

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2023. Т.21, №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. 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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольников (Россия)

Ж.-Б. Вогт (Франция), С.Е. Гавришев (Россия),
В.Е. Громов (Россия), Я. Грум (Словения),
И.Г. Гун (Россия), М. Дабала (Италия),
Х. Дыя (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), В.М. Счастливцев (Россия),
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 А.А. Нерода
Перевод на английский О.Е. Сухих
Дизайн обложки: А.Д. Григорьев

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2023

Подписной индекс издания 48603 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Также подписку в оперативном режиме можно оформить и оплатить в удобной для Вас форме на подписной страничке сайта Агентства «Книга-Сервис» по ссылке:

код html: <http://www.akc.ru/itm/vestnik-magnitogorskogo-gosudarstvennogo-tehnicheskogo-universiteta-im-gi-nosova/>

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 25.09.2023. Заказ 314. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2023. Vol.21, 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. 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)

M. Dabala' (Italy), R.O. Dusane (India),
H. Dyja (Poland), Ye Feng (China),
S.E. Gavrishev (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),
V.M. Schastlivtsev (Russia), 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 A.A. Neroda

Translated into English O.E. Sukhikh

The cover is designed by A.D. Grigorev

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2023

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: 25.09.2023. Order 314. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ..... 5

Хрунина Н.П.

Совершенствование конструкции аппарата
для микродезинтеграции минеральных компонентов
в гидросмесях 5

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ..... 15

*Горлова О.Е., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В.,
Колкова М.С., Глаголева И.В.*

Обоснование интегративного критерия
для прогноза возможности селективной
дезинтеграции техногенного
сложноструктурного сырья 15

Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю.

Состояние процессов сгущения и обезвоживания
отходов флотации углей 27

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ 42

Пономарев В.С., Ерохин Ю.В., Фаррахова Н.Н.

Вещественный состав борсодержащих шлаков
из Ключевского завода ферросплавов 42

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ 51

Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай

Определение остаточных напряжений
с использованием шумов Баркгаузена
при реверсивном поверхностном пластическом
деформировании..... 51

*Ворошилов Д.С., Лебедева О.С., Беспалова Д.Д.,
Дурнопьянова А.С., Бернгардт В.А., Ворошилова М.В.*
Изучение режимов получения проволоки из сплава
Al-РЗМ с применением совмещенных методов
обработки и последующего волочения 62

*Во Фан Тхань Дат, Петров П.А., Бурлаков И.А.,
Фам Ван Нгок, Нгуен Хань Тоан, Гневашев А.А.*
Получение реологических моделей
алюминиевого сплава RS-356 при различных
режимах деформации..... 78

Шопин И.И.

Повышение эффективности листопрокатных
производств на основе предупреждения
негативных технологических событий..... 89

*Анцупов А.В.(мл.), Анцупов А.В.,
Анцупов В.П., Рыскина Е.С.*

Методология теоретической оценки долговечности
и надежности эксплуатации валков клетей кварто
на основе моделирования их контактного
взаимодействия с полосой 97

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ 114

Дерябин И.П., Гузеев В.И., Токарев А.С.

Экспериментальные исследования технологического
наследования погрешностей расположения оси
отверстий при применении трехлезвийных
инструментов..... 114

CONTENTS

MINING5

Khrunina N.P.

Improving the Design of the Device
for Microdisintegration of Mineral Components
in Hydraulic Mixtures.....5

RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE15

*Gorlova O.E., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V.,
Kolkova 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 15

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu.

Thickening and Dewatering of Coal
Flotation Tailings.....27

METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS.....42

Ponomarev V.S., Erokhin Yu.V., Farrakhova N.N.

Material Composition of Boron-Containing Slags
from the Klyuchevsky Ferroalloy Plant42

METAL FORMING51

Zaides S.A., Nguyen Huu Hai

Determination of Residual Stresses
by Using Barkhausen Noise
in the Reverse Surface
Plastic Deformation51

*Voroshilov D.S., Lebedeva O.S., Bepalova D.D.,
Durnopyanova A.S., Berngardt V.A., Voroshilova M.V.*
Study on Modes of Producing Wire from Al-REM
Alloys Using Combined Methods of Processing
and Subsequent Drawing62

*Vo Phan Thanh Dat, Petrov P.A., Burlakov I.A.,
Pham Van Ngoc, Nguyen Khanh Toan, Gnevashev A.A.*
Obtaining Rheological Models
of Aluminum Alloy RS-356 under Various
Deformation Modes78

Shopin I.I.

Increasing the Efficiency
of Sheet Rolling Mills by Preventing Negative
Technological Events.....89

*Antsupov A.V., Jr., Antsupov A.V.,
Antsupov V.P., Ryskina E.S.*

Methodology of Theoretical Assessment
of Durability and Reliability of Operation of Rolls
of Four-High Stands by Modeling Their Contact
Interaction with Strips.....97

MATERIAL PROCESS ENGINEERING.....114

Deryabin I.P., Guzeev V.I., Tokarev A.S.

Experimental Studies on Technological
Inheritance of Errors in the Location
of the Axis of Holes when Using
Three-Blade Tools 114

Кондрашов А.Г., Сафаров Д.Т., Фасхутдинов А.И., Казаргельдинов Р.Р. Технология формообразования косозубых зубчатых венцов дисковыми и концевыми фрезами на пятикоординатных станках с числовым программным управлением	123
НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ.....	137
Позыгун И.С., Серопян Г.М., Сычев С.А., Федосов Д.В., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А. Особенности взаимодействия наносекундного лазерного излучения с YBCO-пленками	137
СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ	144
Васин С.А., Веревкина О.И., Яицков И.А. Совершенствование методики оценки рисков функциональной безопасности и надежности для управления качеством на инфраструктурных объектах	144
Кузьменко В.П., Солёный С.В. Модель предиктивного обслуживания для управления качеством сетей светодиодного освещения	155
Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Ерофеева Л.Н., Бушueva М.Е. Обзор подходов к оценке качества и подвижности автотракторной техники, основанных на методах многокритериальной оценки качества.....	170
Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н. Оценка устойчивости цепей поставок на основе серого реляционного анализа.....	180

Kondrashov A.G., Safarov D.T., Faskhutdinov A.I., Kazargeldinov R.R. Technology of Forming of Helical Ring Gears with Disk Cutters and End Mills on Five-Axis CNC Machines	123
NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES.....	137
Pozygun I.S., Seropyan G.M., Sychev S.A., Fedosov D.V., Teploukhov A.A., Semenyuk N.A. Features of Interaction Between Nanosecond Laser Radiation and YBCO Films	137
STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT	144
Vasin S.A., Verevkina O.I., Yaitskov I.A. Improving the Procedure for Assessing Functional Safety and Reliability Risks for Quality Management at Infrastructure Facilities	144
Kuzmenko V.P., Solenyi S.V. A Predictive Maintenance Model for Quality Management of LED Lighting Networks	155
Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., Bushueva M.E. Overview of Approaches to Assessing the Quality and Mobility of Automotive Vehicles and Tractors Based on Multi-Criteria Quality Assessment Methods.....	170
Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N. Supply Chain Sustainability Assessment Based on Gray Relational Analysis	180

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING

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

УДК 622.271.1:622.236.73

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-5-14



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ АППАРАТА ДЛЯ МИКРОДЕЗИНТЕГРАЦИИ МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ГИДРОСМЕСЯХ

Хрунина Н.П.

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

Аннотация. Актуальность и цель исследования. Увеличение ресурсного потенциала страны зависит от расширения освоения природных и техногенных золотоносных россыпей Дальневосточного региона, большая часть которых представлена глинистой составляющей с повышенным содержанием мелких фракций. Особое значение приобретает развитие более совершенных систем, обеспечивающих разрушение микроструктурных связей глинистых минералов. Развиваются теоретические исследования и методы расчета для проектирования установок, инициирующих разрушение структурных связей минеральной составляющей в гидросмесьях и работающих на основе модулирования гидродинамических воздействий с инициированием ударных нагрузок. **Цель работы.** Разработаны технические решения, обеспечивающие повышение технологического уровня добычи полезного ископаемого при переработке высокоглинистых песков россыпей за счет снижения потерь мелких и тонких частиц ценных компонентов путем встраивания в технологический цикл активизирующих микродезинтеграцию установок с обеспечением образования гидродинамических эффектов, способствующих усилению осцилляций посредством изменения скоростного режима. **Результаты.** На основе аналитического расчета получены данные по изменению массовой гидродинамической мощности и термодинамического потенциала системы в процессе деструкции минеральной составляющей гидросмеси в предлагаемой автором установке, моделирующей гидродинамические эффекты с учетом объемного расхода гидросмеси. В статье предлагается технологическая схема переработки с использованием аппарата новой конструкции для микродезинтеграции с последующим извлечением ценных минералов в тонкослойных потоках гравитационно-динамическим способом и выщелачиванием. Расчетами установлены параметры управления процессом микродезинтеграции минеральных частиц на первой ступени турбулизации в генераторе. Определяющую роль играет изменение гидродинамической силы струи, выходящей из сопла при варьировании объемного расхода гидросмеси и скорости потока гидросмеси. Изменение удельной межфазной поверхности глинистых минеральных частиц зависит также от удельной поверхностной энергии и термодинамического потенциала системы. Расчетами установлено, что при использовании центробежного насоса ПР 12,5/12,5-СП с объемным расходом гидросмеси 12 м³/ч термодинамический потенциал системы значительно увеличивается, стимулируя увеличение удельной межфазной поверхности системы частиц на пять порядков по сравнению с исходными значениями. **Выводы.** Развитие исследований по проектированию гравитационных установок нового типа позволит адаптировать их к использованию на природных высокоглинистых и техногенных объектах россыпей с высоким содержанием мелкого золота. Применение гидродинамического генератора, активизирующего микродезинтеграцию в гидродинамических потоках, сократит потери тонких частиц ценных компонентов и улучшит эксплуатационные показатели по обслуживанию комплекса.

Ключевые слова: высокоглинистые пески, микродезинтеграция, термодинамический потенциал, гидродинамический генератор

Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 075-15-2021-663.

