатывается менее эффективно. Это обусловлено ограниченной доступностью данной поверхности для взаимодействия с галтовочными телами и более низкой скоростью потока абразива внутри отвода.

Таблица 5. Результаты измерения основных геометрических параметров

Table 5. Measurement results of the main geometric parameters

Наружный диаметр					
Сечение	Эталон, мм	Результат измерения, мм			Среднее значение, мм
		№1	№2	№3	
A-A	42,4 \pm 0,6	41,9	41,7	42,0	41,8
Б-Б	42,4 \pm 0,6	41,6	41,8	41,9	41,8
В-В	42,4 \pm 0,6	41,8	41,6	41,8	41,7
Г-Г	42,4 \pm 0,6	41,8	41,9	41,6	41,8
Внутренний диаметр					
A-A	35,8 \pm 0,45	35,7	35,9	35,4	35,6
Г-Г	35,8 \pm 0,45	35,6	35,4	35,6	35,5
Толщина стенки					
A-A	3,3 \pm 0,7	3,02	2,95	2,89	2,95
Г-Г	3,3 \pm 0,7	2,89	3,0	2,93	2,94



Рис. 8. Поверхностный слой изделия до и после обработки
Fig. 8. The surface layer of the branch tube before and after processing

Закключение

В результате работы были изготовлены отводы и опытные образцы, необходимые для проведения испытаний. Исследования показали, что химический состав образцов соответствует требованиям, которые предъявляются к марке стали 08X18H10T. Однако результаты механических испытаний выявили некоторые несоответствия свойств требованиям нормативно-технической документации. Предел текучести при комнатной температуре превышает требуемое значение на 6%. Это может потребовать дополнительной корректировки процесса изготовления и применения термообработки для достижения нужных характеристик. По остальным параметрам образцы соответствуют всем требованиям к механическим свойствам. Также образцы обладают высокой стойкостью к межкристаллитной коррозии, а степень загрязнённости неметаллическими включениями характеризуется как низкая, что также свидетельствует о высоком качестве металла. Содержание ферритной фазы в образцах составляет 5% и соответствует требованиям нормативно-технической документации.

Проведённый контроль геометрических параметров отводов показал, что среднее отклонение размеров составляет до -0,3 мм. При этом все ответственные размеры соответствуют конструкторским требованиям. После проведённой постобработки на поверхности изделия не обнаружено дефектов в виде сколов, трещин, пор, несплавов, а также инородных металлических и неметаллических включений. Качество и шероховатость поверхности соответствуют установленным требованиям.

Результаты проведенного исследования могут послужить основой для развития и оптимизации технологии ПЛВ при производстве отводов. Данная технология обладает потенциалом стать перспективной альтернативой традиционным методам благодаря способности быстро создавать детали сложной формы, которые соответствуют физико-механическим

свойствам, предъявляемым ГОСТ к материалу 08X18H10T.

В дальнейшем планируется исследование влияния термообработки на свойства наплавленного металла. Следует изучить микроструктуру непосредственно на отводах, чтобы точнее определить возможные проблемы при наплавке с отклонением инструмента от вертикальной оси. Кроме того, стоит рассмотреть возможность объединения отвода с деталью, к которой он будет привариваться, и выращивать их как единое изделие. Благодаря этому можно избежать сварочной операции и механической обработки под сварку, тем самым сократив производственные затраты.

Список источников

1. Анализ разнотолщинности при штамповке отводов из нержавеющей стали 08X18H10T / Т.С. Ивлева, С.В. Мыльников, С.К. Грехов, Д.Р. Салихьянов // Magnitogorsk Rolling Practice 2019: материалы IV международной молодежной научно-практической конференции, Магнитогорск, 04–07 июня 2019 года / под ред. А.Г. Корчунова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. С. 64–66. EDN CFHWGA.
2. Перспективы применения аддитивных технологий в России в отраслевом ракурсе (на примере авиационной промышленности) / У. А. М. Найм, Д. Н. Ермаков, В. М. Мельников, О. Ю. Казенков // Computational Nanotechnology. 2022. Т. 9, № 2. С. 56–66. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-2-56-66. EDN KPWABK.
3. Разработка технологии прямого лазерного выращивания крупногабаритных изделий атомной энергетики / В.А. Королев, А.В. Сидоров, И.Ю. Михайлов [и др.] // Перспективные материалы. 2023. № 5. С. 46–55. DOI: 10.30791/1028-978X-2023-5-46-55. EDN ZBUQMN.
4. Piscopo G., Iuliano L. Current research and industrial application of laser powder directed energy deposition // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Т. 119. №. 11. С. 6893–6917.
5. Ahn D. G. Directed energy deposition (DED) process: state of the art // International Journal of Precision Engi-

- neering and Manufacturing-Green Technology. 2021. Т. 8. № 2. С. 703-742.
6. Глухов В.В., Туричин Г.А. Экономическая эффективность технологии прямого лазерного выращивания в промышленности // Теоретические основы формирования промышленной политики. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2015. С. 176-190. EDN VDLGFD.
7. Functional metal powders: Design, properties, applications, and prospects / Wang X. et al. // Materials Science and Engineering: B. 2022. Т. 280. С. 115708.
8. Investigation of the Influence of Direct Metal Deposition Modes on Microstructure and Formation of Defects in Samples of Heat Resistant Alloy / Balyakin A. V. et al. // Materials Research Proceedings. 2022. Т. 21.
9. Применение виброгалтовки для постобработки изделий после 3D печати / Злобин Е. П. и др. // Перспективы развития двигателестроения. 2023. С. 307-308.
10. Влияние технологических параметров вибрационной обработки на качество изделий, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления / Е. П. Злобин, А. И. Хаймович, Е. С. Гончаров, А. В. Балякин // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 6(144). С. 38-48. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-38-48. EDN CTSCML.
11. Laser directed energy deposition of AISI 316L stainless steel: The effect of build direction on mechanical properties in as-built and heat-treated conditions / Pacheco J. T. et al. // Advances in Industrial and Manufacturing Engineering. 2022. Т. 4. С. 100079.
12. Возможности технологий 3D-сканирования при ремонте сельскохозяйственной и лесохозяйственной техники / И.Г. Голубев, В.В. Быков, М.И. Голубев, И.А. Спицын // Технический сервис машин. 2020. № 2(139). С. 21-28. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-21-28. EDN JPUFDJ.
13. Влияние осцилляции лазерного излучения на качество поверхности изделий при прямом лазерном выращивании / А.М. Вильданов, К.Д. Бабкин, Е.В. Земляков, М.О. Гущина // Фотоника. 2019. Т. 13, № 6. С. 518-523. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.6.518.523. EDN ADQOQG.
- Nanotechnology], 2022;9(2):56-66. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-2-56-66. EDN KPWABK. (In Russ.)
3. Korolev V.A., Sidorov A.V., Mihailov I.Yu., et al. Development of technology for direct energy deposition of large-sized nuclear power products. *Perspektivnye Materialy* [Promising materials], 2023;(5):46-55. DOI 10.30791/1028-978X-2023-5-46-55. EDN ZBUQMN. (In Russ.)
4. Piscopo G., Iuliano L. Current research and industrial application of laser powder directed energy deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;119(11):6893-6917.
5. Ahn D.G. Directed energy deposition (DED) process: state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2021;8(2):703-742.
6. Glukhov V.V., Turichin G.A. Economic efficiency of direct energy deposition technology in industry. *Teoreticheskie osnovy formirovaniya promyshlennoy politiki* [Theoretical foundations of industrial policy formation]. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2015, pp. 176-190. EDN VDLGFD. (In Russ.)
7. Wang X., et al. Functional metal powders: Design, properties, applications, and prospects. *Materials Science and Engineering: B*. 2022;280:115708.
8. Balyakin A.V., et al. Investigation of the Influence of Direct Metal Deposition Modes on Microstructure and Formation of Defects in Samples of Heat Resistant Alloy. *Materials Research Proceedings*. 2022;21.
9. Zlobin E.P., et al. The use of vibratory finishing for post-processing of products after 3D printing. *Perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya* [Prospects of engine building development], 2023:307-308. (In Russ.)
10. Zlobin E.P., Haimovich A.I., Goncharov E.S., Balyakin A.V. Influence of technological parameters of vibration treatment on the quality of products manufactured using selective laser fusion technology. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science intensive technologies in mechanical engineering], 2023;(6(144)):38-48. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-38-48. EDN CTSCML. (In Russ.)
11. Pacheco J.T., et al. Laser directed energy deposition of AISI 316L stainless steel: The effect of build direction on mechanical properties in as-built and heat-treated conditions. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2022;4:100079.
12. Golubev I.G., Bykov V.V., Golubev M.I., Spitsyn I.A. The possibilities of 3D scanning technologies in the repair of agricultural and forestry machinery. *Tekhnicheskij servis mashin* [Technical service of cars], 2020;(2(139)):21-28. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-21-28. EDN JPUFDJ. (In Russ.)
13. Vildanov A.M., Babkin K.D., Zemlyakov E.V., Gushchina M.O. The effect of laser radiation oscillation on the surface quality of products during direct energy deposition. *Fotonika* [Photonics Russia], 2019;13(6):518-523. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.6.518.523. EDN ADQOQG. (In Russ.)

References

1. Ivleva T.S., Mylnikov S.V., Grekhov S.K., Salihyanov D.R. Analysis of the thickness difference during stamping of 08Cr18Ni10T stainless steel branch tubes. *Magnitogorsk Rolling Practice 2019: Materialy IV mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Magnitogorsk Rolling Practice 2019. Proceedings of the IV International Youth Scientific and Practical Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2019, pp. 64-66. EDN CFHWGA. (In Russ.)
2. Naym U.A.M., Ermakov D.N., Melnikov V.M., Kazenkov O.Yu. Prospects for the application of additive technologies in Russia from an industry perspective (using the example of the aviation industry). [Computational

Поступила 25.02.2025; принята к публикации 30.03.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 25/02/2025; revised 30/03/2025; published 30/09/2025

Злобин Евгений Петрович – аспирант,

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.
Email: ep.smr@mail.ru. ORCID 0000-0001-8419-7653

Балякин Андрей Владимирович – старший преподаватель,

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.
Email: a_balik@mail.ru. ORCID 0000-0002-1558-1034

Хаймович Александр Исаакович – доктор технических наук, доцент,

заведующий кафедрой технологии производства двигателей,

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.
Email: berill_samara@bk.ru. ORCID 0000-0002-9935-5703

Котов Кирилл Андреевич – магистрант,

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Email: aspire-7738@mail.ru. ORCID 0009-0007-7957-2894

Кретов Кирилл Сергеевич – магистрант,

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.

Email: kretov2002@yandex.ru. ORCID 0009-0000-1411-8171

Платонов Михаил Сергеевич – магистрант,

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.

Email: platonovmichael.s@gmail.com. ORCID 0009-0002-7588-5782

Evgeniy P. Zlobin – Postgraduate Student,

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia.

Email: ep.smr@mail.ru. ORCID 0000-0001-8419-7653

Andrey V. Balyakin – Senior Lecturer,

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia.

Email: a_balik@mail.ru. ORCID 0000-0002-1558-1034

Alexander I. Khaimovich – DrSc(Eng.), Associate Professor,

Head of the Department of Engine Manufacturing Technology,

Samara National Research University named after academician S.P. Korolev, Samara, Russia.

Email: berill_samara@bk.ru. ORCID 0000-0002-9935-5703

Kirill A. Kotov – Master's Student,

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Email: aspire-7738@mail.ru. ORCID 0009-0007-7957-2894

Kirill S. Kretov – Master's Student,

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia.

Email: kretov2002@yandex.ru. ORCID 0009-0000-1411-8171

Michael S. Platonov – Master's Student,

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia.

Email: platonovmichael.s@gmail.com. ORCID 0009-0002-7588-5782

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ RELIABILITY AND DURABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.8.024.7
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-169-177



РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТА ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Герасименко П.А., Андреева Н.П., Герасименко Т.Е., Рево А.А.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Фундаменты машин с динамическими нагрузками должны проектироваться с учетом условий их эксплуатации, действующих нагрузок и влияния строящихся и реконструируемых фундаментов близлежащих машин. Должны быть предусмотрены решения, обеспечивающие надежность, долговечность и экономичность на всех стадиях строительства и эксплуатации фундаментов. Разработка проектных решений, обеспечивающих наиболее полное использование прочностных и деформационных характеристик конструкций, в том числе за счет создания оборудования и технологии, является актуальной задачей. **Цель работы.** Создание технологии и оборудования для армирования и усиления фундамента шаровой мельницы, позволяющих предотвратить появление трещин и изломов при различных динамических нагрузках с использованием САПР. **Используемые методы.** Геометрическое построение 3D-модели проекта станка для изготовления арматурного каркаса, а также его конструктивных деталей в программно-техническом комплексе SolidWorks. **Новизна.** В рамках выполнения работы на конструкцию оборудования для изготовления элементов арматурного каркаса была подана заявка на изобретение и получен патент №2834799, подтверждающий новизну разработки. **Результат.** Спроектирована 3D-модель навивочного станка, позволяющего производить намотку элементов арматурного каркаса непосредственно на месте проведения строительных и монтажных работ, визуализирующая взаимодействие элементов его конструкции в виде анимационной презентации в САПР. **Практическая значимость.** Созданная 3D-модель навивочного станка в САПР ускорит и упростит процесс проектирования и конструирования деталей, уменьшит затраты на апробацию и позволит в кратчайшие сроки реализовать разработанную технологию на действующих машинах с динамическими нагрузками.

Ключевые слова: арматурный каркас, фундамент, навивочный станок, 3D-моделирование, шаровая мельница

© Герасименко П.А., Андреева Н.П., Герасименко Т.Е., Рево А.А., 2025

Для цитирования

Разработка технологии и оборудования для усиления фундамента шаровой мельницы / Герасименко П.А., Андреева Н.П., Герасименко Т.Е., Рево А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 169-177. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-169-177>



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

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR STRENGTHENING THE FOUNDATION OF BALL MILL

Gerasimenko P.A., Andreeva N.P., Gerasimenko T.E., Revo A.A.

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The foundations of machines with dynamic loads must be designed taking into account their operating conditions, the current loads and the influence of the foundations of neighbouring machines under construction and reconstruction. Solutions must be provided to ensure reliability, durability and cost-effectiveness at all stages of foundation construction and operation. The development of design solutions ensuring the fullest utilisation of strength and deformation characteristics of structures including through the creation of equipment and technology is an urgent task. **Objectives** are creation of technology and equipment for reinforcing and strengthening the foundation of a ball mill to prevent the occurrence of cracks and fractures under various dynamic loads with the use of CAD. **Methods Applied:** geometric construction of 3D-model of the project of the machine for manufacturing of reinforcing cage, as well as its structural parts in the software and hardware complex SolidWorks. **Originality.** As part of the work, an invention application was filed for the design of equipment for manufacturing reinforcing cage elements and patent No. 2834799 was obtained, confirming the novelty of the development. **Result.** A 3D-model of a coiling machine is designed, which allows to coil reinforcing cage elements directly on the site of construction and installation works, visualising the interaction of its design elements in the form of an animated presentation in CAD. **Practical Relevance.** The created 3D-model of the coiling machine in CAD will accelerate and simplify the process of design and construction of parts, reduce the costs of approbation and allow to implement the developed technology in the shortest possible time on operating machines with dynamic loads.