© Хрунина Н.П., 2023

Для цитирования

Хрунина Н.П. Совершенствование конструкции аппарата для микродезинтеграции минеральных компонентов в гидросмесьях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-5-14>



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

IMPROVING THE DESIGN OF THE DEVICE FOR MICRODISINTEGRATION OF MINERAL COMPONENTS IN HYDRAULIC MIXTURES

Khrunina N.P.

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

Abstract. Relevance and objective of the study. An increase in the resource potential of the country depends on the expansion of the development of natural and man-made gold-bearing placers of the Far Eastern region, most of which are represented by a clay component with a high content of fine fractions. It is particularly important to develop more advanced systems that ensure the destruction of microstructural bonds of clay minerals. Theoretical studies and calculation methods are being developed for the design of installations that initiate the destruction of the structural bonds of the mineral component in hydraulic mixtures and work on the basis of modulation of hydrodynamic effects with the initiation of shock loads. **Objective.** Development of a technical solution that provides an increase in the technological level of mineral extraction in the processing of high-clay sands of placers by reducing the loss of small and fine particles of valuable components by introducing installations, activating microdisintegration, into the technological cycle with the formation of hydrodynamic effects that contribute to the strengthening of oscillations by changing the speed mode. **Results.** The analytical calculation served as a basis for obtaining data on the change in the mass hydrodynamic power and thermodynamic potential of the system in the process of destruction of the mineral component of the hydraulic mixture in the proposed installation, which simulates hydrodynamic effects taking into account the volumetric flow rate of the hydraulic mixture. The paper proposes a process flow chart of processing using a device of a new design for microdisintegration with the subsequent extraction of valuable minerals in thin layer flows by gravity-dynamic method and leaching. The calculations established the parameters for controlling the process of microdisintegration of mineral particles at the first stage of creating turbulence in the generator. The decisive role is attributed to the change in the hydrodynamic force of the jet coming out of the nozzle with the variation of the volumetric flow rate of the hydraulic mixture and the flow rate of the hydraulic mixture. The change in the specific interfacial surface of clay mineral particles also depends on the specific surface energy and the thermodynamic potential of the system. Calculations have established that when using a central centrifugal pump, PR 12.5/12.5-SP, with a volumetric flow rate of a hydraulic mixture of 12 m³/h, the thermodynamic potential of the system increases significantly, stimulating an increase in the specific interfacial surface of the particle system by five orders of magnitude compared to the original values. **Conclusions.** The development of research on the design of gravity installations of a new type will make it possible to adapt them to use on natural high-clay and man-made placers with a high content of fine gold. The use of a hydrodynamic generator, which activates microdisintegration in hydrodynamic flows, will reduce the loss of fine particles of valuable components and improve the operational performance of the complex maintenance.

Keywords: high-clay sands, microdisintegration, thermodynamic potential, hydrodynamic generator

The research was conducted using resources of the Research Equipment Sharing Center, the Research Data Processing and Storage Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences funded by the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under project No. 075-15-2021-663.

For citation

Khrunina N.P. Improving the Design of the Device for Microdisintegration of Mineral Components in Hydraulic Mixtures. *Vestnik Magitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-5-14>

Введение

Интенсификация освоения месторождений цветных металлов в Дальневосточном регионе России существенно зависит от вовлечения в эксплуатацию россыпных месторождений. Интенсивно идет вовлечение в эксплуатацию новых типов россыпей, ранее не относившихся к промышленным объектам по содержанию ценных

компонентов и их составу. Для обеспечения ресурсной составляющей расширяется освоение техногенных объектов, большая часть которых представлена глинистыми породами. Кроме глинистой составляющей месторождения имеют повышенное содержание мелких и тонких частиц ценных компонентов. Кроме золота в россыпях присутствуют анатаз TiO₂ (Ti – 59,9%), андалузит (Al₂O₃ – 63,1% и SiO₂ – 36,9%), пиро-

морфит (PbO – 82,0%), борнит (Cu – 63,3%), самородный висмут Bi и висмутин Bi_2S_3 , вольфрамит, галенит, другие минералы и горные породы. На значительной части месторождений содержание мелкого золота фракции размером менее 0,5 мм достигает 90% с преобладанием фракций размером менее 0,3 мм до 88%.

В настоящее время потери мелкого и тонкого золота в процессе эксплуатации высокоглинистых россыпей составляют величину от 40 до 80%. Низкая естественная влажность и присутствие глинистых минералов, которые образуют трудно-разрушаемые структурные связи, усложняет процесс глубокой дезинтеграции песков до микроуровня [1-7]. Увеличение капитальных и энергетических затрат при эксплуатации промывочных агрегатов зависит от технологических параметров и функциональных особенностей установок. Особая роль отводится процессам дезинтеграции. Интенсифицируют дезинтеграционные процессы прямое механическое воздействие на конгломераты песков и гидродинамические эффекты в процессе промывки и осаждения. В настоящее время для обеспечения ресурсосбережения при разработке золотосодержащих россыпей активное развитие получают технологические инновации глубокой и комплексной переработки природного и техногенного сырья. Исследована динамика формирования глинистого окатыша в промывочном барабане и процессы мокрого рудного самоизмельчения глинистых песков [8, 9]. Учитывая также экологический аспект, получают развитие нетрадиционные методы вскрытия минералов посредством энергетического воздействия [10-12]. Данные направления исследований достаточно энергоемкие и находятся в развитии. Проанализированы теоретические предпосылки применения различных методов нелинейной акустики при обогащении полезных ископаемых. В результате промышленных испытаний технологии первичного обогащения платиноносных песков с использованием звукоизлучающих устройств получено увеличение извлечения мелкодисперсных фракций платины на 75% [13].

По результатам промышленных испытаний вибрационного грохота ГИТ-32 на бедных легко-промывистых песках установлена целесообразность его использования на промывочных установках ПГС-700 и ПКС-1200 вместо скрубберов АСК-700 и АСК-1200. Эффективность грохочения на грохоте ГИТ-32 составила 95,6-96,6% [14]. Путем ступенчатого повышения разрушающих нагрузок при измельчении техногенного сырья

получено снижение процессов шламообразования. Определены оптимальные режимы разрушения минеральных сростков техногенного сырья [15]. Подчеркивается, что для удаления глинистых примесей – основного источника образования шламов – в схему обогащения необходимо включить операцию предварительного дезинтегрирования [16]. Получает развитие идея использования механоактивации в гидрометаллургических и обогатительных процессах для обеспечения энерго- и ресурсосбережения. Подчеркивается, что механоактивация способствует нарушению термодинамического равновесия систем и инициирует химическое взаимодействие.

Развиваются исследования, в основе которых лежат процессы турбулентности, кавитации, гидравлических ударов, обеспечивающих микродезинтеграцию твердой составляющей гидросмесей [17-29]. Новым подходом для решения поставленной задачи может быть развитие принципиально новой техники с использованием кавитационно-гидродинамических эффектов. Предложено устройство [30], инициирующее гидродинамические колебания посредством гибких элементов. Однако данное конструктивное решение дискретно-импульсного ввода энергии не обеспечит эффективность дезинтеграции минеральных компонентов гидросмесей на высоких скоростях. Получат развитие процессы истечений струй и потоков минеральных гидросмесей с использованием стационарных элементов. Исследования дезинтеграции высокоглинистых песков с повышенным содержанием ценных компонентов мелких фракций лежат в области происходящих гидродинамических взаимодействий гидросмеси с элементами конструкций и физико-химических явлений. Срабатывают разнообразные эффекты понижения удельной поверхностной энергии частиц.

Целью исследования является разработка технического решения, обеспечивающего повышение технологического уровня добычи полезного ископаемого при переработке высокоглинистых песков россыпей за счет снижения потерь мелких и тонких частиц ценных компонентов путем встраивания в технологический цикл активизирующих микродезинтеграцию установок с обеспечением образования гидродинамических эффектов, способствующих усилению осцилляций посредством изменения скоростного режима.

Результаты исследования

В настоящее время в Хабаровском крае, Амурской области и Еврейской автономной об-

ласти России выявлено более 50-ти участков золотоносных месторождений с повышенным содержанием глинистой фракции в сочетании с мелким и тонким золотом. Все они имеют фракции золота $-0,5$ мм от 54 до 90-100%, при этом половина из них имеет фракции $-0,5$ мм свыше 80%. Примером может служить россыпь ручья Генриховский с повышенным содержанием мелкой глинистой фракции в составе рыхлых отложений – 76,4%. Ситовый анализ золота по классам крупности показал содержание фракции $-0,63 + 0,16$ мм – 87,8%, фракции $-0,63 + 0,25$ мм – до 12% и фракции $-0,16$ мм – до 0,2%. Почти 90% составляет мелкое золото.

Известно, что использование для переработки россыпей только традиционных гравитационных установок неминуемо приведет к существенным потерям ценных компонентов. Для решения вопроса извлечения благородных металлов более технологически эффективными средствами предложено использовать системы, в основе которых лежат методы, обеспечивающие активизацию микродезинтеграции. Это достигается путем создания условий для устойчивого процесса подготовки минеральных компонентов посредством разрушения минеральной составляющей усилением полей гидродинамических и кавитационных явлений в генераторе. Институтом горного дела ДВО РАН предлагается комплекс средств для разработки высокоглинистых россыпей с мелким золотом.

На рис. 1 представлен общий вид технологической схемы переработки высокоглинистых россыпей с повышенным содержанием мелких и тонких частиц золота посредством встраивания в цикл разработанных установок. Комплекс технологических средств снабжен установкой многоуровневого типа для извлечения ценных минералов в тонкослойных потоках гравитационно-динамическим способом [31] и гидродинамическими генераторами, не требующими дополнительных энергозатрат [32, 33].

Интенсификация процесса переработки труднопромывистых высокоглинистых песков россыпей с преимущественно мелким золотом обеспечивается автоматизацией процесса гравитационного разделения и активацией микродезинтеграции посредством гидродинамических эффектов в генераторах (рис. 2). После классификации и гравитационного разделения гидро-смесь с размером фракций менее 6 мм направляется для активации в гидрогенератор и на уста-

новку многоуровневого типа. После многоуровневой установки пульпа направляется снова в гидродинамический генератор для активации и дополнительного разрушения микросвязей глинистых частиц под действием энергии давления струи, изменения скоростного режима потока и кавитационных эффектов.



Рис. 1. Технологическая схема переработки высокоглинистых россыпей с мелким золотом
Fig. 1. The process flow chart of processing high-clay placers with fine gold

Подвергнутая интенсивному воздействию в гидродинамическом генераторе пульпа направляется в емкость для выщелачивания и сорбции. Активация стимулирует физико-химический процесс окислителей в процессе выщелачивания [34]. По сравнению с ультразвуковыми и механическими активационными установками гидродинамический генератор существенно экономичен, так как отсутствуют дополнительные затраты на электроэнергию при осуществлении процесса активизации. Обеспечение устойчивости процесса разрушения песков с глинистой составляющей, образовавшейся в ходе кавитации и гидродинамических осцилляций, является основополагающим фактором при подготовке к выделению микрочастиц ценных компонентов.

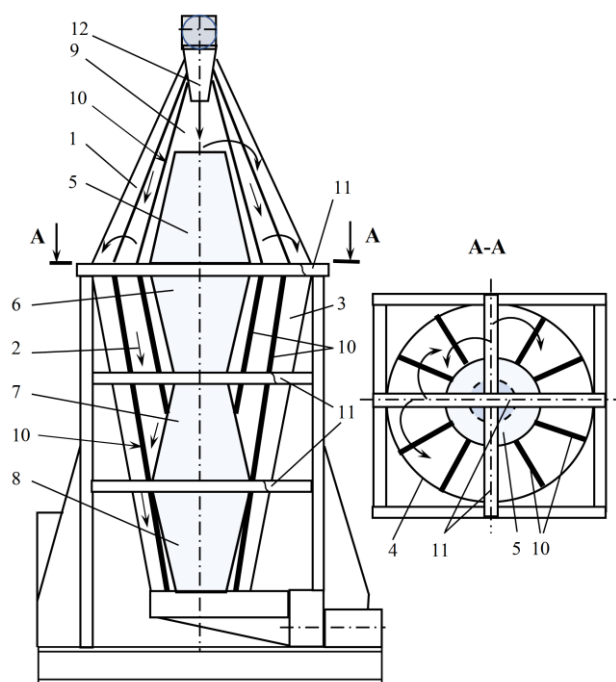


Рис. 2. Гидродинамический генератор:

1, 2 – профилированные каналы; 3 – стенка корпуса; 4 – корпус; 5-8 – стационарные кавитационные элементы; 9 – диффузор; 10 – ребра жесткости; 11 – крестообразные опорные штанги; 12 – сопло

Fig. 2. A hydrodynamic generator: 1, 2 are profiled channels; 3 is the wall of the casing; 4 is a casing; 5-8 are stationary cavitation elements; 9 is a diffuser; 10 is stiffeners; 11 is cross-shaped support rods; 12 is a nozzle

Технические и технологические разработки

Предлагается конструкция гидродинамического генератора (см. **рис. 2**) с профилированными каналами 1, 2, изменяющими направление потока гидросмеси и скоростной режим. Каналы образуются между стенкой 3 корпуса 4 и последовательно установленными стационарными кавитационными элементами 5-8 в виде конусообразных расщепителей. Кавитационные элементы представляют собой монолитную систему, установленную по центру диффузора 9 и корпуса 4, жестко соединенного с диффузором 9. Конусообразные расщепители установлены с чередованием прямой и обратной конусности по ходу продвижения потока гидросмеси для формирования зон, способствующих усилению осцилляций посредством изменения скоростного режима. Интенсификация процесса усиливается посредством прямых ребер жесткости 10 и крестообразных опорных штанг 11, установленных для обеспечения градиента давления с превышением

предела прочности микрочастиц. При подаче высокоскоростной струи из сопла 12 генератора на плоскую поверхность конусообразного расщепителя 5 происходит гидродинамический эффект, сопровождающийся турбулизацией потока.

Скоростной режим гидросмеси усиливает влияние гидродинамического давления и формируемого термодинамического потенциала минеральной составляющей гидросмеси. На входе в генератор гидродинамическая сила P , Н, будет зависеть от объемного расхода гидросмеси Q , м³/с, скорости потока струи V , м/с, падающего на препятствие в виде расщепителя, и равновесной плотности гидросмеси ρ :

$$dP = \rho \cdot Q \cdot d \cdot V. \quad (1)$$

Равновесная плотность ρ , кг/м³, определится с учетом объемного содержания в гидросмеси минеральной составляющей и воды. Скорость потока V , м/с, будет зависеть от объемного расхода гидросмеси Q , м³/с, и диаметра сопла d , м:

$$V = \frac{4Q}{3,14d^2}. \quad (2)$$

Происходят изменения в сторону активного разрушения структурных и физико-механических связей частиц. Для определения в выбранном размерном диапазоне измерения удельной межфазной поверхности S , м⁻¹, системы минеральных частиц используем зависимость [33]

$$S = S_0 \exp(E\sigma^{-1}), \quad (3)$$

где S_0 – исходная удельная межфазная поверхность системы частиц при времени $t = 0$, принимаем $S_0 = 1,00124 \cdot 10^3$ м⁻¹; E – изменение термодинамического потенциала поверхностей частиц [4] для гетерогенной системы, Н/м; σ – удельная поверхностная энергия частиц дисперсоида, для глины составляет 0,780 Дж/м².

Изменение термодинамического потенциала системы dE зависит от конструктивных особенностей установки и коэффициента полезного действия η , энергии давления струи W , Н/м², турбулентности d_t , м, образующейся в результате взаимодействия потока с поверхностью, и изменения времени воздействия подводимой энергии dt . Размер диаметра d_m турбулентности принимаем в нашем случае равным 0,3 м.

$$dE = \eta \cdot W \cdot d_t \cdot dt. \quad (4)$$

Существенным фактором является подача гидросмеси в установку посредством насосной

системы. Для расчетов выбран песковый насос ПР 12,5, предназначенный для перекачивания гидросмесей.

На **рис. 3** представлена зависимость изменения термодинамического потенциала системы поверхностей частиц от расхода гидросмеси и времени протекания процесса, полученная расчетным путем по формуле (4). На **рис. 4** представлена зависимость удельной межфазной поверхности частиц S от расхода гидросмеси Q , полученная с учетом теоретической формулы (3).

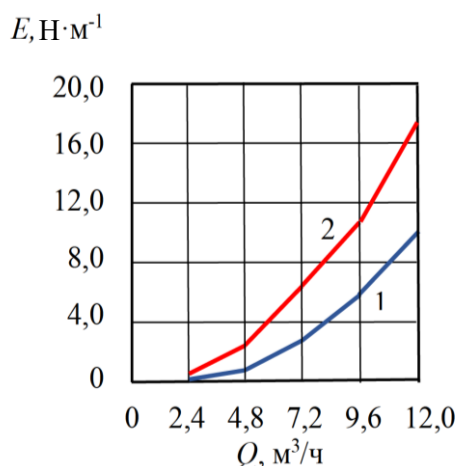


Рис. 3. Зависимость изменения термодинамического потенциала поверхностей частиц от расхода гидросмеси при времени 2 с (1) и 4 с (2)

Fig. 3. Dependence between thermodynamic potential of the surface of the particles and the flow rate of the hydraulic mixture at 2 s (1) and 4 s (2)

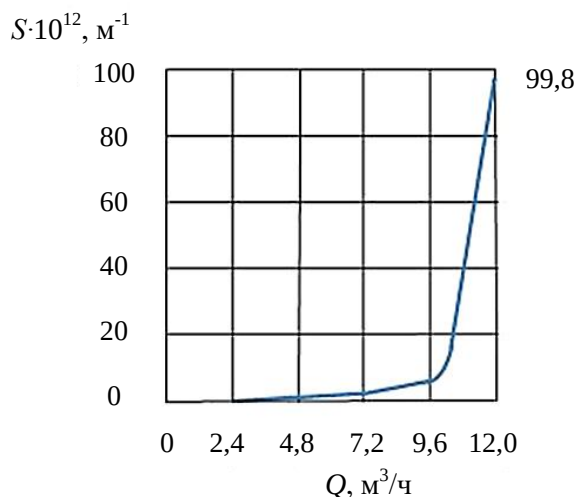


Рис. 4. Зависимость изменения удельной межфазной поверхности системы частиц S от расхода Q гидросмеси при времени 2 с

Fig. 4. Dependence between the specific interfacial surface of particle system S and flow rate Q of the hydraulic mixture at 2 seconds

Процесс деструкции высокоглинистого минерального сырья на микроуровне посредством преобразования скоростного режима подачи гидросмеси в генератор вполне управляем и эффективен. В результате расчетов установлено, что определяющую роль в процессе микродезинтеграции минеральных частиц на первой ступени турбулизации играет изменение гидродинамической силы струи, зависящей от скорости потока, объемного расхода и плотности гидросмеси, а также термодинамического потенциала турбулизации. Преобразование структурных связей влияет на морфометрические и энергетические параметры системы. При возрастании скорости потока и расхода в 5 раз термодинамический потенциал системы, а также давление и массовая гидродинамическая мощность увеличиваются в среднем в 25 раз. Удельная межфазная поверхность системы частиц существенно изменяется от $0,002 \cdot 10^{12}$ до $99,8 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-1}$ – на пять порядков. Достигнутый эффект преобразования может использоваться в обогащательных процессах, активизируя физико-химическое влияние реагентов.

В генераторе отсутствуют двигатели для вращения элементов конструкции, энергоемкость его минимальная. Интенсификация процесса усиливается посредством ребер жесткости и крестообразных опорных штанг, установленных для обеспечения градиента давления с превышением предела прочности микрочастиц и формируемого термодинамического потенциала минеральной составляющей гидросмеси. Ребра жесткости и опорные штанги обеспечивают устойчивость конструкции и эксплуатационную надежность системы.