Keywords: reinforcing cage, foundation, coiling machine, 3D-modelling, ball mill

For citation

Gerasimenko P.A., Andreeva N.P., Gerasimenko T.E., Revo A.A. Development of Technology and Equipment for Strengthening the Foundation of Ball Mill. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 169-177. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-169-177>

Введение

При проектировании фундаментов машин с динамическими нагрузками, в том числе фундаментов машин с вращающимися частями, машин с кривошипно-шатунными механизмами, кузнечных молотов, дробильного, прокатного, прессового оборудования, мельничных установок и др., должен быть обеспечен соответствующий контроль качества при производстве строительных изделий и выполнении работ на строительной площадке. Фундаменты машин с динамическими нагрузками следует проектировать с учетом требований нормативных документов [1-5]. Техническое обслуживание фундаментов машин с динамическими нагрузками и связанных с ними инженерных систем и машин должно обеспечивать их безопасность и рабочее состояние на весь срок эксплуатации. Все используемые материалы и изделия должны удовлетворять требованиям проекта и технических условий.

Фундаменты машин с динамическими нагрузками должны проектироваться с учетом условий их эксплуатации, действующих нагрузок и влияния строящихся и реконструируемых фундаментов близлежащих машин. Также должны быть предусмотрены решения, обеспечивающие надежность, долговечность

и экономичность на всех стадиях строительства и эксплуатации этих фундаментов. При этом необходимо проводить технико-экономическое сравнение возможных вариантов проектных решений для выбора оптимального решения, обеспечивающего наиболее полное использование прочностных и деформационных характеристик конструкций.

Армирование фундамента шаровой мельницы позволяет равномерно распределить нагрузку по всей опорной поверхности, предотвратить появление трещин и изломов, повысить его прочность, устойчивость к температурным изменениям и различным видам динамических нагрузок.

Теоретические положения и аналитический обзор

Функция фундамента шаровой мельницы заключается в поддержании и распределении нагрузки на всю площадь основания [6, 7]. Основной причиной разрушения фундаментов шаровых мельниц является их повышенная вибрация. Применяемые способы усиления фундаментов являются в основном конструктивными и включают в себя увеличение массы фундамента или отдельных его частей, а также повышение жесткости его отдельных элементов или всего фундамента в целом. Повышенные вибрации

фундаментов приводят не только к нарушению нормальной работы машин, но и к разрушению самих фундаментов в результате образования в них трещин и даже расчленения их на отдельные конгломераты.

Известны случаи усиления фундамента шаровой мельницы, испытывающего значительную вибрацию, при которой амплитуды колебаний верхнего обреза опор в горизонтальном и вертикальном направлениях составляли 0,5–0,6 мм, превышая допустимые [7]. Для усиления фундамента и повышения жесткости опорных пилонов были выполнены железобетонные обоймы по их периметру на всю высоту толщиной 300 мм, а верхние части опор вместе с обоймами были дополнительно связаны горизонтальной железобетонной плитой толщиной 500 мм. После усиления фундамента, ставшего коробчатой конструкцией, амплитуда колебаний верхнего обреза его уменьшилась в два раза.

При значительных деформациях фундаментов большого размера и сложной конфигурации, таких, например, как фундаменты дробильного оборудования при каскадной технологической схеме или фундаменты подвального типа под мощные машины с вращающимися частями, применять для восстановления их целостности только обойму недостаточно.

Здесь требуется осуществлять комплекс восстановительных мероприятий.

В отдельных случаях усиление фундамента, введенного на песчаном грунте, осуществляли путем устройства по его периметру железобетонной обоймы, опирающейся на буронабивные сваи диаметром 500 мм и длиной 3 м, которые передавали нагрузку от фундамента на элювиальный грунт ненарушенной структуры [7]. После усиления фундамента амплитуда колебаний и вибрация конструкции машины уменьшились до допускаемых нормативными документами пределов.

Также известны способы усиления фундамента машин с динамическими нагрузками, заключающиеся в инъектировании подвижного цементно-песчаного раствора в грунтовое основание под подошвой или бетонной подготовкой ростверка через введенные туда инъекторы [8, 9] (рис. 1).

Согласно способу усиления свайного фундамента на поверхности основания под будущим ростверком 2 образуют горизонтальные U-образные пазы 9, конфигурацией, длиной, шириной и высотой такой, чтобы там свободно размещались U-образные металлические инъекционные трубы 5.

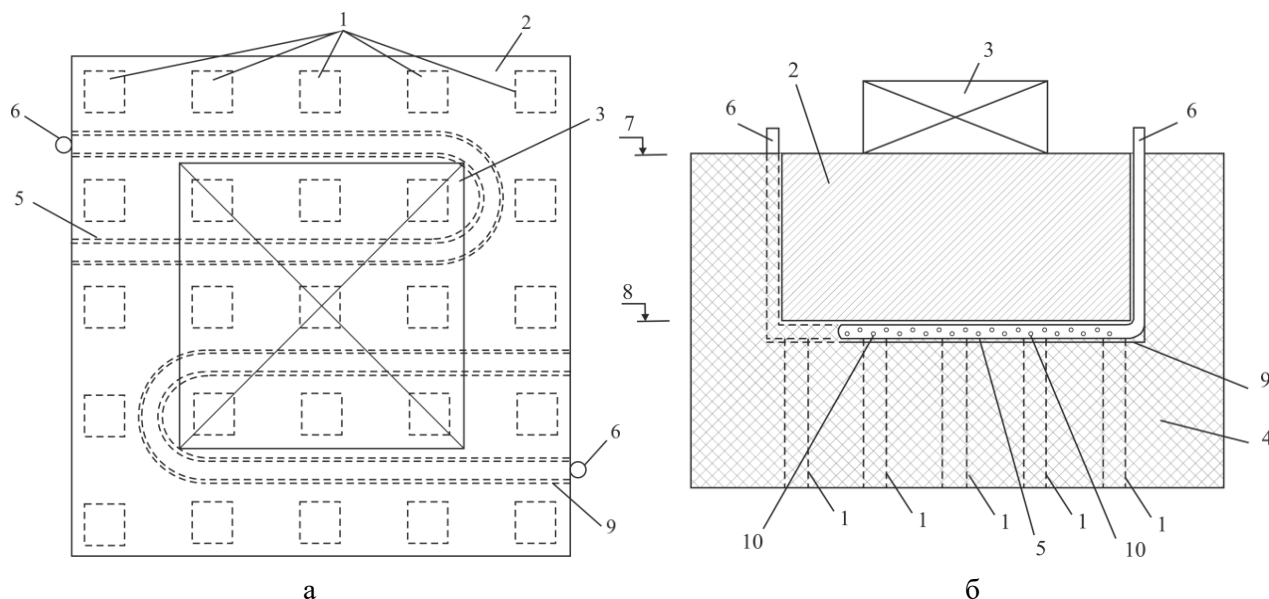


Рис. 1. Схема свайного фундамента: а – вид сверху; б – разрез по А-А; 1 – сваи; 2 – ростверк; 3 – машина с динамическими нагрузками; 4 – грунтовое основание; 5 – инъекционные U-образные трубы; 6 – вертикальные выпуски инъекционных труб; 7 – уровень верхнего обреза ростверка; 8 – уровень подошвы ростверка; 9 – горизонтальные U-образные пазы; 10 – перфорационные отверстия труб

Fig. 1. Scheme of the pile foundation: а is top view; б is section A-A; 1 is piles, 2 is the foundation footing, 3 is dynamic load machine, 4 is soil base, 5 is jet U-shaped pipes; 6 is vertical outlets of jet pipes, 7 is level of the top cut of the foundation footing, 8 is level of the foundation footing, 9 is horizontal U-shaped grooves, 10 is perforation holes of pipes

Перед укладкой U-образных инъекционных труб 5 в горизонтальные U-образные пазы их оборачивают тонкой бумагой или тонкой полимерной пленкой для предотвращения забивания перфорационных отверстий 10 инъекционных труб 5 бетоном при изготовлении ростверка 2. После погружения свай 1 возводят ростверк 2, включающий установку опалубки, укладку арматурных стержней и закладных деталей, и его последующее бетонирование. После набора бетоном ростверка расчетной прочности на нем устанавливают машину с динамическими нагрузками. В процессе устройства свайного фундамента 1 и ростверка 2 и эксплуатации машины вся нагрузка передается на сваи 1, в результате чего грунт под подошвой ростверка 2 остается неуплотненным. Как следствие, при колебаниях между подошвой ростверка 8 и грунтовым основанием 4 контактная поверхность нарушается, что приводит к возникновению зазоров. Для ликвидации зазоров производят нагнетание подвижного цементно-песчаного раствора под подошву ростверка 8 с помощью горизонтальных U-образных инъекционных труб 5. После затвердевания инъектированного раствора несъемные U-образные инъекторы 5 выполняют роль горизонтальной арматуры, закрепленной под ростверком. Данный способ усиления фундамента позволяет ликвидировать зазоры между подошвой ростверка и грунтом основания, уплотнить грунты основания свайного фундамента и увеличить массу колеблющейся системы за счет вовлечения дополнительного объема грунта. Такое техническое решение позволяет существенно снизить амплитуду колебаний свайных фундаментов от 1,8 до 2,6 раза.

Способы, применяемые для усиления фундамента шаровых мельниц, являются в основном конструктивными [10, 11]. Следует отметить, что увеличение массы фундамента существенно влияет на уменьшение амплитуды его колебаний лишь тогда, когда дополнительная масса составляет 50–80% основной. Эффективным способом является повышение жесткости основания путем увеличения площади подошвы фундамента с одновременным увеличением его массы, так как при этом повышается частота собственных колебаний фундамента, удаляясь от рабочей частоты колебаний машины.

Наиболее действенным способом восстановления целостности разрушенных фундаментов машин, а также увеличения жесткости основания фундамента путем уширения его подошвы с одновременным увеличением его массы является устройство жестких обойм (бандажей, поясов, рубашек), охватывающих либо весь фундамент, либо отдельные его части. При этом обеспечивается не только увеличение сечения фундамента и передача нагрузок на новую часть его,

но и соединение деформированного фундамента в единое целое.

В случае применения железобетонных обойм происходит обжатие поврежденных частей фундамента, что способствует надежному соединению бетона фундамента и бетона усиления в единую конструкцию. Армирование обойм выполняют рабочими стержнями диаметром 12–20 мм из стали класса А2.

Результаты и их обсуждение

Для усиления фундамента шаровой мельницы предложено использовать арматурный каркас, который состоит из пружины 1, растянутой с образованием последовательных петель и металлических стержней 2, вставленных в петли пружины 1, образуя модуль [12] (рис. 2).

Данный арматурный каркас позволит повысить прочность за счет соединения модулей в виде многогранника или усиления его одной и более пружинами, снизить себестоимость за счет простоты сборки модулей и отсутствия дополнительной операции, связанной с креплением стержней каркаса к пружине, а также снизить затраты на транспортировку и повысить ее удобство, так как рабочее положение пружине придется непосредственно в месте возведения строительной конструкции.

Арматурный каркас используют следующим образом. Пружину 1 растягивают в продольном направлении с образованием последовательных петель. Затем в петли вставляют металлические стержни 2 и образуют модуль арматурного каркаса. При необходимости увеличения жесткости модуля его снабжают дополнительными пружинами 3, расположенными X-образно на металлических стержнях 2. Для увеличения прочности строительной конструкции модули соединяют между собой в виде многоугольников, например треугольника, квадрата, прямоугольника, в зависимости от заданной формы строительной конструкции.

Для изготовления пружины 1 был разработан навивочный станок (рис. 3), который содержит навивочный блок 1, станину 2, привод 3 и неподвижный полый цилиндр 4 с криволинейными торообразными направляющими 5, установленный на станине 2. На навивочном блоке 1 закреплены съемные оправки для навивки 6, пенал 7 и прижимной механизм 8. Внутри пенала 7 размещены рейки 9, установленные с возможностью возвратно-поступательного перемещения от направляющих 5 цилиндра 4 параллельно корпусу пенала 7. На концах реек 9 закреплены упорные ролики 10. Прижимной механизм 8 снабжен блоками шестеренок 11, соединенными зубчатой передачей с рейками 9 пенала 7 и прижимными суппортами 12.