Заключение

Установлено значительное количество золотосодержащих россыпей с повышенным содержанием глинистой составляющей и мелкого и тонкого золота. Содержание фракций золота размером менее 0,5 мм содержится от 54 до 90-100%, при этом половина из них имеет фракции -0,5 мм свыше 80%. Представлена схема переработки высокоглинистых россыпей с повышенным содержанием мелкого золота. Определены основные факторы интенсификации кинетики микродезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси посредством элементов конструкции генератора, моделирующих гидродинамические эффекты в процессе подготовки к обогащению на многоуровневой установке и выщелачиванию для дальнейшего извлечения микрочастиц ценного компонента. Посредством аналитических

расчетов осуществлен анализ изменения термодинамического потенциала и удельной межфазной поверхности системы минеральных частиц в процессе деструкции минеральной составляющей гидросмеси. Разработанное техническое решение обеспечит повышение технологического уровня добычи полезного ископаемого при переработке высокоглинистых песков россыпей за счет снижения потерь мелких и тонких частиц ценных компонентов, улучшения показателей по обслуживанию и эксплуатационной надежности элементов конструкции генератора.

Список источников

1. Алексеев В.С., Серый Р.С., Соболев А.А. Повышение извлечения мелкого золота на промывочном приборе шлюзового типа // Обогащение руд. 2019. №5. С. 13-18. DOI: 10.17580/or.2019.05.03
2. Мирзеханов Г.С., Литвинцев В.С. Состояние и проблемы освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов в Дальневосточном регионе // Горный журнал. 2018. №10. С. 25-30. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.04
3. Мамаев Ю.А., Хрунина Н.П. Перспективы освоения глинистых россыпей Приамурья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. №55. С. 47-57.
4. Хрунина Н.П. Моделирование гидродинамических эффектов при микродезинтеграции высокоглинистых минеральных компонентов в гидросмесь // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 26-34. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-26-34
5. Экологические основы рационального землепользования при освоении россыпных месторождений Дальнего Востока / Крупская Л.Т., Мамаев Ю.А., Хрунина Н.П., Литвинцев В.С., Пономарчук Г.П. Владивосток: Дальнаука, 1997. 35 с.
6. Хрунина Н.П., Стратечук О.В. Новые аспекты микродезинтеграции высокоглинистых песков россыпных и рудно-россыпных месторождений благородных металлов Дальневосточного региона: монография. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. 218 с. ISBN 978-5-7389-2686-0
7. Аленичев В.М. Геоинформационное обеспечение ресурсосбережения при разработке золотосодержащих россыпей // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. №4. С. 124-131. DOI: 10.25635/i0065-1538-8230-i
8. Карлина А.И. Применение процесса мокрого рудного самоизмельчения для дезинтеграции глины и песков металлоносных россыпей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. №10. С. 189-195.
9. Матвеев А.И., Ширман Г.В. Динамика формирования глинистого окатыша в процессе дезинтеграции высокоглинистых песков в промывочном барабане // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. №10. С. 266-268.
10. Пат. 2276727 РФ. Способ управления процессом трансформации золотосодержащей породы / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Опубл. 20.05.2006. Бюл. № 14.
11. Развитие технологических инноваций глубокой и комплексной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов / Чантурия В.А., Шадрюнова И.В., Горлова О.Е., Колодежная Е.В. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. №1. С. 159-171. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-159-171
12. Пат. 2200629 РФ. Грохот-дезинтегратор с интенсификацией кавитации комбинированным воздействием ультразвука / Н.П. Хрунина; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Опубл. 20.03.2003. Бюл. № 8.
13. Бахарев С.А., Козлов А.П. К вопросу использования методов нелинейной акустики при обогащении полезных ископаемых и безреагентной очистке промышленных сточных вод // Маркшейдерия и недропользование. 2013. №1(63). С. 41-49.
14. Промышленные исследования по изучению эффективности грохочения песков при внедрении в схему промывочных установок грохота ГИТ-32 / Коростовенко В.В., Медведь Н.В., Морозова Е.Л., Морозов В.Н. // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений: сб. тр. XI Междунар. науч.-техн. конф. в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2022. С. 119-122.
15. Возможности стадийной дезинтеграции и механической активации в процессах обогащения техногенного оловосодержащего сырья / Уракаев Ф.Х., Шумская Л.Г., Кириллова Е.А., Кондратьев С.А. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. №3. С. 158-167. DOI: 10.15372/FTPRI20210315
16. Рочев В.Ф., Мельников А.Е. Исследование механизма разрушения мерзлых глинистых пород в водной среде // Успехи современного естествознания. 2018. №12-2. С. 380-384.
17. Li W., Yang Y., Shi W., Zhao X., Li W. Correction and evaluation of the cavitation model taking into account the thermodynamic effect // Mathematical Problems in Engineering. 2018, no. 10, pp. 1-11. DOI: 10.1155/2018/7217513
18. Decaix J., Goncalves E. Simulation of compression effects in turbulent cavitating flows // European Journal of Mechanics. 2013, vol. 39, pp. 11-31. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2012.12.001
19. Jing L., Weiling X., Bu C. Stratification effect of air bubble on the shock wave from the collapse of cavitation bubble // Journal of Fluid Mechanics, 2021, vol. 919, A16. DOI: 10.1017/jfm.2021.368
20. Xun Sun, Songying Chen, Jingting Liu, Shan Zhao, Joon Yong Yoon. Hydrodynamic cavitation: a promising technology for the industrial synthesis of nano-

- materials. URL: <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00259> (Дата обращения: 06.06.2023).
21. Richard Dvorsky, Jiri Lunacek, Ales Sliva Dynamics analysis of cavitation disintegration of microparticles during nanopowder preparation in a new Water Jet Mill (WJM) device September 2011 // *Advanced Powder Technology*. 2011, vol. 22(5), pp. 639-643. DOI: 10.1016/j.appt.2010.09.008
 22. Mukun Li, Hongjian Ni, Guan Wang, Ruihe Wang. Simulation of Thermal Stress Effects in Submerged Continuous Water Jets on the Optimal Standoff Distance during Rock Breaking // *Powder Technology*. 2017, vol. 320, pp. 445-456. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.07.071
 23. Zhang X., Carbone M., Bragg A.D. Lagrangian model for passive scalar gradients in turbulence // *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, vol. 964. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.375>.
 24. Dvorski R., Svoboda L., Troykova Y., Bednář J. Cavitation Disintegration of Microparticles and Nanoparticles in Dense Liquid Dispersions // Conference: TechConnect World 2015, At: Washington DC, USA, vol. 2. DOI: 10.13140/RG.2.1.3345.9364
 25. Ананьев К.М., Алексеева Е.А., Твердохлебов В.П. Применение метода кавитации для очистки подтоварной воды нефтяных месторождений // *Успехи современного естествознания*. 2021. №5. С. 45-50. DOI: 10.17513/use.37623
 26. Гордейчук Т.В., Казачек М.В. О влиянии неионогенных поверхностно-активных веществ на эмиссию NA^* при сонолюминесценции водных растворов $NaCl$ // *Журнал физической химии*. 2019. Т. 93. №5. С. 793-796. DOI: 10.1134/S004445371905011X
 27. Получение водорода в акустоплазменном разряде в жидкости / Булычев Н.А., Кириченко М.Н., Аверюшкин А.С., Казарян М.А. // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31. №3. С. 226-228. DOI: 10.15372/AOO20180313
 28. Пат. 2209974 РФ. Геотехнологический комплекс с многоступенчатой дезинтеграцией / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Опубл. 10.08.2003. Бюл. № 22.
 29. Мамаев Ю.А., Хрунина Н.П. Определение оптимальных начальных параметров звукового воздействия на пульпу в зумпфовом накопителе при открытой разработке высокоглинистых россыпей // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № 7. С. 187-191.
 30. Пат. 2476261 РФ. Способ возбуждения акустических колебаний в текучей среде и устройство (варианты) для его осуществления / В.П. Терехин, Д.М. Пастухов, М.Е. Пастухов. Опубл. 27.02.2013. Бюл. № 6.
 31. Пат. 2187373 РФ. Многоуровневая установка для извлечения ценных минералов / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев, О.В. Стратечук, Т.О. Хрунин; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Опубл. 20.08.2002. Бюл. № 23.
 32. Хрунина Н.П. Совершенствование комплекса средств для переработки высокоглинистых золотоносных песков россыпей // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2021. Т. 19. №2. С. 14-22. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-14-22
 33. Хрунина Н.П. Влияние гидродинамических эффектов на структурные изменения дисперсоида в процессе микродезинтеграции // *Науки о Земле и недропользование*. 2022. Т. 45. №3(80). С. 294-304. DOI: 10.21285/2686-9993-2022-45-3-294-304
 34. Хрунина Н.П., Прохоров К.В. Совершенствование процессов переработки золотосеребряных упорных руд комплексного месторождения благородных металлов // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2019. №2. С. 4-12. DOI: 10.17073/0021-3438-2019-2-4-12

References

1. Alekseev V.S., Seryi R.S., Sobolev A.A. Increasing the extraction of fine gold on a sluice-type flushing device. *Obogashchenie rud* [Ore Enrichment]. 2019;(5):13-18. DOI: 10.17580/or.2019.05.03. (In Russ.)
2. Mirzekhanov G.S., Litvintsev V.S. State and problems of development of man-made placer deposits of precious metals in the Far Eastern region. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2018;(10):25-30. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.04. (In Russ.)
3. Mamaev Yu.A., Khrunina N.P. Prospects for the development of clay placers of the Amur region. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2009;(55):47-57. (In Russ.)
4. Khrunina N.P. Modeling of hydrodynamic effects in microdisintegration of high-clay mineral components in slurries. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022;20(3):26-34. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-26-34. (In Russ.)
5. Krupskaya L.T., Mamaev Yu.A., Khrunina N.P., Litvintsev V.S., Ponomarchuk G.P. *Ekologicheskie osnovy ratsionalnogo zemlepolzovaniya pri osvoenii rossypnykh mestorozhdeniy Dalnego Vostoka* [Ecological background of a reasonable land use in the development of placer deposits in the Far East]. Vladivostok: Dalnauka, 1997, 35 p. (In Russ.)
6. Khrunina N.P., Stratechuk O.V. *Novye aspekty mikrodezintegratsii vysokoglinistykh peskov rossypnykh i rudno-rossypnykh mestorozhdeniy blagorodnykh metallov Dalnevostochnogo regiona: monografiya* [New aspects of microdisintegration of high-clay sands of placer and ore-placer deposits of precious metals of the Far Eastern region: monograph]. Khabarovsk: Publishing House of Pacific National University, 2018, 218 p. ISBN 978-5-7389-2686-0. (In Russ.)
7. Alenichev V.M. Geoinformation support of resource saving in the development of gold-bearing placers.

- Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Proceedings of Tula State University. Earth Sciences]. 2020;(4):124-131. DOI: 10.25635/i0065-1538-8230-i (In Russ.)
8. Karlina A.I. Application of the wet ore autogrinding process for the disintegration of clay and sands of metal-bearing placers. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2014;(10):189-195. (In Russ.)
 9. Matveev A.I., Shirman G.V. Dynamics of clay pellet formation in the process of disintegration of high-clay sands in the washing drum. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2011;(10):266-268. (In Russ.)
 10. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A. *Sposob upravleniya protsessom transformatsii zolotosoderzhashchey porody* [Method of controlling the process of transformation of gold-bearing rock]. Patent RU, no. 2276727, 2006.
 11. Chanturiya V.A., Shadrinova I.V., Gorlova O.E., Kolodezhnaya E.V. Development of technological innovations of deep and complex processing of technogenic raw materials in the context of new economic challenges. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Proceedings of Tula State University. Earth Sciences]. 2020;(1):159-171. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-159-171. (In Russ.)
 12. Khrunina N.P. *Grokhot-dezintegrator s intensifikatsiei kavitatsii kombinirovannym vozdeystviem ultrazvuka* [A screen-disintegrator with intensification of cavitation by combined exposure to ultrasound]. Patent RU, no. 2200629, 2003.
 13. Bakharev S.A., Kozlov A.P. On the use of methods of nonlinear acoustics in the processing of minerals and non-chemical treatment of industrial wastewater. *Marksheyderiya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Use]. 2013;(1(63)):41-49. (In Russ.)
 14. Korostovenko V.V., Medved N.V., Morozova E.L., Morozov V.N. Industrial research on the study of the efficiency of screening sands during the introduction of the GIT-32 screen into the scheme of washing installations. *Innovatsionnye geotekhnologii pri razrabotke rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniy: sb. tr. XI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. v ramkakh Uralskoy gornopromyshlennoy dekady* [Innovative geotechnologies in the development of ore and non-metallic deposits: Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference as part of the Ural Mining Decade]. Yekaterinburg, 2022, pp. 119-122. (In Russ.)
 15. Urakaev F.Kh., Shumskaya L.G., Kirillova E.A., Kondratiev S.A. Possibilities of stage disintegration and mechanical activation in the processes of enrichment of technogenic tin-containing raw materials. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and Technical Problems of Mineral Development]. 2021;(3):158-167. DOI: 10.15372/FTPRP20210315. (In Russ.)
 16. Rochev V.F., Melnikov A.E. Study on the mechanism of destruction of frozen clay rocks in water environment. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Modern Natural Science]. 2018;(12-2):380-384. (In Russ.)
 17. Li W., Yang Y., Shi W., Zhao X., Li W. Correction and evaluation of the cavitation model taking into account the thermodynamic effect. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018;(10):1-11. DOI: 10.1155/2018/7217513
 18. Decaix J., Goncalves E. Simulation of compression effects in turbulent cavitating flows. *European Journal of Mechanics*. 2013;39:11-31. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2012.12.001.
 19. Jing L., Weiling X., Bu C. Stratification effect of air bubble on the shock wave from the collapse of cavitation bubble. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021;919: A16. DOI: 10.1017/jfm.2021.368.
 20. Xun Sun, Songying Chen, Jingting Liu, Shan Zhao, Joon Yong Yoon. Hydrodynamic cavitation: a promising technology for the industrial synthesis of nanomaterials. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00259>
 21. Richard Dvorsky, Jiri Lunacek, Ales Sliva. Dynamics analysis of cavitation disintegration of microparticles during nanopowder preparation in a new Water Jet Mill (WJM) device. *Advanced Powder Technology*. 2011;22(5):639-643. DOI:10.1016/j.appt.2010.09.008
 22. Mukun Li, Hongjian Ni, Guan Wang, Ruihe Wang. Simulation of thermal stress effects in submerged continuous water jets on the optimal standoff distance during rock breaking. *Powder Technology*. 2017;320:445-456. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.07.071
 23. Zhang X., Carbone M., Bragg A.D. Lagrangian model for passive scalar gradients in turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021;964. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.375>
 24. Dvorski R., Svoboda L., Troykova Y., Bednář J. Cavitation disintegration of microparticles and nanoparticles in dense liquid dispersions. Conference: TechConnect World 2015. 2015;2. DOI: 10.13140/RG.2.1.3345.9364
 25. Ananiev K.M., Alekseeva E.A., Tverdokhlebov V.P. Application of the cavitation method for the purification of produced water from oil fields. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Modern Natural Science]. 2021;(5):45-50. DOI: 10.17513/use.37623. (In Russ.)
 26. Gordeychuk T.V., Kazachek M.V. Effect of nonionic surfactants on NA* emission during sonoluminescence of aqueous NaCl solutions. *Zhurnal fizicheskoy khimii* [Journal of Physical Chemistry]. 2019;93(5):793-796. DOI: 10.1134/S004445371905011X. (In Russ.)
 27. Bulychiev N.A., Kirichenko M.N., Averyushkin A.S., Kazaryan M.A. Hydrogen production in acousto-plasma discharge in liquid. *Optika atmosfery i okeana* [Optics of Atmosphere and Oceans]. 2018;31(3):226-228. DOI: 10.15372/AOO20180313. (In Russ.)
 28. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A. *Geotekhnologicheskii kompleks s mnogostupenchatoy dezintegratsiei* [Geotechnological complex with multistage disintegration]. Patent RU, no. 2209974, 2003.

29. Mamaev Yu.A., Khrunina N.P. Determination of the optimal initial parameters of the sound effect on the pulp in the sump accumulator during the open mining of high-clay placers. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2009;(7):187-191. (In Russ.)
30. Terekhin B.P., Pastukhov D.M., Pastukhov M.E. *Sposob возбуждения акустических колебаний в текучей среде и устройство (варианты) для его осущестствления* [A method for excitation of acoustic vibrations in a fluid medium and a device (options) for its implementation]. Patent RU, no. 2476261, 2013.
31. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A., Stratechuk O.V., Khrunin T.O. *Mnogourovnevaya ustanovka dlya izvlecheniya tsennykh mineralov* [A multi-level installation for the extraction of valuable minerals]. Patent RU, no. 2187373, 2002.
32. Khrunina N.P. Improving the complex of means for the processing of high-clay gold-bearing sands of placers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(2):14-22. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-14-22. (In Russ.)
33. Khrunina N.P. Influence of hydrodynamic effects on structural changes in dispersoid in the process of microdisintegration. *Nauki o Zemle i nedropolzovanie* [Earth Sciences and Subsoil Use]. 2022;45(3(80)):294-304. DOI: 10.21285/2686-9993-2022-45-3-294-304. (In Russ.)
34. Khrunina N.P., Prokhorov K.V. Improvement of processing gold-silver refractory ores of a complex deposit of precious metals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya* [Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy]. 2019;(2):4-12. DOI: 10.17073/0021-3438-2019-2-4-12. (In Russ.)

Поступила 31.05.2023; принята к публикации 14.07.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 31/05/2023; revised 14/07/2023; published 25/09/2023

Хрунина Наталья Петровна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра
Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия.
Email: npetx@mail.ru. ORCID 0000-0001-8117-0922

Natalia P. Khrunina – PhD (Eng.), Lead Researcher, Mining Institute, Khabarovsk Federal Research
Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia.
Email: npetx@mail.ru. ORCID 0000-0001-8117-0922

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

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

УДК 622.732.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-15-26



ОБОСНОВАНИЕ ИНТЕГРАТИВНОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА ВОЗМОЖНОСТИ СЕЛЕКТИВНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ТЕХНОГЕННОГО СЛОЖНОСТРУКТУРНОГО СЫРЬЯ

Горлова О.Е.¹, Орехова Н.Н.¹, Колодежная Е.В.², Колкова М.С.¹, Глаголева И.В.¹

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

² Институт проблем комплексного освоения недр имени академика В.Н. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Разработка простых методов критериальной оценки возможности селективной дезинтеграции на стадии мелкого дробления является актуальной задачей в связи с вовлечением в переработку небольших партий горно-металлургических отходов, значительно отличающихся по структурно-технологическим, физико-механическим и химическим свойствам. Стадия мелкого дробления часто является первым приемом дезинтеграции в схемах переработки техногенного сырья, уже частично разрушенного в первичном процессе добычи и обогащения, то есть является стадией формирования продукта, в которой по возможности должны быть вскрыты гетерофазные сростки. Для быстрой прогнозной оценки, позволяющей сделать обоснованный выбор способа мелкого дробления, обеспечивающего наибольшую селективность дезинтеграции, подходящим инструментом может быть балльная оценка. **Цель работы.** Обоснования пунктов и критериев балльной оценки для центробежно ударного способа измельчения на основании наших многолетних исследований минералогических, структурно-текстурных особенностей и закономерностей дезинтеграции металлургических отходов. **Используемые методы.** Системный подход к формированию ключевых показателей, влияющих на эффективность селективности разрушения, на основе комплексного анализа вещественных и технологических характеристик металлургических шлаков, специфических особенностей их состава, строения и свойств, полученных ранее данных об их корреляции с эффективностью разрушения техногенных сростков материала по поверхности раздела фаз при ударном способе дезинтеграции. **Новизна.** Впервые сделана попытка обоснования состава ключевых показателей для определения значения интегративного критерия прогноза возможности селективной дезинтеграции техногенного сложноструктурного сырья в аппаратах центробежно-ударного действия на основе балльной оценки. **Результат.** Предложена система критериев оценки, состав ключевых показателей и шкала оценки и интерпретации результатов. **Практическая значимость.** Обоснованный выбор способа мелкого дробления на основании разрабатываемого критерия позволит снизить потери в процессах обогащения.

Ключевые слова: интегративный критерий, мелкое дробление, селективность, раскрываемость, балльная оценка, техногенное минеральное сырьё, центробежно-ударное воздействие, шлаки

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00526, <https://rscf.ru/project/22-27-00526/>.