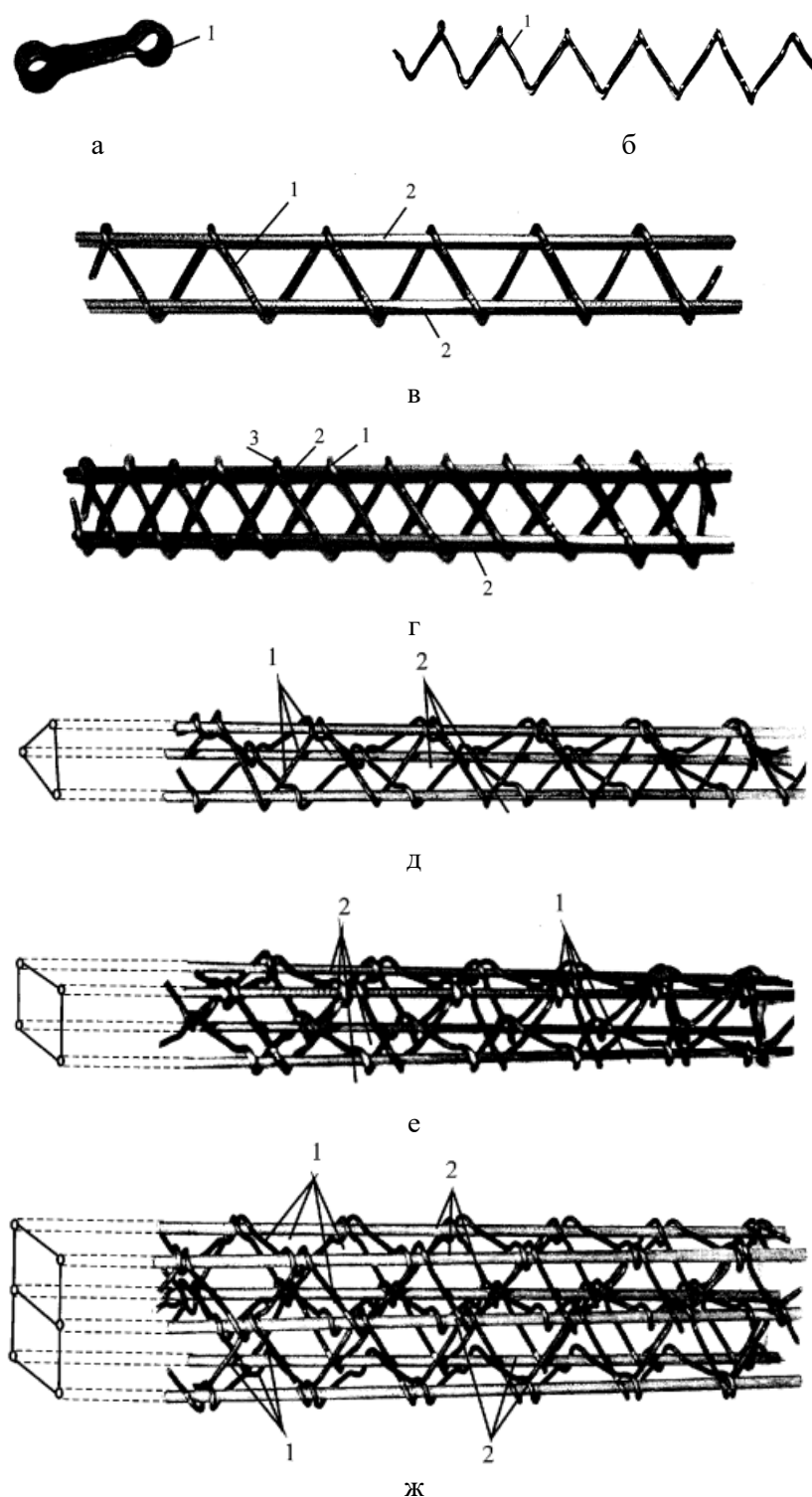


Рис. 2. Арматурный модульный каркас: а – в сжатом виде; б – в растянутом виде; в – облегченный с вставленным стержнем; г – усиленный с вставленным стержнем; д – усиленный треугольного профиля; е – усиленный прямоугольного профиля; ж – усиленный многосекционный

Fig. 2. Reinforcing modular cage: а is in compressed form, б is in tensile form, в is lightened with inserted rod, г is reinforced with inserted rod, д is reinforced triangular profile, е is reinforced rectangular profile, ж is reinforced multi-sectional one

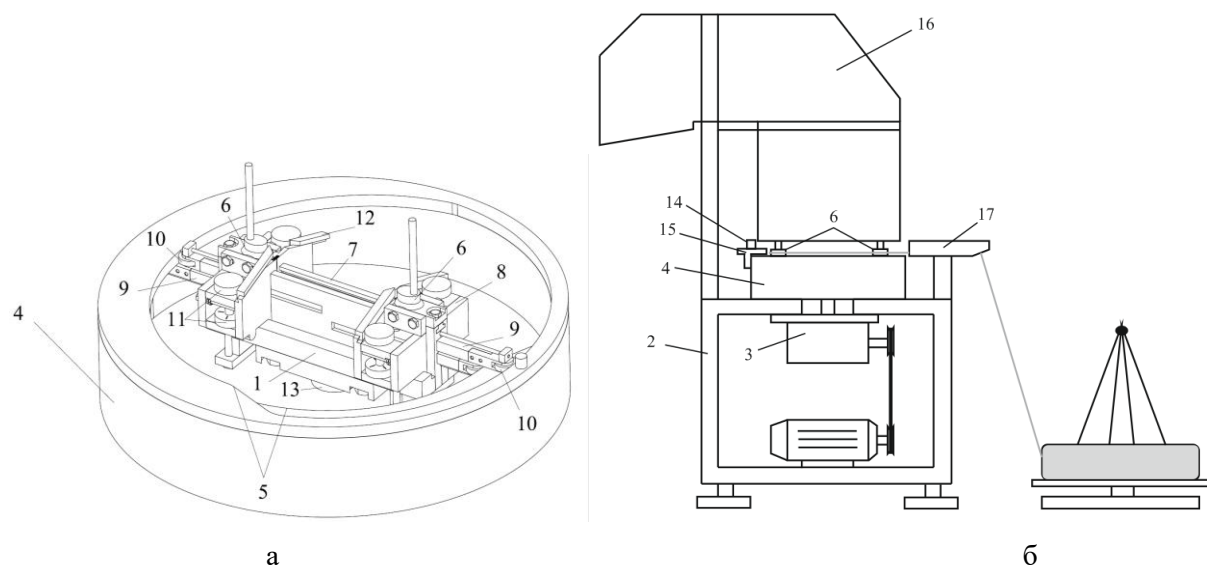


Рис. 3. Станок для изготовления арматурного каркаса заданного профиля: а – навивочный цилиндр; б – общий вид станка

Fig. 3. Machine for manufacturing of reinforcing cage of a given profile: а is coiling cylinder, б is general view of the machine

Навивочный блок 1 жестко закреплен на ступице 13, установленной на приводе 3. На цилиндре 4 установлены устройство счета оборотов 14 и отрезной механизм 15. На станине 2 закреплен рукав 16 для съема элементов арматурного каркаса и натяжной механизм 17. Привод 3 снабжен вариатором для регулирования скорости вращения.

Навивочный станок работает следующим образом. Проволоку подают через натяжной механизм 17, укладывают между оправкой 6 и прижимным суппортом 12 и включают привод 3. Навивочный блок 1 начинает вращаться в непрерывном режиме, при этом проволока наматывается на оправки 6. При вращении навивочного блока 1 внутри цилиндра 4 упорные ролики 10 движутся по направляющим 5. При этом через рейки 9 и блок шестеренок 11 с помощью зубчатой передачи движение передается прижимным суппортам 12, которые, в свою очередь, обжимают, натягивают, изгибают проволоку, придавая ей заданный профиль, и продвигают снизу вверх. Количество витков определяют необходимой длиной элемента арматурного каркаса, отсчитывают их с помощью устройства счета оборотов 14, и обрезают проволоку отрезным механизмом 15, а навивочный блок 1 продолжает вращаться, наматывая на оправки 6 последующую партию проволоки. Готовый элемент перемещается по рукаву 16 к месту складирования. Наличие рукава 16 позволит повысить безопасность при эксплуатации, так как обрезку проволоки и транспортировку готового элемента арматурного каркаса осуществляют в закрытом пространстве. Остановку станка производят только при переналадке, связанную с заменой оправок 6 для изготовления элементов арматур-

ного каркаса другого типоразмера, или в связи со сменой проволоочной бухты.

Использование предлагаемого станка позволит повысить производительность изготовления арматурного каркаса, расширить технологические возможности, снизить трудо- и энергозатраты и улучшить эксплуатационные характеристики. В рамках выполнения работы была подана заявка на изобретение №2024129560 от 02.10.2024 г. и получен патент [13]. На рис. 4 представлена 3D-модель навивочного станка, выполненная в программном комплексе САПР – SolidWorks для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства [14, 15]. Разработанная 3D-модель навивочного станка позволила проработать взаимодействие элементов конструкции и создать анимацию его работы. Анимационная модель демонстрирует процесс навивки проволоки с помощью натяжного механизма, укладку ее в оправку и формирование заданного профиля прижимными суппортами, которые поочередно приводятся в движение с помощью цилиндра и множественных зубчатых передач.

Созданная 3D-модель может быть представлена в виде конструкторских чертежей, содержащих необходимые данные для разработки и изготовления готового изделия перед началом серийного выпуска. Конструкторские чертежи, созданные в программном комплексе САПР – SolidWorks, позволят проанализировать работоспособность механизмов станка и протестировать их работу без выполнения множественных аппробаций, значительно ускорят и упростят проектную стадию конструкторской документации [16-18].

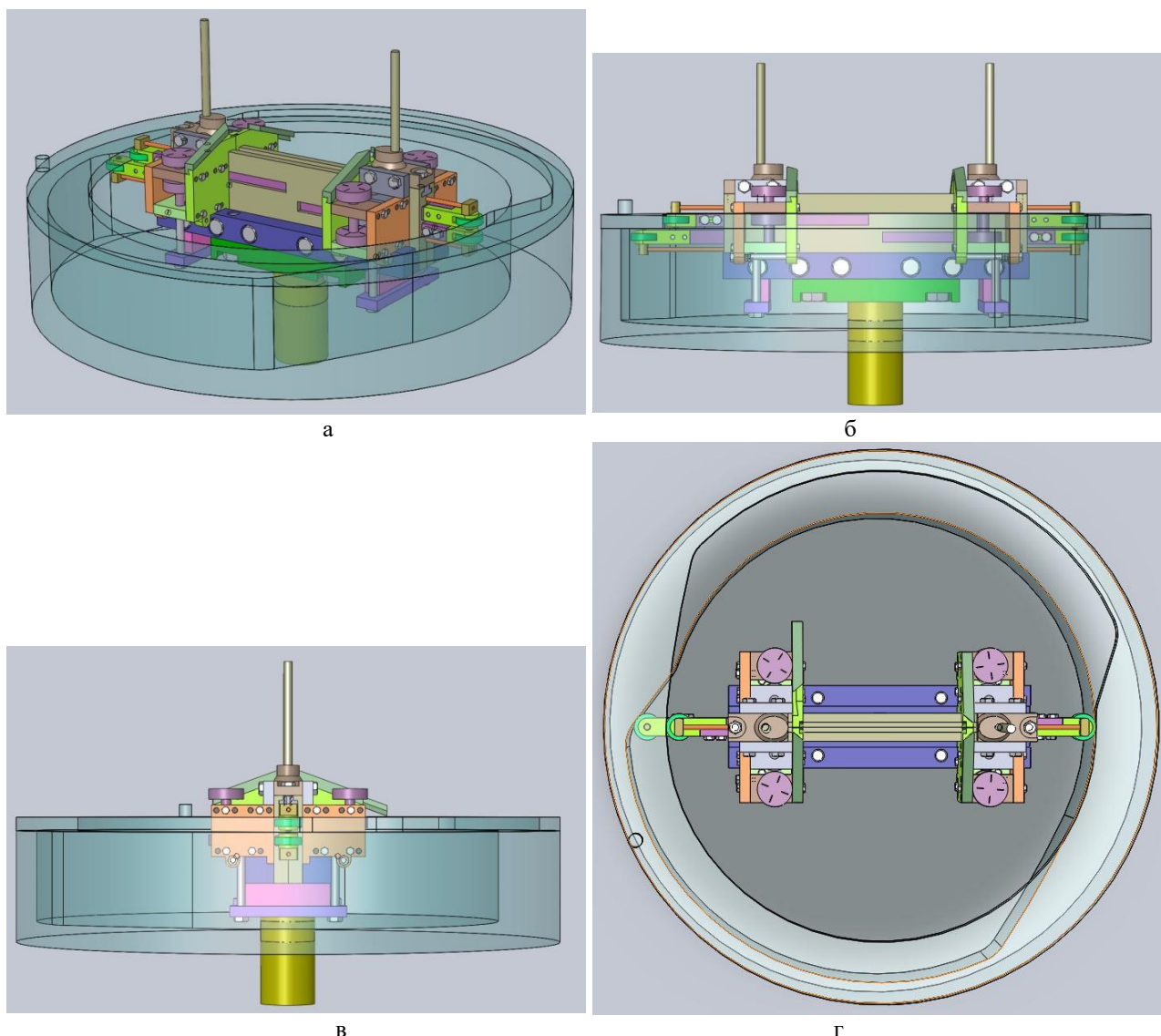


Рис. 4. 3D-модель навивочного цилиндра в программном комплексе САПР – SolidWorks: а – аксонометрия; б – фронтальная проекция; в – профильная проекция; г – горизонтальная проекция

Fig. 4. 3D-model of coiling cylinder in CAD software SolidWorks: а is axonometry, б is frontal projection, в is profile projection, г is horizontal projection

Заключение

Фундаменты машин с динамическими нагрузками, таких как шаровые мельницы, должны проектироваться с учетом условий их эксплуатации, действующих нагрузок, обусловленных повышенной вибрацией. Техническое обслуживание фундаментов машин с динамическими нагрузками и связанных с ними инженерных систем и машин должно обеспечивать их безопасность и рабочее состояние на весь срок эксплуатации. Все используемые материалы и изделия должны удовлетворять требованиям проекта и технических условий.

Проведенные патентные исследования и аналитический обзор способов усиления фундаментов шаровых мельниц показали, что нет единообразного

способа усиления фундамента шаровых мельниц, работающих в многообразных условиях эксплуатации. Наиболее действенным способом сохранения целостности фундаментов, а также увеличения жесткости основания фундамента является уширение его подошвы с одновременным увеличением его массы. Выполняют монтаж жестких обойм (бандажей, поясов, рубашек), охватывающих либо весь фундамент, либо отдельные его части. Армирование позволяет осуществить обжатие всех частей фундамента, что способствует надежному соединению бетона фундамента и бетона усиления в единую конструкцию.

Предложен способ усиления фундамента шаровой мельницы с применением арматурного модульного каркаса различной конфигурации и конструкция станка для его изготовления, позволяющего произво-

дить намотку непосредственно на месте проведения строительных и монтажных работ.

Спроектирована 3D-модель навивочного станка для изготовления арматурного каркаса, выполненная в программном комплексе SolidWorks, визуализирующая взаимодействие элементов конструкции в виде анимационной презентации и позволяющая значительно ускорить и упростить проектную стадию разработки конструкторской документации.

Список источников

- СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. М.: Стандартинформ, 2018. 22 с.
- СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.
- СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. М.: Минстрой России, 2017. 148 с.
- СП 26.13330.2012. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093044> (дата обращения: 23.02.2025).
- ГОСТ 12.1.012. ССБТ. Вибрация. Общие требования безопасности. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200059881> (дата обращения: 23.02.2025).
- Основания и фундаменты. Справочник по общестроительным работам / под ред. М.И. Смородинова. М.: Стройиздат, 1974. 372 с.
- Швец В.Б., Феклин В.И., Гинзбург Л.К. Усиление и реконструкция фундаментов. М.: Стройиздат, 1985. 204 с.
- Пат. 2722905 Российская Федерация. МПК E02D 27/44. Способ устройства свайного фундамента под машины с динамическими нагрузками и виброчувствительное оборудование / Нуждин Л.В., Нуждин М.Л., Габибов Ф.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)». № 2019122509; заявл. 15.07.2019; опубл. 04.06.2020.
- Пат. 2724819 Российская Федерация. МПК E02D 27/44. Способ устройства свайного фундамента под машины с динамическими нагрузками и виброчувствительное оборудование / Нуждин Л.В., Нуждин М.Л., Габибов Ф.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)». № 2019122508; заявл. 15.07.2019; опубл. 25.06.2020.
- Study on shock vibration analysis and foundation reinforcement of large ball mill / Qu Tie, Tang Biliang, Bian Qiang, Zhang Xiangyun, Chen Ming, Zhao Chunjiang // Scientific Reports. 2023, vol. 13, no. 193. DOI: 10.1038/s41598-022-26194-y.
- Reddeppa N., Reddy B. J., Rao H. S. Coal mill foundation-A finite element approach for study of dynamic analysis // Eng. Sci. 2021, no. 6(4), pp. 82–99.
- Пат. 83265 Российская Федерация. МПК E04C 5/00, E04C 5/06. Арматурный каркас / Базаев Л.Х., Базаев Б.Л.; заявитель и патентообладатель Базаев Лёма Хамидович. № 2009100687/22; заявл. 11.01.2009; опубл. 27.05.2009.
- Пат. 2834799 Российская Федерация. МПК B21F 3/04. Станок для изготовления элемента арматурного каркаса заданного профиля / Герасименко П.А., Выскребенец А.С., Кибизов С.Г., Андреева Н.П., Герасименко Т.Е.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ). № 2024129560; заявл. 02.10.2024; опубл. 14.02.2025.
- Перепелкин М.А., Мокрицкая Н.И. Современные методы проектирования и изготовления нестандартных деталей транспортно-технологических машин и комплексов // Горная промышленность. 2019. №1(143). С. 87-88. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2019-1-143-87-88>.
- Бочарова Н.В. О моделировании деталей машин в SolidWorks и визуализации движения механизма // Международный научно-технический сборник. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2022. Т.36. С. 215-218.
- Князков В.В., Фазлулин Э.М. Геометрическое моделирование в SolidWorks // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. Т.8. № 1-5. С. 170-176. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67541>.
- Michael J. Rider Ph.D. Designing with SOLIDWORKS 2024. March 26, 2024, 356 p.
- Lani Tran CSWE. Mastering Modern CAD Drawings with SOLIDWORKS 2024. April 24, 2024, 400 p.

References

- Code of Regulations 20.13330.2016. Loads and impacts. Moscow: Standardinform, 2018, 22 p. (In Russ.)
- Code of Regulations 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Moscow: Standard-Tinform, 2019, 12 p. (In Russ.)
- Code of Regulations 16.13330.2017. Steel structures. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2017, 148 p. (In Russ.)
- Code of Regulations 26.13330.2012. Foundations of machines with dynamic loads. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200093044> (Accessed February 23, 2025). (In Russ.)
- State standard GOST 12.1.012. SSBT. Vibration. General safety requirements. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200059881> (Accessed February 23, 2025). (In Russ.)
- Smorodinov M.I. *Osnovaniya i fundamenti. Spravochnik po obshchestroitel'nyim rabotam* [Foundations. Reference book on general construction works]. Moscow: Stroyizdat, 1974, 372 p. (In Russ.)
- Shvets V.B., Feklin V.I., Ginzburg L.K. *Usilenie i rekonstruktsiya fundamentov* [Strengthening and Reconstruction of Foundations]. Moscow: Stroyizdat, 1985, 204 p. (In Russ.)
- Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L., Gabibov F.G. *Sposob ustroystva svainogo fundamenta pod mashiny s dinamicheskimi nagruzkami i vibrochuvstvitel'noe oborudovanie* [Method of pile foundation arrangement under machines with dynamic loads and vibration-sensitive equipment]. Patent RF, no. 2722905, 2020.
- Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L., Gabibov F.G. *Sposob ustroystva svainogo fundamenta pod mashiny s dinamicheskimi nagruzkami i vibrochuvstvitel'noe oborudovanie* [Method of pile foundation arrangement under machines

- with dynamic loads and vibration-sensitive equipment]. Patent RF, no. 2724819, 2020.
10. Qu Tie, Tang Biliang, Bian Qiang, Zhang Xiangyun, Chen Ming, Zhao Chunjiang. Study on shock vibration analysis and foundation reinforcement of large ball mill. *Scientific Reports*. 2023;13(193). DOI: 10.1038/s41598-022-26194-y.
 11. Reddeppa N., Reddy B.J., Rao H.S. Coal mill foundation- A finite element approach for study of dynamic analysis. *Eng. Sci.* 2021;6(4):82-99.
 12. Bazaev L.Kh., Bazaev B.L. *Armaturniy karkas* [Reinforcing cage]. Patent RF, no. 83265, 2009.
 13. Gerasimenko P.A., Vyskrebets A.S., Kibizov S.G., Andreeva N.P., Gerasimenko T.E. *Stanok dlya izgotovleniya elementa armaturnogo karkasa zadannogo profilya* [Machine for manufacturing a reinforcing cage element of a given profile]. Patent RF, no. 2834799, 2025.
 14. Perepelkin. M.A., Mokritskaya N.I. Modern methods of design and manufacturing of non-standard parts of transport-technological machines and complexes. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry], 2019;1(143):87-88. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2019-1-143-87-88>. (In Russ.)
 15. Bocharova N.V. On modelling of machines details in SolidWorks and visualisation of mechanism movement. *Mezhdunarodniy nauchno-tehnicheskiy sbornik* [International scientific and technical collection]. Minsk: Belarusian National Technical University, 2022, vol. 36, pp. 215-218. (In Russ.)
 16. Knyazkov V.V., Fazlulin E.M. Geometrical Modelling in SolidWorks. *Izvestiya MGTU "MAMI"* [Izvestiya MSTU "MAMI"]. 2014;8(1-5):170-176. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-67541>. (In Russ.)
 17. Michael J. Rider Ph.D. Designing with SOLIDWORKS 2024. March 26, 2024, 356 p.
 18. Lani Tran CSWE. Mastering Modern CAD Drawings with SOLIDWORKS 2024. April 24, 2024, 400 p.

Поступила 11.03.2025; принята к публикации 26.05.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 11/03/2025; revised 26/05/2025; published 30/09/2025

Герасименко Павел Алексеевич – магистрант,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия.
Email: pa_gerasimenko@mail.ru.

Андреева Наталья Павловна – магистрант,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия.
Email: nata_gerasimenko2002@mail.ru.

Герасименко Татьяна Евгеньевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия.
E-mail: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

Рево Алексей Альбертович – кандидат технических наук,
доцент кафедры теоретической и прикладной механики,
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Владикавказ, Россия.
Email: cavcundar@mail.ru.

Pavel A. Gerasimenko – Master's Student,
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
Email: pa_gerasimenko@mail.ru.

Natalia P. Andreeva – Master's Student,
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
Email: nata_gerasimenko2002@mail.ru.

Tatiana E. Gerasimenko – PhD(Eng.), Lead Researcher,
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
Email: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

Alexey A. Revo – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics,
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia.
Email: cavcundar@mail.ru.

ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ INDUSTRIAL ECOLOGY IN METALLURGY

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 504.064
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-178-186



ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В ГОРОДЕ МАГНИТОГОРСКЕ НА ОСНОВЕ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Лимарев А.С., Сомова Ю.В., Волкова Е.А.

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

Аннотация. В последнее время на самых высших уровнях государственного управления нашей страны проводят целенаправленную работу по улучшению экологической обстановки в городах. В конечном итоге это повлияет на повышение качества жизни и здоровье населения. Поэтому в ряде городов Российской Федерации реализуется проект «Чистый воздух», в рамках которого выполняется комплекс мероприятий, направленных на снижение совокупного выброса загрязняющих атмосферу веществ в крупных промышленных центрах. В результате проведения работ на основе системного и независимого сбора информации были определены основные источники загрязнения в г. Магнитогорске. Анализ полученных данных показал, что наибольшее негативное влияние на окружающую среду в городе оказывают крупные промышленные предприятия, автомобильный транспорт, работа систем жилищно-коммунального хозяйства, жилой сектор и садоводческие товарищества. Если влияние организаций и предприятий носит в основном локальный характер, то автомобили осуществляют выбросы выхлопных газов на всей территории города. Особенно сильно это воздействие наблюдается при существенном скоплении транспорта на перекрестках, в местах замедления движения, возле торговых центров и т. п. Поэтому рост количества транспортных средств приводит к ухудшению экологической ситуации. Это требует разработки соответствующих мероприятий, направленных на снижение выбросов автомобилей. Среди достаточно большого объема возможных действий наиболее перспективным представляется развитие транспорта на электрической тяге. Рассмотренные в статье достоинства и недостатки данного вида решения показали, что переход на электромобили является наиболее перспективным вариантом в условиях города. Для этого требуется создание соответствующей инфраструктуры, обеспечивающей возможность комфортной эксплуатации и обслуживания электромобилей, а также использование других средств мотивации, среди которых можно выделить субсидирование, льготы и др.

Ключевые слова: атмосферный воздух, электромобили, выбросы транспорта, источники загрязнения, городская среда, городская инфраструктура

© Лимарев А.С., Сомова Ю.В., Волкова Е.А., 2025

Для цитирования

Лимарев А.С., Сомова Ю.В., Волкова Е.А. Исследование уровня воздействия на окружающую среду и возможности улучшения экологической ситуации в городе Магнитогорске на основе развития электротранспорта // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 178-186. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-178-186>



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

ENVIRONMENTAL IMPACT STUDY AND OPPORTUNITIES FOR IMPROVING THE ENVIRONMENTAL SITUATION IN THE CITY OF MAGNITOGORSK BASED ON THE DEVELOPMENT OF ELECTRIC TRANSPORT

Limarev A.S., Somova Yu.V., Volkova E.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Recently, at the highest levels of government in our country, targeted work has been carried out to improve the environmental situation in cities. Ultimately, this will impact on improving the quality of life and health of the population. Therefore, in a number of cities of the Russian Federation, the “Clean Air” project is being implemented, within the framework of which a set of measures is being carried out aimed at reducing the total emissions of air pollutants in large industrial centers. As a result of the work, based on systematic and independent collection of information, the main sources of pollution in Magnitogorsk were identified. Analysis of the data obtained showed that the greatest negative impact on the environment in the city is exerted by large industrial enterprises, road transport, the operation of housing and communal services systems, the residential sector and gardening partnerships. If the influence of organizations and enterprises is mainly local in nature, then cars emit exhaust gases throughout the city. This impact is especially strong when there is a significant congestion of traffic at intersections, in places where traffic slows down, near shopping centers and etc. Therefore, an increase in the number of vehicles leads to a deterioration in the environmental situation. This requires the development of appropriate measures aimed at reducing vehicle emissions. Among the fairly large scope of possible actions, the development of electric transport seems to be the most promising. The advantages and disadvantages of this type of solution discussed in the article showed that the transition to electric vehicles is the most promising option in urban conditions. This requires the creation of an appropriate infrastructure that provides the possibility of comfortable operation and maintenance of electric vehicles, as well as the use of other means of motivation, among which are subsidies, benefits, etc.

Keywords: atmospheric air, electric vehicles, transport emissions, sources of pollution, urban environment, urban infrastructure.

For citation

Limarev A.S., Somova Yu.V., Volkova E.A. Environmental Impact Study and Opportunities for Improving the Environmental Situation in the City Of Magnitogorsk Based on the Development of Electric Transport. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 178-186. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-178-186>

Введение

В современных условиях развитие невозможно без удовлетворения потребностей общества. Поэтому в Российской Федерации на самых высших уровнях государственного управления проводят целенаправленную политику по улучшению экологической обстановки как в отдельных муниципалитетах, так и в стране в целом. С 2018 года в стране реализуется федеральный проект «Чистый воздух», в рамках которого выполняется комплекс мероприятий, направленных на снижение совокупного выброса загрязняющих веществ и повышение уровня экологической безопасности в крупных промышленных центрах [1]. Решение поставленных задач осуществляется на основе проведения комплекса запланированных мероприятий по уменьшению степени загрязнения атмосферного воздуха и повышению энергетической эффективности предприятий, включающих [2]:

- модернизацию промышленных предприятий и энергетических установок;

- развитие системы мониторинга качества воздуха;

- популяризацию использования экологически чистых технологий и развитие альтернативных источников энергии;

- расширение мероприятий по сбору и утилизации отходов;

- проведение образовательных и информационных компаний среди населения.

На сегодняшний день в проекте участвует более 40 городов, в которых реализуются широкомасштабные мероприятия по сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу. В число городов, на территории которых реализуется проект, входит г. Магнитогorsk, являющийся одним из крупнейших центров металлургической отрасли страны с высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха. К значимым загрязняющим факторам можно отнести промышленные предприятия города, среди которых ПАО «ММК». Кроме того, немалое влияние оказывают и другие источники вредных веществ, такие как предприятия

топливно-энергетического комплекса и коммунального хозяйства, автомобильный транспорт и другие автономные источники загрязнений.

Проект по экологическому мониторингу и исследованию состояния атмосферного воздуха г. Магнитогорска реализовывался ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» с 2020 по 2024 г. совместно с Российским экологическим движением. Основной целью проекта является определение и исследования источников загрязнения воздуха в городе для разработки и внедрения наиболее эффективных воздухоохраных технологических решений, обеспечивающих улучшение экологической ситуации [3]. Проведение такой работы возможно только на основе систематического мониторинга, что в конечном итоге обеспечит возможность достижения главного конечного результата проекта, а именно защиту здоровья проживающего в городе населения.

Материалы и методы исследования

Мониторинг и исследование состояния атмосферного воздуха г. Магнитогорска проводится с апреля 2021 года. Участвующие в проекте члены команды прошли обучение и получили допуск на право выполнения работ с использованием специализированного оборудования. Для проведения работ по исследованию состояния атмосферного воздуха г. Магнитогорска был выбран поверенный газоанализатор «Геолан-1П». Этот прибор предназначен для измерения концентрации 8 загрязняющих веществ в атмосферном воздухе: оксид углерода, оксид и диоксид азота, диоксид серы, сероводород, углеводороды, меркаптаны, фтороводород. Для изучения состояния и качества атмосферного воздуха и объективной оценки реального вклада в загрязнение атмосферы различных природопользователей рабочей группой был определен обширный перечень точек, охватывающий всю территорию города. При выполнении работы были идентифицированы первичные и вторичные источники негативного воздействия на основе системного и независимого сбора информации, что впоследствии позволило выделить среди них основные. В перечень интересующих потенциальных источников загрязнения вошли следующие объекты [3]:

- промышленные предприятия и площадки;
- автотранспорт и дороги;
- городские очистные сооружения, свалка;
- птицефабрика;
- садово-огородные товарищества;
- частный сектор и др.

Для полного охвата территории города были определены точки возможной локации источников загрязнения и составлен сезонный график проведения замеров. Проведение измерений загрязнения атмосферного воздуха г. Магнитогорска проводилось не только в местах, определенных графиком (всего 126 контрольных точек), но и на границах санитарно-защитных зон промышленных предприятий (**рис. 1**).