© Горлова О.Е., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Колкова М.С., Глаголева И.В., 2023

Для цитирования

Обоснование интегративного критерия для прогноза возможности селективной дезинтеграции техногенного сложноструктурного сырья / Горлова О.Е., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Колкова М.С., Глаголева И.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 15-26. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-15-26>



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

PROVIDING A RATIONALE FOR AN INTEGRATIVE CRITERION TO PREDICT THE POTENTIAL SELECTIVE DISINTEGRATION OF TECHNOLOGY-RELATED, COMPLEX STRUCTURED RAW MATERIALS

Gorlova O.E.¹, Orekhova N.N.¹, Kolodezhnaya E.V.², Kolkova M.S.¹, Glagoleva I.V.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Development of simple methods of the criterion estimation of the potential selective disintegration at the stage of fine crushing is a relevant task due to involving in processing of small batches of mining and metallurgical wastes, considerably differing by structural, technological, physical, mechanical and chemical properties. The fine crushing stage is often the first method of the disintegration in flow charts of processing of technology-related raw materials, already partially crushed in the primary process of mining and beneficiation. It means that it is the stage of the product formation, when heterophase aggregates should be uncovered if possible. To ensure a quick predictive assessment used to make a reasonable choice of a fine crushing method providing the greatest selectivity of the disintegration, a suitable tool can be scoring. **Objectives.** The research is aimed at providing a rationale for points and criteria of scoring for a centrifugal impact grinding method based on our long-term studies on mineralogical, structural and textural features and patterns of the disintegration of metallurgical wastes. **Methods Applied.** A system approach to the formation of key indicators influencing efficiency of selectivity of crushing based on a comprehensive analysis of the material and technological characteristics of metallurgical slags, peculiar features of their composition, structure and properties, the previously obtained data on their correlation with efficiency of crushing technology-related aggregates of the material on the interface surface by an impact method of the disintegration. **Originality.** The authors made a novel attempt to provide a rationale for the composition of key indicators for determining the value of the integrative criterion used to predict the potential selective disintegration of technology-related, complex structured raw materials in centrifugal impact facilities based on scoring. **Result.** The authors proposed a system of assessment criteria, the composition of key indicators and the scale of assessment and interpretation of results. **Practical Relevance.** A supported choice of the fine crushing method based on the developed criterion will contribute to reducing losses in beneficiation processes.

Keywords: integrative criterion, fine crushing, selectivity, release, scoring, technology-related mineral raw materials, centrifugal impact, slags

The research was funded by grant of the Russian Science Foundation No. 22-27-00526, <https://rscf.ru/project/22-27-00526/>.

For citation

Gorlova O.E., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V., Kolkova 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, vol. 21, no. 3, pp. 15-26. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-15-26>

Введение

В последнее время все в больших объемах в рециклинг вовлекается сырье техногенного происхождения, то есть образующиеся на самих горнодобывающих, обогатительных, металлургических, химико-металлургических предприятиях отходы добычи и переработки минерального сырья [1]. Вопрос селективного раскрытия остро встает в стадии мелкого дробления, которая часто является первым приемом дезинтеграции в схемах переработки техногенного сырья, частично дезинтегрированного в первичном процессе добычи и переработки. Стадия мелкого дробления является стадией формирования продукта перед циклом измельчения, или первой

операции разделения, в которой по возможности должны быть вскрыты гетерофазные сростки. В связи с этим важным и интересным является исследование селективности раскрытия сростков техногенных фаз и минералов именно в этой стадии дезинтеграции сырья. Для достижения крупности выходящего куска 5-10 мм, характерного для питания шаровой мельницы, могут быть использованы конусная мелкого дробления, валковые дробилки, дробилки центробежно-ударного действия, мельницы полусамозмельчения, стержневые мельницы. Энергетические затраты мокрого измельчения значительно выше, чем затраты на сухое дробление. Поэтому более целесообразным и общепринятым выглядит получение мелкого продукта в дробилках.

В зависимости от факторов нагружения валковые дробилки относят к дробилкам с жестким типом нагрузки [2], дробилки центробежно-ударного действия – к оборудованию с мягким типом нагружения. Главным отличием устройств с мягким типом нагружения является то, что при дроблении вся энергия, переданная куску руды нагружающим устройством, полностью переходит в энергию деформации. Кинетическая энергия кусков породы переходит в потенциальную энергию упругих деформаций, которая затем трансформируется в другие виды: энергию разрушения, тепло и т.д., что в дальнейшем приводит либо к переизмельчению материала, либо к накоплению скрытых трещин. Во втором случае создаются предпосылки для дальнейшего селективного измельчения минеральных сростков [3].

В основе селективного разрушения минеральных сростков техногенных фаз и минералов (как и в случае природного сырья) лежит «возникновение на границе их раздела концентрации напряжений, превышающих прочность их связи» [2]. Существует два основных подхода к прогнозу селективности раскрытия сростков в результате дробления. Первый основан на изучении характера связей между минералами. Вывод о возможности селективного раскрытия делается на основании: морфологии границ структурных элементов [4, 5]; текстурно-структурного рисунка поверхности (по шлифам и аншлифам) [6]; размеров извлекаемых минералов и их распределение в разных классах крупности [7-9]; удельной поверхности межфазных и внутрифазных границ [3, 6, 10]; дефектов межзеренных границ [11, 12]; вида и доли матричных фаз [13, 14]; направления развития и размеров трещин [15]. Второй основан на определении тестовыми испытаниями раскрываемости в зависимости от способов воздействия, реализуемого в устройстве. Выбор оборудования для селективной дезинтеграции в итоге является трудозатратной процедурой, выполняемой только специальными исследовательскими лабораториями. Соответственно, процедура оправдана для значительных объемов перерабатываемого сырья.

Увеличение доли различного по своим характеристикам техногенного сырья, вовлекаемого в переработку, партии которого могут быть соизмеримо меньше по количеству, чем руды текущей добычи, диктует потребность разработки моделей, позволяющих экспрессно, на основании небольшого набора легко определяемых характеристик сырья, осуществить выбор дробилки, обеспечивающей более селективное раскрытие при сопоставимых энергозатратах. Или

разработки простых методов критериальной оценки возможности селективной дезинтеграции техногенного сырья в дробилках разных способов нагружения и энергоэффективности.

Под селективным разрушением можно понимать разные процессы [16]:

- разрушение материала по поверхности раздела фаз – геометрическая селективность разрушения;
- разрушение сростков с обособлением отдельных по химическому составу фаз – раскрытие зерна;
- разрушение с минимальными энергозатратами – энергетический принцип селективности разрушения.

В нашей работе под селективностью разрушения понимается разрушение сростков с обособлением отдельных по химическому составу фаз, что в последующем разделительном процессе позволит сконцентрировать эти фазы в разноименных продуктах, то есть обогатить. Фазой является часть минерального вещества техногенного сырья, обладающая определенным химическим составом, физико-механическими свойствами и структурой строения, отличающимися ее от другой части, и ограниченная от них поверхностями раздела.

Исходя из вышепринятого понятия селективности, практические процессы дезинтеграции на стадии мелкого дробления по большей части неселективны, поскольку полученные частицы состоят из смеси минеральных компонентов, присутствующих в исходной руде. Обоснованный выбор способа мелкого дробления на основании разрабатываемого критерия позволит снизить потери в процессах обогащения. Это снижение будет обеспечено более полным раскрытием зерновых агрегатов, а следовательно, и их более полным разделением по продуктам с различным химическим составом и исключением переизмельчения техногенных фаз по типу твердых растворов, содержащих в своем составе ценные компоненты в достаточном количестве.

История вопроса

В работах Хопунова [2, 16] показано, что после неоднократных попыток смоделировать селективное разрушение горных пород пришло понимание того, что классические оценки прочности (предельные напряжения при сжатии, растяжении и сдвиге), принятые в физике горных пород, ни терминологически, ни методически не приемлемы для характеристик руд, подвергаемых дезинтеграции с целью раскрытия минералов. Основными причинами этого считаются:

- невоспроизводимость структуры руды практически на всех масштабных уровнях дезинтеграции, вследствие чего разрушающая деформация каждый раз возникает на неопределенном сечении;
- невозможность использования для математического моделирования процессов раскрытия при дезинтеграции руд ни одной из теорий разрушения;
- пригодность гипотез разрушения только для идеального однородного материала.

Все это справедливо и в отношении техногенного металлургического сырья, которое по условиям своего происхождения является многофазным и структурно сложным, как это показано в наших работах [17, 18]. В этих условиях решить задачу разработки математического критерия оценки селективности раскрытия природного и техногенного минерального сырья не представляется возможным.

Набирающее обороты во всех сферах деятельности нейросетевое моделирование основано на аппроксимации закономерностей разрушения сростков. Такие закономерности могут быть найдены эмпирическим путем, и нейросеть для проведения оценки должна пройти адаптивное обучение при подаче обучающей выборки путем анализа закономерностей воздействия положительных и отрицательных факторов на селективное раскрытие [19]. При этом для каждого нового вида сырья необходима настройка нейросети, а нейросетевая модель не может рассматриваться как инструмент прогнозной оценки на стадии выбора способа дезинтеграции для селективного раскрытия минеральных фаз при разрушении сростков.

Для целей прогнозной оценки с нашей точки зрения более подходящим инструментом является балльная оценка, позволяющая по сумме баллов определить категорию сырья по раскрываемости для конкретного способа дезинтеграции.

В настоящей статье сделана попытка обобщения пунктов и критериев балльной оценки для центробежно ударного способа измельчения на основании многолетних совместных исследований минералогических, структурно-текстурных особенностей и закономерностей дезинтеграции металлургических отходов в ЗАО «УралОМЕГА» и кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

Объекты и методика проведения исследований

В качестве объекта исследований выбраны железо и медьсодержащие шлаки, характерные

для групп шлаков различного генезиса. Изучены сталеплавильный шлак ОАО «ММК», медный шлак «Карабашмедь», никелевый шлак комбината «Североникель», медный шлак Балхашского медеплавильного завода, фракции некондиционных металлопродуктов, полученных при переработке шлаков АО «Уральская Сталь», лежалый клинкер вельцевания цинковых кеков Челябинского цинкового завода. Предметом исследования были закономерности разрушения шлаков в аппарате центробежно-ударного действия, зависимости раскрытия сростков от минерально-структурно-текстурных особенностей шлаков, физико-механических свойств.