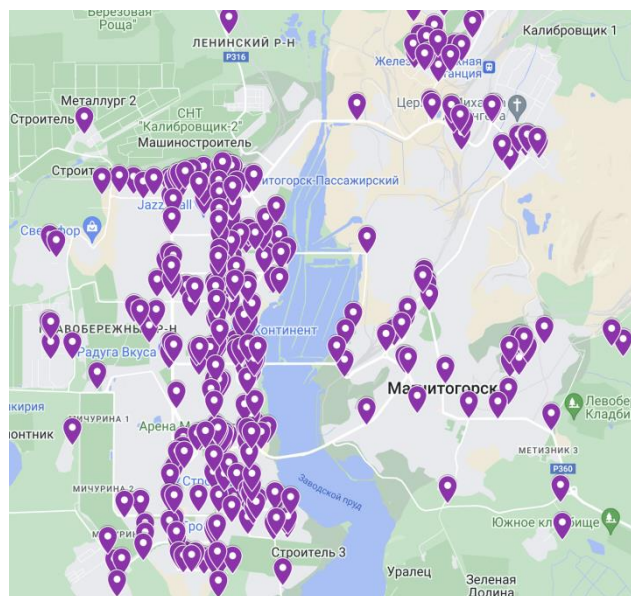


Рис. 1. Карта контрольных точек в г. Магнитогорске
Fig. 1. Map of control points in Magnitogorsk

Помимо измерений, выполняемых специалистами проекта, важным источником информации были сведения о нарушениях экологических требований предприятиями малого и среднего бизнеса, полученные от общественных активистов. Оперативные выезды по сигналам и жалобам жителей города в районы вредного воздействия производственных объектов позволили своевременно регистрировать отдельные загрязнения, вызванные нарушением природоохранного законодательства. В дальнейшем в этих местах сотрудники и волонтеры, участвующие в проекте, регулярно осуществляли контроль за состоянием воздуха. Для выявления автомобилистов, нарушающих природоохранное законодательство, проведение сезонных наблюдений в зонах наибольшего скопления автотранспорта проводилось с привлечением сотрудников ГИБДД. Особое внимание уделялось маршрутным микроавтобусам «Газель», осуществляющим движение с использованием газового топлива, а также автомобилям, направляющимся из города.

Анализ полученных за весь период наблюдений результатов позволил идентифицировать ряд наиболее существенных источников вредных веществ и разработать предварительные рекомендации для минимизации их негативного воздействия на атмосферный воздух и здоровье горожан. Во время проведения работы было установлено, что большее воздействие, чем крупные промышленные предприятия (ПАО «ММК», ОАО «ММК-МЕТИЗ», ООО «Магнитогорский цементно-огнеупорный завод» и др.), на жителей и гостей города оказывают автомобильный транспорт, работа систем жилищно-коммунального хозяйства (насосные и перекачивающие станции, коллекторы), жилой сектор (использование печного отопления, бани), садоводческие товарищества (сжи-

гание мусора на территории садов, использование удобрений и пестицидов) [3].

Полученные результаты и их обсуждение

В ходе проведения исследований был накоплен достаточно большой массив данных по загрязнению атмосферного воздуха города объектами и источниками, не относящимися к крупным промышленным предприятиям. По основным точкам загрязнения мониторинг выполнялся в летний, осенний и зимний периоды. Следует отметить, что выявленные источники загрязнения в основном являются локальными и влияют на качество воздуха преимущественно в месте своего расположения. В то же время автотранспорт загрязняет атмосферный воздух на всей территории города – на улицах, перекрестках, во дворах. По полученным данным за весь период наблюдения были отмечены значительные превышения допустимых норм по следующим веществам [3]:

- углеводородам – в 1,2–5,3 раза вблизи автодорог, перекрестков, автостоянок торговых центров и АЗС, что характеризует влияние источников автотранспорта и городской инфраструктуры;

- сероводороду – в 61,3–585 раза, меркаптанам – в 8,3–1890 раз и аммиаку – в 2,5–24 раза на территории частного сектора, садоводческих товариществ, в районах выхода канализационных коллекторов, предприятий малого бизнеса и др.

По полученным в результате мониторинга данным можно сделать вывод, что основным источником загрязнения воздуха в городе является автотранспорт. В часы пик по углеводородам отмечено превышение над нормативными значениями в 1,1–8,3 раза. Проведение замеров на парковках в некоторые периоды показывало превышение по C_xH_y в 1,2–4,2 раза. Подобные колебания можно объяснить предварительным прогревом двигателей в зимний период. При невысокой плотности автотранспорта возле торговых центров в дневные часы загрязнение атмосферы, как правило, остается в пределах нормы. В различное время суток вдоль автодорог города зафиксированы колебания содержания углеводородов C_xH_y от 13 до 693 мг/м^3 , что составляет от 0,1–3,5 ПДК_{м.р.}. Для всех этих точек характерно присутствие значительного количества автомашин, движущихся со скоростью, не превышающей 50 км/ч, а также наличие такого объекта инфраструктуры, как автовокзал.

Результаты мониторинга показали, что наибольшее содержание углеводородов в атмосферном воздухе г. Магнитогорска наблюдается в районах автодорог в местах наибольшего скопления автотранспорта в часы наивысшей плотности потока. Это характерно, прежде всего, для утренних и вечерних часов в будние дни, когда население города направляется на работу (утро) либо домой после работы (вечер). При проведении измерений газоанализатор фиксировал высокое содержание углеводородов во всех

точках замеров. В вечернее время содержание выше дневных значений в 4–6 раз.

В качестве возможных причин роста загрязнения атмосферного воздуха от автомобилей можно выделить увеличение их количества в городе за последнее десятилетие более чем в 1,5 раза. Экологичность современных автомобилей существенно возросла, но, несмотря на это, их выбросы по-прежнему содержат канцерогенные и токсичные вещества [4]. Состав выхлопных газов изменяется в зависимости от типа двигателя и включает порядка 250 химических веществ и их соединений. Среди них вещества как безвредные для организма человека (азот N_2 , кислород O_2 , водяные пары H_2O , углекислый газ CO_2 и др.), так и весьма токсичные соединения (оксид углерода CO , углеводороды C_xH_y , альдегиды $C_nH_{2n}O$, диоксид серы SO_2 , сажа, бензоапирен $C_{20}H_{12}$ и др.). Следует отметить, что осуществляемая в последние годы реконструкция городских дорог для уменьшения количества пробок также формирует не очень благоприятные условия для улучшения экологической обстановки. Это в значительной степени обусловлено уничтожением естественного барьера из деревьев между дорогой и пешеходной частью при расширении дорожного полотна.

Загрязнения выхлопными газами являются причиной многих заболеваний органов дыхания, которые при изменении могут привести к достаточно серьезным повреждениям организма. При длительном взаимодействии с загрязненной выхлопными газами средой происходит общее ослабление организма. Больше всего влиянию выбросов автомобилей подвергаются водители и пассажиры транспортных средств, долгое время находящиеся в пробках. Также от выхлопа страдают и пешеходы, особенно дети, поскольку наибольшая концентрация вредных веществ формируется в приземном слое атмосферы на уровне дыхательных путей ребенка [5, 6].

С целью улучшения экологической ситуации в городе необходимо осуществлять системную работу по проведению комплекса мероприятий, направленных на снижение выбросов автомобилей. В качестве таких мероприятий возможно проведение просветительской работы среди владельцев автомобилей для объяснения необходимости выполнения соответствующей регулировки двигателей, использования нейтрализаторов отработанных газов и выбора рационального режима двигателя. Наряду с этим, немаловажным фактором является минимизация количества и объединение в совместные поездки с соседями и коллегами. При передвижении на короткие дистанции возможно использование велосипеда или осуществление пеших прогулок. Следует отметить, что одной просветительской работой вопрос решить невозможно, поэтому в городе должна быть организована соответствующая инфраструктура, включающая организацию велосипедных и пешеходных дорожек, автосервисов по настройке двигателей и др. Снижению точек концентрации загрязнений также способ-

ствуется проведение соответствующих работ по изменению структуры парка автомобилей, организации дорожного движения и регулирования транспортных процессов, к которым отнести следующие:

- переход на альтернативные виды топлива;
- развитие дорожной сети и планирование городской инфраструктуры;
- повышение требований к выхлопам транспортных средств;
- развитие сети общественного транспорта;
- создание центров по координации дорожного движения.

В полной мере реализация представленных мероприятий не представляется возможной, поскольку сопряжено с необходимостью проведения достаточно большого объема проектных работ и существенных капиталовложений. Среди представленных решений достаточно перспективным является переход на альтернативные виды топлива, в частности газ или электроэнергию [7, 8]. Как показал опыт, переход на газовое топливо как с экологической, так и с экономической точки зрения не позволяет существенно улучшить ситуацию. Это обусловлено ограниченностью этого ресурса и достаточно высоким уровнем опасности, что требует серьезного контроля в этой сфере. Кроме того, автомобили с газовыми двигателями обладают хоть и меньшим по сравнению с двигателями внутреннего сгорания, но все же достаточно большим выбросом. В этой связи существенными преимуществами обладает электротранспорт с нулевым или минимальным количеством выбросов вредных веществ, включая углекислый газ, оксиды азота и твердые частицы [9-11].

В большинстве случаев под электромобилем принято считать транспортное средство, движущую силу в котором создаёт электродвигатель с независимым электропитанием, основным из которых на данный момент является аккумулятор. Как уже отмечалось, у электротранспорта нет выхлопных газов, что значительно снижает уровень загрязнения атмосферы и риск возникновения заболеваний дыхательных путей. Такой вид транспорта уменьшает выбросы парниковых газов и в результате способствует борьбе с негативными изменениями климата. В качестве дополнительного преимущества стоит отметить бесшумность, что обеспечивает снижение издаваемого шума и более комфортные условия для жителей городов [12].

При наличии большого количества положительных качеств со стороны экологии у электромобилей как в производстве, так и в эксплуатации имеются определенные недостатки. Основной проблемой является производство и утилизация аккумуляторов, сопровождающиеся множеством всевозможных выбро-

сов. Кроме этого, при рассмотрении электротранспорта также необходимо учитывать способ производства электроэнергии, поскольку порядка 25% загрязнения воздуха в России приходится именно на энергетическую отрасль [6]. Поэтому можно говорить о том, что количество выбросов электромобилей во многом определяется способом производства электроэнергии на рассматриваемой территории. Несмотря на это, с точки зрения улучшения атмосферного воздуха в г. Магнитогорске от применения такого транспорта можно ожидать достаточно хороший положительный эффект, поскольку значительная часть энергии вырабатывается за пределами города. Также стоит отметить, что вредного производства электромобилей и его компонентов в близлежащих районах нет. Увеличение количества транспорта на электричестве за счет традиционных автомобилей в городе приведет к существенному снижению выбросов при низкоскоростном движении на перекрестках и стоянках. В результате этого будет уменьшение вредного воздействия на каждого отдельного жителя города, что окажет положительное влияние на их здоровье [13].

Несмотря на существенные преимущества электромобилей относительно выбросов, все же остается важная экологическая проблема, которая еще не в полной мере решена. Во время движения происходит износ покрышек, в результате чего образуется пыль, которая переносится воздухом и постоянно находится в нем. Присутствие такой пыли в атмосфере отрицательно влияет на здоровье людей. У автомобилей с двигателями внутреннего сгорания также происходит истирание шин, но в электромобиле эти процессы ввиду наличия рекуперации происходят интенсивнее. Тем не менее переход на автомобили с электродвигателем в итоге дает неплохой положительный эффект и целесообразен для применения.

В пользу развития электромобилей в городе говорит и тот факт, что проблемой загрязнений атмосферного воздуха традиционными автомобилями на двигателях внутреннего сгорания занимаются на уровне правительства Российской Федерации. В стране постепенно вводятся обновленные экологические стандарты. Кроме того, вопросами снижения количества выбросов занимаются во многих регионах, что приводит к существенному росту электромобилей (**рис. 2**). В настоящее время в стране по данным аналитического агентства «Автостат» около 30 тыс. электромобилей. Самое большое их количество в Иркутской области, Приморском крае и г. Москве. Это можно объяснить двумя основными факторами: достаточно хорошей развитостью инфраструктуры и относительно высокой доступностью.

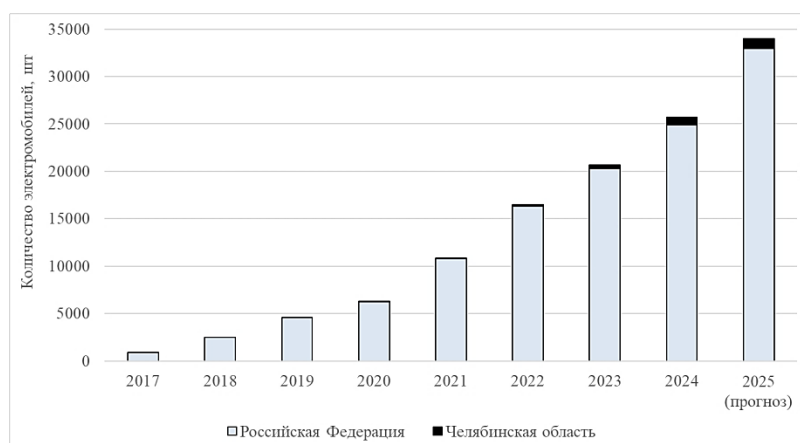


Рис. 2. Динамика роста электромобилей в России и Челябинской области
Fig. 2. Dynamics of growth of electric vehicles in Russia and the Chelyabinsk region

В Челябинской области, так же как и по всей стране, наблюдается рост электромобилей. Так, в 2020 году было зарегистрировано порядка 60, из них 4 в г. Магнитогорске. Уже в 2023 году в области насчитывалось порядка 385 единиц, а на начало 2024 количество автомобилей достигло 823, в том числе в г. Магнитогорске порядка 50 единиц. Таким образом, в городе, как и по всей стране, наблюдается существенный рост этого экологичного вида транспорта, что говорит о достаточно высоком интересе жителей к такому виду автомобилей. Несмотря на высокий рост, существует ряд факторов, сдерживающих развитие электротранспорта в городе. Одним из наиболее важных факторов является практически полное отсутствие электрозаправочных станций. Так, на сегодняшний день в г. Магнитогорске имеется всего 4 пункта зарядки электромобилей (рис. 3), что явно недостаточно. Следует отметить, что устанавливаемые электрозаправочные станции экологичны, соответствуют современным требованиям безопасности, энергоэффективны и подходят для всех существующих марок электромобилей. Тем не менее это является достаточно серьезной проблемой, тормозящей развитие электротранспорта в городе.

Для развития электротранспорта в городе необходимо развивать сеть зарядных электростанций. В 2024 году в области планируется запустить порядка 30 таких станций, но и этого скорее всего будет недостаточно для решения вопросов в этом направлении и улучшения экологической ситуации. Возможность более эффективного применения новых зарядных станций предполагает, что в них будет предусмотрена зарядка нескольких автомобилей. Также важное значение имеет и их расположение. Целесообразно осуществлять установку станций возле торговых площадей, бизнес-центров, магазинов и ресторанов. Установка мест для зарядки в жилых районах улучшит привлекательность покупки электромобилей для жителей многоквартирных домов. Это особенно важно, поскольку возможность полноценной постоянной

зарядки у них практически отсутствует, что сдерживает покупку. Наряду с этим развитие сети электрозаправочных станций, помимо комфортного передвижения благодаря возможности подзарядки в удобных местах, также способствует созданию рабочих мест и развитию экономики в целом.

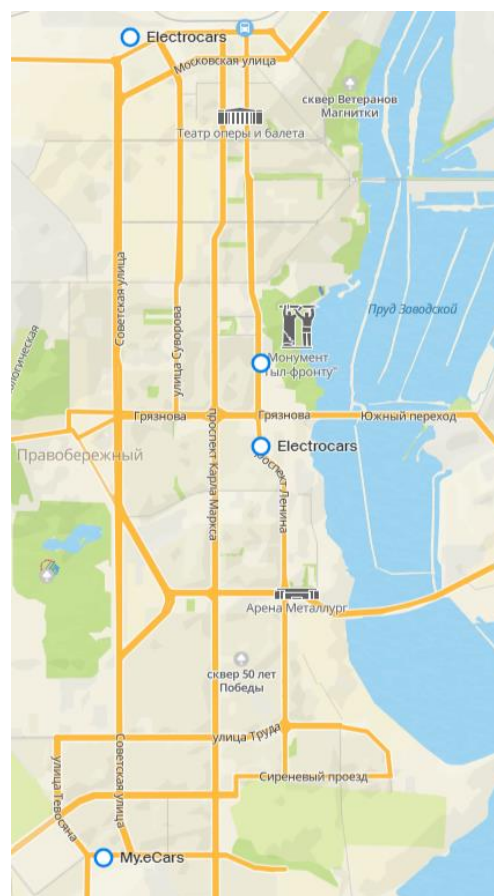


Рис. 3. Расположение электрозаправочных станций в г. Магнитогорске

Fig. 3. Location of electric filling stations in Magnitogorsk

Увеличение доли транспорта на электрической тяге приведет к суммарному уменьшению выбросов транспорта, что благоприятно скажется на экологической ситуации в городе. Это особенно актуально для мест скопления автомобилей на перекрестках, возле торговых центров, стоянках и пр. В этой связи целесообразна проработка вопроса по переходу муниципальных организаций на электротранспорт. Такой переход обеспечит не только положительное влияние на экологическую обстановку, но также и снизит расходы на топливо. По оценкам экспертов топливные расходы в этом случае могут уменьшиться примерно в 5 раз.

В качестве возможного направления развития электротранспорта, наряду с развитием инфраструктуры в городе, целесообразно рассмотреть вопрос об установке льготных тарифов для подзарядки. В этом случае перевозки станут более дешевыми, что способствует созданию парков электротакси. Также развитию электротранспорта способствует снижение или отмена транспортного налога и выделение специальных парковочных мест. При таком подходе благодаря снижению затрат на топливо станет более выгодным держать электромобили. В настоящее время успешно развиваются электромобильные такси, первое из которых было открыто в г. Нижний Новгород в начале 2023 года. Учитывая, что данное направление в стране пока не сильно развито, можно привлечь клиентов на относительной новизне и современных экотрендах. Парк такси с экологически чистым транспортом будет интересен прогрессивным жителям города, интересующимся инновационными технологиями и проявляющим заботу об экологической обстановке. При использовании таких автомобилей без длительного простоя его стоимость достаточно быстро окупится и начнет приносить прибыль.

Заключение

Таким образом, установлено, что одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха в г. Магнитогорске является автомобильный транспорт. Поэтому уменьшение количества выбросов этим источником загрязнения позволит существенно улучшить экологическую ситуацию в городе. Достаточно перспективным решением данного вопроса является увеличение доли транспорта на электротяге. Сами по себе электромобили не являются абсолютно экологичными, поскольку их производство оказывает существенную нагрузку на окружающую среду, а для движения используется производство электричества, которое также является источником загрязнения. Тем не менее для решения локальной задачи улучшения экологической ситуации в городе применение этого вида транспорта достаточно эффективно. Проведенный в статье анализ показал, что электрический транспорт обладает достаточно большим количеством преимуществ по сравнению с автомобилями на двигателях внутреннего сгорания.

Для развития электротранспорта в городе недостаточно проведения просветительской работы. Необходимо создание соответствующей инфраструктуры для зарядки и обслуживания частных автолюбителей и таксопарков. Также при разработке программы по развитию данного вида транспорта для создания мотивации по их приобретению необходимо предусмотреть различные виды стимулирования и льгот, поскольку немаловажным фактором, сдерживающим приобретение, является стоимость.

В пользу развития электромобилей говорит развитие научной и промышленной деятельности. На сегодняшний день существуют инновационные разработки батарей с повышенным уровнем безопасности, ресурса и более быстрой зарядки. Поэтому в краткосрочной перспективе стоимость электромобилей существенно уменьшится и к этому времени должна быть полностью подготовлена соответствующая инфраструктура для возможности комфортного их использования. Для достижения этого должна проводиться совместная просветительская и проектная деятельность жителей и соответствующих служб и организаций города. Все это позволит улучшить экологическую ситуацию в городе и повысить уровень качества жизни в г. Магнитогорске.

Список источников

1. Ревич Б.А., Харьков Т.Л., Кваша Е.А. Некоторые показатели здоровья жителей городов федерального проекта «Чистый воздух» // Анализ риска здоровью. 2020. № 2. С. 16-27. DOI: 10.21668/health.risk/2020.2.02. EDN VKGTJQ.
2. О ходе реализации федерального проекта «Чистый воздух» на территории города Омска / А.С. Крига, С.В. Никитин, Е.Л. Овчинникова [и др.] // Анализ риска здоровью. 2020. № 4. С. 31-45. DOI: 10.21668/health.risk/2020.4.04. EDN OFYLQU.
3. Экопост-Магнитогорск: итоги первого года работы / Э.А. Расулмухамедов, Е.А. Волкова, А.Ю. Перятинский [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20, № 2. С. 133-139. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-133-139. EDN DBXWQS.
4. Цгоев Т.Ф., Амбалов В.Б. Влияние состояния автотранспортной инфраструктуры на экологию города Владикавказ // Евразийский союз ученых. 2020. № 8-5(77). С. 39-44. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.5.77.991. EDN ULZWQN.
5. Грушников В.А. Разумная автомобилизация. Тенденции и инструменты контроля // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2017. № 2. С. 45-51. EDN XXZHTR.
6. Лагерева А.В., Ханаева В.Н. Возможные направления снижения выбросов парниковых газов от электростанций в России до 2050 г. // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2010. № 1. С. 50-58. EDN KZDWMH.
7. Лимарев А.С., Воротников М.Ю. Сравнительная оценка перспективности применения электромобилей на водородном топливном элементе // Мир транспорта.

2023. Т. 21, № 4(107). С. 99-105. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-4-11. EDN THZGHW.
8. Слутин А.Ф., Ручкина Л.Г., Бугреев В.А. Моделирование режимов движения и сравнительная оценка топливно-энергетической эффективности гибридного электробуса // Наука и техника транспорта. 2021. № 1. С. 51-56. EDN TEYBVR.
 9. Воротников М.Ю., Лимарев А.С., Мезин И.Ю. Сравнение эксплуатационных расходов электромобиля и автомобиля с двигателем внутреннего сгорания // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2021. № 10. С. 50-53. DOI: 10.36535/0236-1914-2021-10-9. EDN RJDKHU.
 10. Zhang L., Brown T., Samuelsen G.S. Evaluation of charging infrastructure requirements and operating costs for plug-in electric vehicles // Journal of Power Sources. 2013, vol. 240, pp. 515-524.
 11. Хазин М.Л., Штыков С. О. Карьерный электрифицированный транспорт // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16, № 1. С. 11-18. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-1-11-18. EDN YTLZMU.
 12. Ларин В. TESLA-электромобиль // Энергия: экономика, техника, экология. 2016. № 1. С. 69-72. EDN VWHQQH.
 13. Юсупова О.А. О проблемах и перспективах развития рынка электромобилей в России // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2022. № 2. С. 38-42. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-02-6. EDN YZOFXU.
 - Vladikavkaz. *Evraziyskiy soyuz uchenikh* [The Eurasian Union of Scientists], 2020;(8-5(77)):39-44. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.5.77.991. EDN ULZWQN. (In Russ.)
 5. Grushnikov V.A. Smart motorization. Trends and control tools. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchniy informatsionniy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection], 2017;(2):45-51. EDN XXZHTR. (In Russ.)
 6. Lagerev A.V., Khanaeva V.N. Possible directions for reducing greenhouse gas emissions from power plants in Russia until 2050. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy], 2010;(1):50-58. EDN KZDWMH. (In Russ.)
 7. Limarev A.S., Vorotnikov M.Yu. Comparative assessment of the prospects for using electric vehicles on hydrogen fuel cell. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation], 2023;21(4(107)):99-105. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-4-11. EDN THZGHW. (In Russ.)
 8. Slutin A.F., Ruchkina L.G., Bugreev V.A. Modeling of driving modes and comparative assessment of the fuel and energy efficiency of a hybrid electric bus. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport], 2021;(1):51-56. EDN TEYBVR. (In Russ.)
 9. Vorotnikov M.Yu., Limarev A.S., Mezin I.Yu. Comparison of operating costs of an electric car and a car with an internal combustion engine. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchniy informatsionniy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection], 2021;(10): 50-53. DOI: 10.36535/0236-1914-2021-10-9. – EDN RJDKHU. (In Russ.)
 10. Zhang L., Brown T., Samuelsen G.S. Evaluation of charging infrastructure requirements and operating costs for plug-in electric vehicles. *Journal of Power Sources*. 2013;240:515-524.
 11. Khazin M.L., Shtykov S.O. Quarry electrified transport. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018;16(1):11-18. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-1-11-18. EDN YTLZMU. (In Russ.)
 12. Larin V. TESLA electric car. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya* [Energy: economics, technology, ecology], 2016;(1):69-72. EDN VWHQQH. (In Russ.)
 13. Yusupova O.A. On the problems and prospects for the development of the electric vehicle market in Russia. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchniy informatsionniy sbornik* [Transport: science, technology, management. Scientific information collection], 2022;(2):38-42. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-02-6. EDN YZOFXU. (In Russ.)

References

1. Revich B.A., Kharkova T.L., Kvasha E.A. Some health indicators of residents of the cities of the federal project "Clean Air". *Analiz riska zdorovyu* [Health risk analysis], 2020;(2):16-27. DOI: 10.21668/health.risk/2020.2.02. EDN VKGTJQ. (In Russ.)
2. Kriga A.S., Nikitin S.V., Ovchinnikova E.L. et al. On the progress of the implementation of the federal project "Clean Air" in the city of Omsk. *Analiz riska zdorovyu* [Health risk analysis], 2020;(4):31-45. DOI: 10.21668/health.risk/2020.4.04. EDN OFYLQU. (In Russ.)
3. Rasulmukhamedov E.A., Volkova E.A., Peryatinskiy A.Yu. et al. Ecopost-Magnitogorsk: results of the first year of work. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2022;20(2):133-139. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-133-139. EDN DBXWQS. (In Russ.)
4. Tsgoev T.F., Ambalov V.B. The influence of the state of motor transport infrastructure on the ecology of the city of

Поступила 21.01.2025; принята к публикации 10.03.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 21/01/2025; revised 10/03/2025; published 30/09/2025

Лимарев Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий, сертификации и сервиса автомобилей, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: aslimarev@mail.ru. ORCID 0000-0002-1499-4988

Сомова Юлия Васильевна – кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: y.somova@magtu.ru. ORCID 0000-0003-0856-4612

Волкова Елена Александровна – кандидат технических наук, профессор РАЕ,
доцент кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: valena.dom@rambler.ru. ORCID 0009-0007-6997-2819

Alexander S. Limarev – PhD (Eng.), Associate Professor the Department of Technologies,
Certification and Automobile Service,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: aslimarev@mail.ru. ORCID 0000-0002-1499-4988

Yulia V. Somova – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial Ecology and Life Safety,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: y.somova@magtu.ru. ORCID 0000-0003-0856-4612

Elena A. Volkova – PhD (Eng.), Professor of the Russian Academy of Natural History,
Associate Professor of the Department of Industrial Ecology and Life Safety,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: valena.dom@rambler.ru. ORCID 0009-0007-6997-2819

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 669.1:004.9
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-3-187-194



АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ершов А.Н.

ООО «Объединенная сервисная компания», группа ПАО «ММК», Магнитогорск, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются актуальные проблемы развития предиктивной аналитики на предприятиях промышленности с учетом специфики и возможностей внедрения в Российской Федерации. Ключевым вызовом является необходимость сбора и обработки огромных массивов достоверных данных при минимальной нагрузке на вычислительную инфраструктуру. В качестве альтернативы полностью облачным решениям предлагается использование альтернативного построения архитектуры технических решений. В статье рассматриваются туманные и edge-вычисления, которые позволяют обрабатывать данные ближе к их источнику, снижая задержки и затраты. На основе практического опыта выделен комплекс проблем, сдерживающих развитие предиктивной аналитики в России: отсутствие системного подхода к внедрению, завышенные ожидания от готовых решений, неготовность предприятий к масштабной цифровой трансформации, сложности с обменом данными и использованием облачных решений. В заключение предлагаются пути решения, включая унификацию подходов к разработке устройств на «нижнем уровне» и протоколов передачи данных, стратегическое партнерство промышленных предприятий, а также создание обезличенных банков промышленных данных при государственной поддержке для совместной разработки и совершенствования прогнозных моделей.

Ключевые слова: предиктивная аналитика промышленного оборудования, интернет вещей (IoT), анализ больших данных, алгоритмы прогнозирования, туманные и edge-вычисления, искусственный интеллект, машинное обучение, предиктивное техническое обслуживание (PdM), промышленность 4.0, киберфизические системы, сбор данных, достоверность данных, аномалии данных, обработка данных, прогнозная модель, математическое моделирование, цифровая трансформация, отечественные разработки, системный подход, банки промышленных данных

© Ершов А.Н., 2025

Для цитирования

Ершов А.Н. Актуальные проблемы развития предиктивной аналитики в промышленности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №3. С. 187-194. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-187-194>



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

CURRENT ISSUES IN THE DEVELOPMENT OF PREDICTIVE ANALYTICS IN INDUSTRY

Ershov A.N.