Системный подход к формированию ключевых показателей, влияющих на селективность разрушения, основывался на комплексном анализе вещественных и технологических характеристик металлургических шлаков, специфических особенностей их состава, строения и свойств, полученных ранее данных об их корреляции с эффективностью разрушения техногенных сростков материала по поверхности раздела фаз при ударном способе дезинтеграции. Исходными данными для анализа были результаты собственных научных исследований, изложенных в соответствующих докладах и публикациях [17, 18, 21, 22], а также данные, приводимые в отечественных и зарубежных источниках, по вопросам прогноза селективности разрушения минерального сырья, по структурно-морфологическим и технологическим свойствам минерального сырья, поиску критериев для прогноза селективного разрушения и вопросам моделирования процесса дезинтеграции [1-16, 19, 20].

Исследования минералогических, текстурных и структурных особенностей проведено с использованием комплекса методов рентгенофазового, оптико-микроскопического и электронно-микроскопического анализов. Оптико-микроскопический анализ проведен на анализаторе Минерал-С7 с управляющей программой «SIAMS Photolab», электронно-микроскопический анализ на электронном сканирующем микроскопе Leo 1420 VP. Определение микротвердости фаз клинкера вельцевания цинковых кеков проведено на микротвердомере Buehler Micromet 5103 Buehler, шлаковых фаз с использованием полуавтоматического микротвердомера ПТМ-3. Анализ индивидуальных фаз их элементного и атомарного составов проведен методом СЭМ (сканирующая электронная микроскопия) с помощью растрового электронного микроскопа

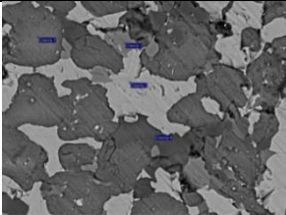
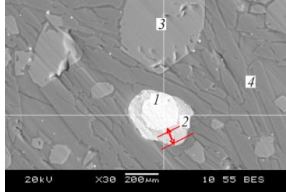
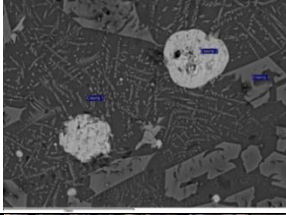
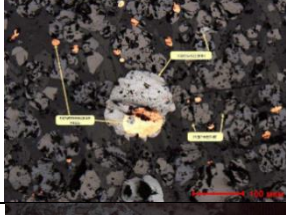
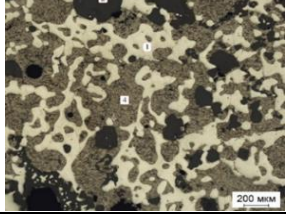
JSM 6490 LV в режиме вторичных электронов и установленным на микроскопе Leo 1420 VP рентгеновским энергодисперсионным спектрометром INCA-300. PCMA проводили с использованием специальной приставки к сканирующему микроскопу – системы INCA Energy.

Результаты и систематизация

Фактическим материалом для обоснования критерия послужили установленные нами особенности раскрытия структурных элементов шлаков различного генезиса, частично представленные в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики структурных элементов раскрытия шлаков различного генезиса

Table 1. Characteristics of structural release elements of slags of various origins

Объект изучения	Фаза ценного компонента	Основные минералы матрицы	Основной текстурный рисунок раскрытия	Микротвердость основных фаз (Н), кг/мм ²		Соотношение микротвердостей (Нц/Нм)
				ценного компонента (ц)	минералов матрицы (м)	
Сталеплавильный шлак ОАО «ММК»	корольки металла	алит ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), кордиерит ($\text{Mg, Fe})_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5\text{O}_{18})$, мелилит $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO})$		128	512 805 474	0,25 0,15 0,27
Медный шлак «Карабашмедь»	металлическая медь	фаялит с примесями $2\text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$, цинковая шпинель, вюстит с примесями Zn, Cr, Al		148	293 754 265	0,5 0,19 0,55
Никелевый шлак комбината «Североникель»	никеленосный пирротин	алюмосиликат с примесями Zn, Cr, Al, цинковая шпинель, оксиды Fe, Mn, Mg		155	293 778 365	0,52 0,19 0,42
Медный шлак Балхашского медеплавильного завода	магнетит, сульфиды Cu, Zn, Pb	фаялит $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, алюмосиликаты		596 142	293 326	2,03/0,48 1,82/0,43
Фракции некондиционных металлопродуктов, полученных при переработке шлаков АО «Уральская Сталь»	корольки металла, гидроксиды железа	ларнит Ca_2SiO_4 , псевдоволластонит $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$, мелилит $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO})$		134 109	604 517 453	0,22/0,18 0,26/0,21 0,3/0,24
Лежалый клинкер вельцевания цинковых кеков АО «ЧЦЗ»	техногенные минералы-сульфиды меди, твердые медьсодержащие растворы	мелилит $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO})$ (окерманит), минералы пирротин-пиритового ряда, коксик		290 181,7-580	460 145-170 41,8	0,63 1,2-3,4 4,33

Характер раскрытия рудных минералов зависит от их размеров, формы, твердости, хрупкости, наличия спайности, структуры руды, то есть характера его срастания с вмещающими минералами, разницы в их твердости, наличия вокруг зерен рудных минералов пленок или каемок продуктов их изменения, наличия в них микровключений, прожилок и т.д. [20].

Характеристики сырья, предопределяющие закономерности дезинтеграции техногенных объектов могут быть сгруппированы в три группы: структурно-технологические, физико-механические и химические.

Исследование текстурно-структурных характеристик комплексов техногенных минералов и минеральных фаз в сырье позволяет определить возможность селективного их разрушения. Например, к селективному разрушению имеет предрасположенность сырье с идиобластическим характером срастания минералов, в то время как мирмекитовое срастание минеральных комплексов показывает невозможность селективного разрушения [3]. Идиобластическая форма зерна в отличие от колломорфной также позволяет прогнозировать более селективное раскрытие. Фактор формы, близкий к единице, тоже может указывать на раскрытие минеральных зерен преимущественно по границам срастания.

К структурно-технологическим параметрам техногенных объектов с позиции их влияния на селективность дезинтеграции фаз по геометрическим границам отнесены: раскристаллизованность сырья; наличие свободных зерен ценного компонента; размеры минеральных фаз ценного компонента; форма зерен минералов ценного компонента.

При формировании критериев исходили из следующих результатов анализа сырья и рассуждений. Раскристаллизованность техногенного образования, как и руды, может меняться от «раскристаллизованной» до «нераскристаллизованной» и, соответственно, структура – от полнокристаллической до стекловатой.

Для объектов исследования определена иерархия шлаков по усложнению текстурно-структурного рисунка (от простого к сложному) и влияния текстурно-структурных особенностей на селективное раскрытие. Первая группа – легкораскрываемые, для них характерна полнокристаллическая однотонная структура с преобладанием ксеноморфных зерен, границы срастаний криволинейные, извилистые иногда зазубренные, присутствуют обособленные фазы с четкими ров-

ными границами. Единично присутствуют субидiomорфные зерна, с правильной формой срастания зерен. Вторая группа – среднераскрываемые. Они характеризуются полнокристаллической равномерной структурой, наличием эвтектических структур и присутствием ганита в виде каймы вокруг рудных выделений. Третья группа – трудноораскрываемые. Шлаки и клинкер характеризуется наличием сложных скрытокристаллических структур, присутствием структур распада твердых растворов, структур замещения элементов в кристаллической структуре минералов в виде каемок на периферии рудных зерен.

Селективное раскрытие в операции дезинтеграции более вероятно для зерен, размер которых сопоставим с размером куска, выходящего из операции. Для диапазона крупностей мелкого дробления 15-5 мм в качестве критерия, указывающего на возможность селективной дезинтеграции, принято наличие кусков ценного компонента крупностью более 10 мм. Для объектов исследования наличие крупных зёрен ценного минерала обусловлено скоростью остывания расплава, числом центров кристаллизации и свойствами его основы – дисперсионной среды.

В сырье встречаются разные варианты присутствия свободных зерен ценного компонента: от полного отсутствия до содержания в общей массе хорошо сформированных монометаллических корольков. Наличие свободных зерен ценного компонента в кусках материала крупностью менее 10 мм свидетельствует о склонности фазы ценного компонента к селективному раскрытию. А преобладание свободных зерен ценного компонента в каком-то одном узком классе крупности указывает на то, что при достижении крупности дробленого куска соответствующего размеру верхней границы узкого класса будет высок процент селективно раскрытых зерен ценного компонента.

Общим характерным свойством изученных нами шлаков и клинкеров является фактор формы отдельных фаз от 0,2 до 0,9, при этом размеры минеральных фаз ценного компонента в изучаемом техногенном сырье составляют от 20 до 500 мкм.

Фактор формы объекта определяется по формуле $F = 4\pi S/P_2$, где S – площадь объекта; P – периметр объекта. Зерен с фактором формы, близким к 1 (форма идеального круга в шлифе), мало. Фактор формы шестиугольника равен 0,9. Фактор формы равностороннего треугольника равен 0,605. Для равнобедренного треугольника,

опирающегося на диаметр, фактор формы равен 0,54. Зерно можно назвать равноосным при факторе формы от 0,6 до 0,9 [21].

Флотационное обогащение, как правило, осуществляется при крупности частицы минерала более 100 мкм. Частицы больше этого размера, присутствующие в сырье, имеющие ровные границы срастания и фактор формы более 0,6, во флотационном процессе будут селективно раскрыты с высокой долей вероятности.

На основании вышеперечисленного сформированы критерии оценки структурно-технологических параметров техногенных объектов, предопределяющие эффективность их дезинтеграции в центробежно-ударных дробилках по геометрической границе раздела фаз вмещающих пород и фаз ценного компонента: 1) наличие кусков ценного компонента крупностью более 10 мм; 2) наличие свободных зерен ценного компонента в кусках материала крупностью менее 10 мм; 3) наличие больше 50% свободных зерен ценного компонента, относящихся к одному узкому классу крупности с модулем шкалы $d_{\max}/d_{\min} = 1,2$; 4) свободные зерна ценного компонента имеют крупность более 0,1 мм; 5) зерна ценного компонента имеют четкую простую границу с вмещающими минералами; 6) свободные зерна ценного компонента имеют округлую форму.