United Service Company LLC, part of PJSC "MMK" Group, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The article examines current challenges in the development of predictive analytics at industrial enterprises, considering the specificities and implementation possibilities within the Russian Federation. A key challenge is the necessity to collect and process vast amounts of reliable data with minimal load on the computational infrastructure. As an alternative to purely cloud-native solutions the use of alternative technical solutions architecture is proposed. The article discusses fog and edge computing which enable data processing closer to its source reducing latency and costs. Based on practical experience a set of problems hindering the development of predictive analytics in Russia is highlighted: the lack of a systematic approach to implementation, inflated expectations from ready-made solutions, unpreparedness of enterprises for large-scale digital transformation, and difficulties with data exchange and the use of cloud solutions. In conclusion, solutions are proposed, including the standardization of approaches to developing low level devices and data transmission protocols, strategic partnerships between industrial enterprises, and the creation of anonymized industrial data banks with state support for the joint development and refinement of predictive models.

Keywords: predictive analytics of industrial equipment, Internet of Things (IoT), big data analysis, forecasting algorithms, fog and edge computing, artificial intelligence, machine learning, predictive maintenance (PdM), Industry 4.0, cyber-physical systems, data collection, data reliability, data anomalies, data processing, predictive model, mathematical modeling, digital transformation, domestic development, systematic approach, industrial data banks.

For citation

Ershov A.N. Current Issues in the Development of Predictive Analytics in Industry. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 187-194. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-3-187-194>

Развитие интернета вещей и предиктивной аналитики

Развитие интернета вещей (Internet Of Things – IoT) и киберфизических систем представляет собой основу для возникновения сценария Индустрии 4.0 [1-3]. Эти технологии закладывают основу для реализации концепции интеллектуального производства. Реальным примером интеллектуализации с применением этих технологий является предиктивное обслуживание промышленного технологического оборудования (Predictive Maintenance – PdM), целью которого является заблаговременное предсказание возможных отказов, инцидентов или аварий на технологическом оборудовании и последующее устранение причин зарождения дефектов, приводящих к отказам [1, 3].

До последнего времени в промышленности производилось плановое техническое обслуживание оборудования по утвержденным графикам. Серьезным недостатком такого подхода является то, что регулярный ремонт без видимой причины может оказаться избыточным, в то же время регулярный ремонт не всегда гарантирует того, что агрегат не выйдет из строя и после вовремя проведенного планового обслуживания. Причиной может быть как использованные в процессе ремонта некачественные запасные детали (тендерные процедуры нацелены на низкую стоимость, а не качество), так и неудовлетворительно проведенная работа по причине отсутствия достаточ-

ного контроля и квалификации обслуживающего и восстанавливающего персонала. К этому нужно прибавить вынужденную необходимость простоя производственных линий на время планового обслуживания [3].

Вместе с тем сбор информации с большого количества датчиков, установленных на узлах оборудования и измеряющих различные параметры (температура, давление, проток, расход, вибрация, сопротивление изоляции и т.д.), и дальнейшая обработка этой информации позволяют формировать точный график выхода из строя отдельных узлов оборудования [3, 4]. Применение искусственного интеллекта при обработке информации с датчиков, а также различных данных об оборудовании (например, записи журналов о поломках на производственной линии) способно повысить точность рекомендаций, выдаваемых системами предиктивной аналитики. Предиктивный подход к обслуживанию и ремонту основного промышленного технологического оборудования может повысить эффективность производства [3-7].

Основная идея PdM заключается в экстраполяции знаний для определения оставшегося полезного срока службы компонентов промышленного оборудования (остаточного ресурса) [3-6]. Большинство современных подходов машинного обучения для PdM используют различные данные мониторинга состояния (например, вибрацию, давление, температуру и т.д.) и

данные о сбоях для прогнозирования оставшегося полезного срока службы [8, 9]. Однако признаки износа компонентов не всегда легко идентифицировать и проследить в зависимости от производственных циклов, нагрузок, сортамента, человеческого фактора и условий эксплуатации [8].

Таким образом, открытыми проблемами являются трудности с получением данных с маркировкой качества и их интерпретацией. Доступные данные не имеют аннотаций, содержат пропущенные значения, плохо структурированы, собираются и хранятся в различных системах и базах данных, которые не связаны между собой. Этот факт приводит к высокой потребности в наличии огромного количества аннотированных наборов данных, связанных со сбоями. Процедура аннотации – это проблема, которая до сих пор остается открытой и представляет собой ключевую проблему для разработки подходов ML (Machine Learning – машинное обучение) или глубокого обучения (Deep Learning – DL) для точного решения задачи PdM [3].

Проблемы сбора и обработки промышленных данных в предиктивной аналитике

В предиктивной аналитике можно выделить несколько основных параметров, особенно важных для создания качественных моделей прогнозирования: частота сбора данных, их ценность, достоверность, объем и разнообразие. Важность частоты сбора данных обусловлена тем, что узлы агрегатов промышленного оборудования зачастую совершают перемещения с высокой частотой, при этом необходимо отслеживать их состояние в режиме реального времени. Данные должны обладать определенной ценностью, нет смысла отслеживать те показатели, которые никогда не влияют на работоспособность узлов.

Одной из основных проблем предиктивной аналитики является вопрос достоверности собираемых данных. Так как на установленные датчики воздействует агрессивная среда, необходимо быть полностью уверенным в том, что воздействие любых параметров конкретной среды не влияет на достоверность данных. Для выявления таких данных требуется применение алгоритмов контроля с применением математических операций, позволяющих исключать так называемые «выбросы», не используемые в массиве для определения текущего показания, поступающего от измерительного модуля. Так как помимо высокой частоты сбора данных требуется непрерывный мониторинг состояния оборудования, объемы собираемых данных могут быть очень большими. Естественно, нельзя не отметить важность разнообразия собираемых данных, это должны быть данные с различных узлов оборудования, а также данные различных отслеживаемых параметров [3, 7]. Чем больше данных собирается, тем выше точность выдаваемого прогноза о развивающемся дефекте. Чем раньше система позволит выявить аномалию или изменение данных, да-

же с незначительным изменением во времени, но имеющую нарастающую или убывающую составляющую, тем раньше будет зафиксирована точка начала развития дефекта и тем больше времени для подготовки к устранению или недопущению отказа оборудования будет у персонала.

Важной задачей в обработке данных для предиктивной аналитики является верное обнаружение аномалий в данных. Аномальными считаются данные с такими значениями, которые сильно отличаются от ожидаемых. Получение аномалий в данных может быть связано с ошибками в системе сбора данных, например при неисправной работе датчика на оборудовании, сбоях при передаче данных из датчика в систему и т.д. Но не всегда аномальные данные несут ложную информацию о работе оборудования, они могут, наоборот, возникать при сбоях производственной линии или предвещать зарождение нового дефекта, еще незнакомого используемым системам диагностики и предиктивного анализа. Именно поэтому требуется разграничивать эти два типа аномалий в данных. Также аномалии в данных могут быть точечными, когда выпадает одна или несколько точек в данных, и коллективными, когда определенное количество точек являются аномальными подряд. Обработка аномальных данных может производиться централизованно (вычислительный процесс осуществляется на одном и том же оборудовании) либо в несколько этапов на различном оборудовании (например, эта обработка данных может проводиться в облаке) [3].

Поскольку существуют разные типы аномалий и они могут быть обусловлены несколькими факторами, корректнее использовать данные не от одного датчика, а сразу от нескольких и учитывать корреляцию между ними. Применение ИИ также может быть оправдано для поиска аномалий, так как позволяет обрабатывать многомерные данные и извлекать скрытые связи между данными в сложных системах. Могут использоваться как временные, так и пространственные корреляции. Учет корреляций может использоваться вместе с другими методами, такими как экспоненциальное скользящее среднее (EMA), или нечеткие методы. Помимо использования данных о корреляции могут применяться кластерные методы, такие как нечеткая кластеризация, пространственная кластеризация приложений с шумом на основе плотности (DBSCAN), анализ главных компонентов (PCA) или алгоритм сбалансированного итеративного сокращения и кластеризации с использованием иерархий (BIRCH) [3].

Рассмотрев ключевые проблемы сбора и обработки промышленных данных, важно понимать, как эти данные используются для прогнозирования состояния оборудования. Качество и достоверность собранных данных напрямую влияют на эффективность применяемых методов прогнозирования. В предиктивной аналитике используется широкий спектр подходов, от традиционных статистических методов до современ-

ных алгоритмов машинного обучения. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения, которые необходимо учитывать при выборе оптимального подхода для конкретной задачи прогнозирования. Рассмотрим основные методы прогнозирования, применяемые в предиктивной аналитике, и их особенности в контексте обработки промышленных данных.

Методы прогнозирования, применяемые в предиктивной аналитике

Методы прогнозирования, применяемые в предиктивной аналитике, представлены на **рисунке**.

Методы, основанные на знаниях. Эти методы можно разделить на три категории:

- методы, основанные на прецедентах. В идеальных случаях в учетных системах предприятия должны быть записаны различные варианты внештатных ситуаций и методы их решения. Каждый раз, когда возникает определенная внештатная ситуация, модель предлагает решение проблемы, принятое в предыдущих таких же ситуациях. Как правило, такие методы используются в совокупности с другими, так как экспертные знания зависят от квалификации эксперта. Конечно же, такая база знаний достаточно тяжело нарабатывается и документируется. Вместе с тем, когда эти данные существуют, их целесообразно применять для развития методов, основанных на анализе данных;

- методы, основанные на правилах. Модели, применяющие эти методы, предполагают перевод экспертных знаний в форму правил с логикой «ЕСЛИ-ТО». Эти правила собираются экспертами и сохраняются в базах знаний, которые при необходимости можно использовать для определения причин неисправности оборудования или его остановки;

- методы с нечеткой логикой. Модели, использующие эти методы, похожи на методы, основанные на

правилах, но в данном случае утверждения могут принимать непрерывные значения. Например, в качестве утверждений может быть представлен остаточный ресурс узла оборудования в процентах или в днях безаварийной работы, что удобно как для понимания ситуации с оборудованием, так и для предшествующей ей оценки ситуаций экспертами, особенно если применяется экспертная оценка сразу нескольких специалистов для комплекса технологического оборудования. Эти методы, как и методы, основанные на правилах, также могут применяться в совокупности с другими методами [3].

Методы, основанные на моделировании физических процессов. Эти методы используют математические модели для описания физических процессов, которые прямо или косвенно влияют на состояние оборудования. Эти модели часто применяются к механическим и структурным компонентам оборудования, поскольку существует множество физических моделей для описания процессов, связанных с деградацией материалов и компонентов. Эти подходы, как и модели, основанные на знаниях, являются специфичными для предметной области и требуют глубоких знаний как прикладной физики, так и математики, что является дорогостоящим, отнимает много времени, а необходимые знания часто недостаточны для большинства компонентов.

Методы, основанные на данных. Эти методы используют то огромное количество информации, которое собирается с различных датчиков, установленных на оборудовании и на производстве в целом. Методы, основанные на данных, могут применяться как сами по себе, но извлечение необходимых сведений из этой информации позволяет также расширить применение других вышеперечисленных методов. Подходы, основанные на данных, как и подходы к обнаружению аномалий, можно разделить на два разных типа: статистические методы и машинное обучение [3, 6].

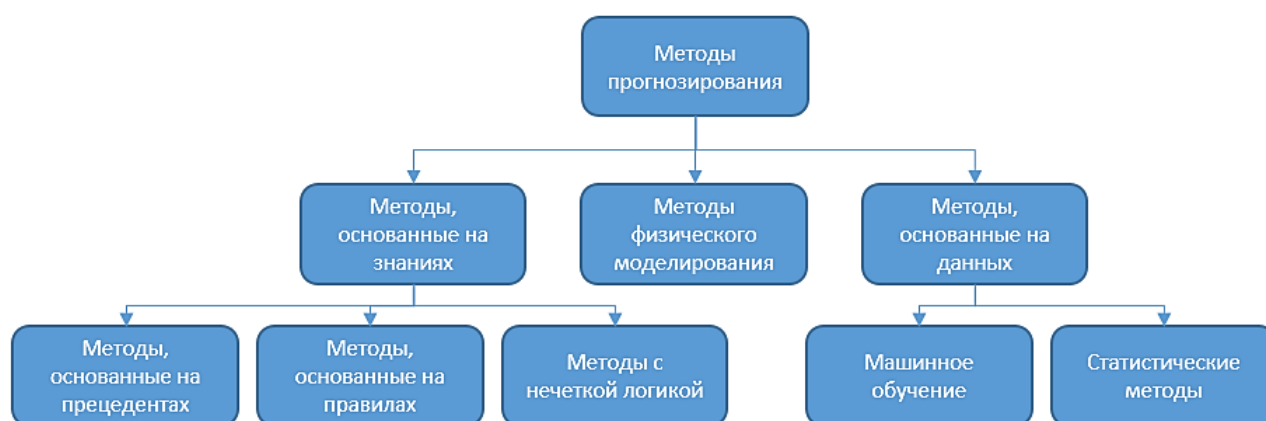


Рисунок. Методы прогнозирования, применяемые в предиктивной аналитике [3]

Figure. Forecasting methods used in predictive analytics [3]

Именно мультимодальные подходы зачастую лучше подходят для решения сложных и комплексных задач, возникающих в современной промышленности. Например, экспертные знания о работе установки могут сочетаться со статистическими методами. Методы машинного обучения могут применяться для повышения точности физической модели, применяемой на производстве. В литературе существует несколько статистических моделей и методов, применяемых к PdM, а именно скрытые модели Маркова (HMM), модель винеровского процесса (WPM), модель гамма-процесса, модель пропорциональных рисков, авторегрессионная модель, модели скользящего среднего (ARMA) и др. Методы машинного обучения включают в себя ИНС и ее варианты, машины опорных векторов (SVM), случайные леса (RF), xGBoost, самоорганизующуюся карту (SOM) и др. [3].

Несмотря на то, что методы предиктивной аналитики развиваются, существует ряд нерешенных проблем. Зачастую модели создаются для конкретных деталей или оборудования, что не позволяет масштабировать применение созданной модели. При этом не всегда учитывается влияние изучаемой деградации одних деталей на другие узлы оборудования. Экспертные знания могут быть накоплены в большем количестве для определенных компонентов, при этом для других компонентов информации может не хватать. Данные для моделей машинного обучения могут быть синтетическими, но эффективность модели при этом может оказаться ниже, чем у модели, обученной на реальных промышленных данных. Разработчикам проще разрабатывать несложные модели для отдельных компонентов, чем сложные для больших установок и целых производственных линий. Методы машинного обучения способны представлять весьма гетерогенные и нелинейные модели, но для обучения моделей им необходимы большие объемы данных, а также высокие вычислительные мощности. Выборка данных для обучения может оказаться не совсем полной, что приведет к невозможности прогнозирования редких видов отказов оборудования, так как для этого не было обучающих данных. Также разработанные модели деградации узлов оборудования могут занижать оставшийся ресурс анализируемых агрегатов, что может привести к более раннему выводу оборудования в ремонт при отсутствии необходимости [3, 10, 11].

Вопросы архитектуры

Растущая сложность в развитии промышленных процессов и необходимость иметь дело с большими объемами разнородных данных мотивировали необходимость разработки технологий и архитектур для решения этих проблем в контексте предиктивной аналитики [12]. Разработанные подходы с течением времени претерпели несколько модификаций и изменений [13-15]. Первыми предложенными архитектурами были централизованные облачные подходы.

Обычно они используют вычислительные возможности централизованного облачного сервера для решения таких задач, как обработка данных, прогнозирование обучения или обнаружение аномалий, в то время как периферийные устройства отвечают только за сбор данных (модули мониторинга с датчиками/измерителями на оборудовании) и передачу данных в облако. Чем больше производство, тем больше требуется сенсорных датчиков, объем передаваемых на облако и обрабатываемых там данных растет. При этом от облачной инфраструктуры ожидается, что данные будут передаваться и обрабатываться без большой задержки и с высокой надежностью. К сожалению, это не всегда выполняется, к тому же стоимость работы с данными в облаке может быть высокой при больших объемах данных. По этим причинам большое внимание профильных специалистов привлекают децентрализованные подходы, где используются так называемые туманные вычисления.

Термин «туманные вычисления» появился по аналогии с облачными вычислениями и означает, что инфраструктура туманных вычислений ближе к пользователю, чем инфраструктура облачных (так как туман ближе к земле, чем облака). Применение туманных вычислений не означает, что облако теперь совсем не используется. Основное отличие заключается в том, что между периферийными устройствами и облаком появляется некоторое количество дополнительных слоев (небольших центров обработки данных, расположенных рядом с пользователем). В этих слоях происходит обработка данных в режиме реального времени и без задержек и сбоев, которые могут быть в облаке (задержки и сбои могут быть и при работе туманных центров обработки данных, но предполагается, что вероятность их возникновения ниже). Вычисления, где задержка передачи данных не так важна, или какие-либо сложные вычисления, для которых требуется продвинутая инфраструктура, могут по-прежнему выполняться в облаке.

Сложности в развитии отечественной предиктивной аналитики, выявленные на практике

В России, к сожалению, бизнес практически не готов к крупным инвестициям в значимые НИОКРы в области PdM (даже в зрелые стартапы), но при этом ждет готовых цифровых продуктов. Государство предоставляет определенные субсидии на развитие различного программного обеспечения, но зачастую это просто «капля в море», ведь на создание зрелого и сложного продукта нужны крупные финансы, требующиеся не только на стадии разработки, но еще более на стадии доработки решения под требования потенциальных заказчиков, выхода на продажи и организации производства. Таким образом, на рынке формируется «зоопарк» сырых локальных решений, неспособных запустить системное развитие сквозных технологий. Существенным препятствием для развития

отечественной предиктивной аналитики является недостаточная готовность предприятий к внедрению соответствующих систем. Данная проблема проявляется в следующих аспектах:

- отсутствие четких требований к системе PdM и как она будет использоваться в бизнес-процессах ТОиР (техническое обслуживание и ремонт). Разные требования к системе на уровне разных специалистов на одном предприятии – нет консенсуса по одному и тому же вопросу, нет одного окна для решения всех вопросов, нет четких правил реализации подходов;

- завышенные ожидания, что система PdM решит все вопросы без усилий и участия со стороны специалистов Заказчика и ответственность будет перенесена на «программы/роботов» или системы, которые создаются в помощь, а не с целью заменить экспертов;

- нет понимания того, что система PdM – это не коробочное решение, а динамичная технология, которая требует постоянного развития, обучения, настройки под конкретную задачу или объект;

- пилотные версии программного обеспечения для Заказчика выпускаются ради пилотов. Даже успешные пилоты не имеют продолжения, так как не находят своего потребителя у Заказчика. Не редки ситуации, когда пилот в одной дочерней компании не имеет никакого значения для другого предприятия этой же группы компаний;

- зачастую ключевым критерием являются специальные технические требования, а не функциональность и стоимость. Например, одним нужен LoRaWAN, у других Nb-IoT/GSM, у третьих Zeegee и т.д. Нет понимания общей картины, есть заикленность на деталях. При этом нет совокупной оценки конечной стоимости реализации и владения при тиражировании на все предприятие;

- мнимая критичность некритичных данных. Невозможность получения данных от Заказчика о работе агрегата для настройки системы даже на пилотных проектах – только разворачивание системы на сервере предприятия. Существенные проблемы при передаче данных «за забор»;

- необходимость на старте проекта соответствовать утвержденной архитектуре построения ИТ-решений, которые кратно увеличивают затраты на вход в промышленные предприятия;

- нежелание специалистов, ответственных за текущую диагностику оборудования, включаться в процессы доработки отечественных решений. Необходимо сразу готовое и прекрасно функционирующее;

- завышенные требования к количеству разработанных алгоритмов определения дефектов на борту систем PdM.

Из описанных пунктов видно, что отсутствует системный подход к внедрению систем предиктивной аналитики. А именно системность подхода и дает максимальную эффективность, когда все детали проекта складываются словно из пазла в одну общую

картину. Каким образом происходит разворачивание системы предиктивной аналитики в зарубежных успешных примерах внедрения? Основные шаги:

1. Разрабатывается инженерный проект. Идет обследование площадки и создание инженерного проекта с выработкой архитектуры.

2. Осуществляется дооснащение систем нижнего уровня. Проводится обвязка оборудования необходимыми датчиками и установка систем диагностики и анализа данных.

3. Начинается сбор и накопление данных. Организуется хранение массива исторических данных с полевых систем.

4. Создается математическая модель процессов, а на ее основе разворачивание диагностического аппарата с выдачей прогнозов на основе экспертного мнения.

5. Только после этого идет внедрение ML (машинного обучения). Несмотря на все разговоры о том, что машинное обучение якобы может решить любые проблемы, создание автоматизированного прогностического сервиса с машинным обучением происходит только после того, как уже налажена основная система предиктивной аналитики и имеются готовые математические модели для оценки состояния оборудования. Машинное обучение в этом случае гармонично дополняет созданную математическую модель и выявляет новые закономерности в правильно собранных качественных данных.

6. Идет работа предписывающего сервиса в штатном режиме. Происходит создание единого пространства оперативного контура планирования и реализации сервисных стратегий.

Некоторые проблемы развития систем предиктивной аналитики в России могут решиться достаточно просто – необходима унификация производимых модулей мониторинга и датчиков для предиктивной аналитики. Единые протоколы передачи данных и единые принципы построения баз данных и способов их обработки позволят в будущем объединить накопленные данные различных предприятий для построения более качественных моделей для снижения простоев оборудования. Стратегическое партнерство промышленных предприятий позволит также сформировать общий заказ на создание серии требуемых датчиков. В этом случае датчики будут стоить кратно дешевле, так как производственные партии будут крупными, а затраты на сервис будут также снижены за счет типизации модулей. Другие проблемы, такие как визуализация и формирование предписывающих рекомендаций, требуют непосредственного вовлечения линейного персонала, что иногда также требует значительного внимания руководства, особенно на первых шагах в построении таких систем.

Заключение

Предиктивная аналитика развивается стремительными темпами, несмотря на возникающие при

этом сложности. Одной из ключевых проблем является сложность грамотного сбора данных для предиктивной аналитики, борьба с недостоверными данными и различными аномалиями. Предварительная обработка данных позволяет довести данные до необходимого уровня их качества. Несмотря на то, что существуют различные методы прогнозирования, у всех них есть недостатки, заключающиеся в создании моделей для конкретных деталей или оборудования (особенно в замкнутых в рамках одного предприятия системах), что не позволяет масштабировать применение созданной модели. Также остается проблема, связанная с необходимостью накопления огромного количества данных и их обработки на дорогостоящей вычислительной инфраструктуре.

Как альтернатива облачным вычислениям, возникает возможность применения туманных вычислений, когда между периферийными устройствами и облаком существуют небольшие центры обработки данных, расположенные рядом с пользователем. В этих вычислительных центрах происходит обработка данных в режиме реального времени и без задержек и сбоев, которые могут быть в облаке. В России на данный момент рынок предиктивной аналитики находится на ранней стадии развития, нет как крупных частных инвестиций, так и всесторонней государственной поддержки, как это происходит в Китае. Также нет и отечественных лидеров, которые могли бы формировать заказы на написание определенных моделей, которые требуются для предприятий.

Для развития отечественной предиктивной аналитики требуется системный подход, как в области развития физической инфраструктуры для сбора данных – необходимых датчиков, устанавливаемых на оборудование, так и работы с заказчиками и их консолидации. Кроме того, актуальной проблемой является необходимость создания банков промышленных данных (с государственным участием), куда предприятия будут отдавать в обезличенном виде данные для разработки моделей предиктивной аналитики и откуда смогут сами получать эти данные без рисков для развития своего бизнеса.

Список источников

- From knowledge-based to big data analytic model: a novel IoT and machine learning based decision support system for predictive maintenance in Industry 4.0 / Rosati R. et al. // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023, vol. 34, no. 1, pp. 107-121.
- Machine learning and deep learning based methods toward industry 4.0 predictive maintenance in induction motors: State of the art survey / Drakaki M. et al. // *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*. 2022, vol. 15, no. 1, pp. 31-57.
- Nunes P., Santos J., Rocha E. Challenges in predictive maintenance—A review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023, vol. 40, pp. 53-67.
- Implementation of predictive models in industrial machines with proposed automatic adaptation algorithm / Kuric I. et al. // *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 4, p. 1853.
- Duan L., Da Xu L. Data analytics in industry 4.0: A survey // *Information Systems Frontiers*. 2021, pp. 1-17.
- Advanced predictive analytics for control of industrial automation process / Bhogaraju S.D. et al. // *Innovations in the Industrial Internet of Things (IIoT) and Smart Factory*. IGI Global, 2021. Pp. 33-49.
- Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review / Zonta T. et al. // *Computers & Industrial Engineering*. 2020, vol. 150, pp. 106889.
- Digital transformation in smart manufacturing with industrial robot through predictive data analysis / Kumar M. et al. // *Machine Learning for Robotics Applications*. 2021, pp. 85-105.
- Machine learning for predictive and prescriptive analytics of operational data in smart manufacturing / Lepenioti K. et al. // *Advanced Information Systems Engineering Workshops: CAiSE 2020 International Workshops*, Grenoble, France, June 8–12, 2020, Proceedings 32. Springer International Publishing, 2020. Pp. 5-16.
- Heterogeneous bi-directional recurrent neural network combining fusion health indicator for predictive analytics of rotating machinery / Chang Y. et al. // *ISA transactions*. 2022, vol. 122, pp. 409-423.
- A survey on data-driven predictive maintenance for the railway industry / Davari N. et al. // *Sensors*. 2021, vol. 21, no. 17, p. 5739.
- Industrial artificial intelligence in industry 4.0-systematic review, challenges and outlook / Peres R. S. et al. // *IEEE access*. 2020, vol. 8, pp. 220121-220139.
- Sahal R., Breslin J. G., Ali M. I. Big data and stream processing platforms for Industry 4.0 requirements mapping for a predictive maintenance use case // *Journal of manufacturing systems*. 2020, vol. 54, pp. 138-151.
- On predictive maintenance in industry 4.0: Overview, models, and challenges / Achouch M. et al. // *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, vol. 16, p. 8081.
- Sang G. M., Xu L., de Vrieze P. A predictive maintenance model for flexible manufacturing in the context of industry 4.0 // *Frontiers in big Data*. 2021, vol. 4, p. 663466.

References

- Rosati R. et al. From knowledge-based to big data analytic model: a novel IoT and machine learning based decision support system for predictive maintenance in Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023;34(1):107-121.
- Drakaki M. et al. Machine learning and deep learning based methods toward industry 4.0 predictive maintenance in induction motors: State of the art survey. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*. 2022;15(1):31-57.
- Nunes P., Santos J., Rocha E. Challenges in predictive maintenance—A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023;40:53-67.
- Kuric I. et al. Implementation of predictive models in industrial machines with proposed automatic adaptation algorithm. *Applied Sciences*. 2022;12(4):1853.
- Duan L., Da Xu L. Data analytics in industry 4.0: A survey. *Information Systems Frontiers*. 2021;1-17.

6. Bhogaraju S.D. et al. Advanced predictive analytics for control of industrial automation process. Innovations in the Industrial Internet of Things (IIoT) and Smart Factory. IGI Global. 2021;33-49.
7. Zonta T. et al. Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. Computers & Industrial Engineering. 2020;150:106889.
8. Kumar M. et al. Digital transformation in smart manufacturing with industrial robot through predictive data analysis. Machine Learning for Robotics Applications. 2021;85-105.
9. Lepenioti K. et al. Machine learning for predictive and prescriptive analytics of operational data in smart manufacturing. Advanced Information Systems Engineering Workshops: CAiSE 2020 International Workshops. 2020;5-16.
10. Chang Y. et al. Heterogeneous bi-directional recurrent neural network combining fusion health indicator for predictive analytics of rotating machinery. ISA transactions. 2022;122:409-423.
11. Davari N. et al. A survey on data-driven predictive maintenance for the railway industry. Sensors. 2021;21(17):5739.
12. Peres R.S. et al. Industrial artificial intelligence in industry 4.0-systematic review, challenges and outlook. IEEE access. 2020;8:220121-220139.
13. Sahal R., Breslin J.G., Ali M.I. Big data and stream processing platforms for Industry 4.0 requirements mapping for a predictive maintenance use case. Journal of manufacturing systems. 2020;54:138-151.
14. Achouch M. et al. On predictive maintenance in industry 4.0: Overview, models, and challenges. Applied Sciences. 2022;12,16:8081.
15. Sang G.M., Xu L., de Vrieze P. A predictive maintenance model for flexible manufacturing in the context of industry 4.0. Frontiers in big Data. 2021;4:663466.

Поступила 10.04.2025; принята к публикации 26.08.2025; опубликована 30.09.2025
Submitted 10/04/2025; revised 26/08/2025; published 30/09/2025

Ершов Андрей Николаевич – кандидат экономических наук,
руководитель Центра предиктивного анализа и искусственного интеллекта,
ООО «Объединенная сервисная компания», группа ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Andrey N. Ershov – PhD (Eng.), Head of the Center for predictive analysis and artificial intelligence,
United Service Company LLC, part of PJSC “ММК” Group, Magnitogorsk, Russia.