К физико-механическим параметрам техногенных объектов отнесены: контрастность твердости контактирующих фаз; контрастность плотности фаз, содержащих ценный компонент; наличие дефектов на границе ценного компонента. Для изученных нами шлаков и клинкеров установлены границы значений данных параметров. Контрастность твердости контактирующих фаз, содержащих и не содержащих ценный компонент (Нц/Нм), от 0,15 до 2,5; контрастность плотности фаз, содержащих и не содержащих ценный компонент, от 1,2 до 3. Доказано наличие ослабленных структур на границе зерен ценного компонента [22].

К химическим факторам отнесен элементный состав контактирующих фаз, что вызвано общехимическими представлениями о том, что принадлежность катиона, находящегося на границе с фазой ценного компонента, к *s*-, *p*- или *d*-элементам определяет вероятность разрушения по границе контакта. При образовании материалов (шлаков) в высокотемпературных процессах энергетические особенности катиона будут сказываться на взаимодействии с соседними катионами, по крайней мере, по границе раздела фаз. Поскольку энергия электронного уровня растет в

ряду *s-p-d*, то в такой же последовательности, в первом приближении, должна возрастать прочность контакта на разделе фаз, что и должно отразиться в прочности на сжатие и изгиб. Можно предположить, что прочность контакта элементов *d-p*-уровней, отличающихся более высокой энергией, чем *s*-орбиталь, обеспечит контакту раздела фаз более высокую прочность при прочих равных условиях. Поэтому в качестве одного из критериев интегральной оценки химических параметров техногенных объектов, предопределяющих прочность контактов двух фаз предложена принадлежность катиона, находящегося на границе с фазой ценного компонента, к *s*-, *p*- или *d*-элементам.

На основе экспертной оценки раскристаллизованность шлака признана важнейшим фактором, который напрямую связан с качеством раскрытия микроагрегатов шлака в процессах рудоподготовки. С учетом этого факта присвоены баллы относительного влияния раскристаллизованности на разрушение объекта по геометрической границе раздела фаз вмещающих пород и фаз ценного компонента.

Основной подход к интегративному критерию, объединяющему структурные, физико-механические и химические параметры шлаков, заключался в следующем. Чем большему количеству критериев удовлетворяют параметры техногенного объекта, тем большее значение имеет интегративный критерий, и тем больше вероятность селективной дезинтеграции данного сырья в аппаратах центробежно-ударного действия и, следовательно, эффективность его переработки в целом. Поэтому для остальных критериев, кроме раскристаллизованности, приняты только две возможные балльные оценки – 1 и 0. В результате интегративный критерий может принимать значения от 0 до 15. На основании экспериментального изучения раскрытия минеральных фаз в процессе мелкого дробления на центробежно-ударном аппарате обоснованы и определены границы интервальной оценки при статистической обработке (табл. 2), характеризующие степень селективности дезинтеграции: 0-5 – неселективная дезинтеграция; 6-10 – дезинтеграция с низкой селективностью; 10-15 – селективная дезинтеграция.

На данном этапе работ выполнена балльная оценка параметров шлаков черной и цветной металлургии и клинкера цинкового производства и определены значения интегративного критерия селективности дезинтеграции данных техногенных объектов в центробежно-ударных дробилках.

Таблица 2. Результаты оценки возможности дезинтеграции сталеплавильных шлаков ММК, медеплавильных шлаков «Карабашмедь», клинкера Челябинского цинкового завода в центробежно-ударных дробилках по интегративному критерию

Table 2. Scoring of the potential disintegration of steelmaking slags of MMK, copper smelting slags of Karabashmed, clinker of the Chelyabinsk Zinc Plant in centrifugal impact crushers according to the integrative criterion

Группа критериев	Критерии оценки	Оценка в баллах	Значение оценки для техногенного сырья (относительно ценного компонента)			
			шлак сталеплавильный (железо)	шлак медеплавильный (медь)	вельц-клинкер (медь)	вельц-клинкер (железо)
Структурно-технологические	1. Раскристаллизованность шлака	полнокристаллическая – 4 неполнокристаллическая – 2 стекловатая – 0	4	2	2	2
	2. Наличие кусков ценного компонента крупностью более 10 мм	да – 1, нет – 0	1	0	0	1
	3. Наличие свободных зерен ценного компонента в кусках материала крупностью менее 10 мм	да – 1, нет – 0	1	1	0	1
	4. Больше 50% свободных зерен ценного компонента относятся к одному узкому классу крупности с модулем шкалы $d_{\max}/d_{\min} = 1,2$	да – 1, нет – 0	0	1	1	0
	5. Зерна ценного компонента имеют крупность более 0,1 мм	да – 1, нет – 0	1	0	0	1
	6. Зерна ценного компонента имеют четкую простую границу с вмещающими минералами	да – 1, нет – 0	1	1	0	1
	7. Свободные зерна ценного компонента имеют округлую форму (или фактор формы более 0,6)	да – 1, нет – 0	1	1	1	1
Физико-механические	1. Более высокая твердость фаз, содержащих ценный компонент	да – 1, нет – 0	1	0	0	0
	2. Повышенная плотность фаз, содержащих ценный компонент	да – 1, нет – 0	1	1	1	1
	3. Присутствие ценного компонента в металлической форме	да – 1, нет – 0	1	1	1	1
	4. Наличие ослабленных структур на границе зерен ценного компонента, имеющих твердость ниже, чем фаза ценного компонента и вмещающая фаза	да – 1, нет – 0	1	1	0	0
Химические	Принадлежность катиона, находящегося на границе с фазой ценного компонента, к s -, p - или d -элементам	s -элемент – 1; p - или d -элемент – 0	0	0	1	1
Значение интегративного критерия		Сумма баллов	$K = 12$	$K = 9$	$K = 7$	$K = 10$
Интерпретация: 0-5 – неселективная дезинтеграция, 6-10 – дезинтеграция с низкой селективностью, 10-15 – селективная дезинтеграция						

В табл. 2 в качестве примера приведен протокол определения интегративного критерия для сталеплавильного шлака ММК, медного шлака «Карабашмедь» и клинкера Челябинского цинкового завода. Для сталеплавильных шлаков ММК значение интегративного критерия $K = 12$ – дезинтеграция будет происходить селективно; для шлаков медной плавки «Карабашмедь» $K = 9$ – дезинтеграция будет происходить с низкой степенью селективности; для клинкера цинкового производства при раскрытии по ценному компоненту «медь» $K = 7$ – возможна низкоселективная дезинтеграция; при раскрытии по ценному компоненту «железу» $K = 10$ – возможна селективная дезинтеграция. Это хорошо согласуется с данными наших работ [22–24], в которых показано, что в дробленых продуктах дробилок ударного действия для сталеплавильных шлаков ММК по сравнению со шлаками медной плавки наблюдается перераспределение ценных компонентов в более мелкие «раскрытые» классы крупности, увеличивается степень раскрытия сростков металла и шлаковой составляющей, возрастает содержание свободных рудных зерен и зерен металлов.

Заключение

1. Разработка простых методов критериальной оценки возможности селективной дезинтеграции, то есть разрушения сростков с обособлением отдельных по химическому составу фаз техногенного сырья в дробилках разных способов нагружения и энергоэффективности, является актуальной задачей в связи с вовлечением в переработку относительно небольших в сравнении с природным сырьем партий горно-металлургических отходов, значительно отличающихся по структурно-технологическим, физико-механическим и химическим свойствам.

2. Для целей быстрой прогнозной оценки, позволяющей сделать обоснованный выбор способа мелкого дробления, обеспечивающего наибольшую селективность дезинтеграции, на основании интегративного критерия, наиболее подходящим инструментом является балльная оценка, в результате которой по сумме баллов можно определить категорию сырья по раскрываемости для конкретного способа дезинтеграции.

3. На основании теоретического анализа и результатов многолетних исследований минералогических, структурно-текстурных особенностей и закономерностей дезинтеграции металлургических отходов предложена система критериев балльной оценки, состав ключевых показателей структурно-технологических параметров техногенных объектов, предопределяющих эффективность их дезинтеграции в центробежно-

ударных дробилках, присвоены баллы относительного влияния, предложена шкала оценки и оценочные интервалы для интерпретации значения интегративного критерия.

4. Проведена оценка параметров шлаков черной и цветной металлургии и клинкера цинкового производства, определены значения интегративного критерия селективности дезинтеграции. Интегративный критерий может принимать значения от 0 до 15.

5. По проведенной балльной оценке по разработанному протоколу спрогнозировано, что дробление в аппаратах центробежно-ударного действия сталеплавильных шлаков ММК будет происходить селективно, поскольку значение интегративного критерия получено 12 баллов; для шлаков медной плавки завода «Карабашмедь» – дезинтеграция будет происходить с низкой степенью селективности ($K=9$); а для клинкера цинкового производства при раскрытии по ценному компоненту «железу» – возможна селективная дезинтеграция ($K=10$), в то время как по ценному компоненту «медь» раскрытие будет характеризоваться низкой степенью селективности при значении интегративного критерия только 7 баллов. Предварительные экспериментальные результаты подтверждают правильность выбора интерпретационных интервалов балльной оценки.

Список источников

1. Марченко Н.В., Ковтун О.Н. Металлургическое сырье. Красноярск, 2017. 221 с.
2. Хопунов Э.А. Роль факторов нагружения в формировании селективного разрушения руд // Обогащение руд. 2011. №2. С. 24.
3. Исследование процессов селективной дезинтеграции медно-никелевых руд Заполярного месторождения / Александрова Т.Н., Афанасова А.В., Кузнецов В.В., Бабенко Т.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. №12. С. 73–87.
4. Смольяков А.Р. Границы срастания минералов в руде // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. №11. С. 346–353.
5. Пауль Р. Рудные минералы и их срастания / пер. с нем. А.Д. Генкина и Т.Н. Шадлун; под ред. А.Г. Бетехтина. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 1432 с.
6. Пирогов Б.И. Методология технологической минералогии и природа технологических свойств минералов // Результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геологоразведочных работ. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2006. С. 6.

7. Смольяков А.Р. Раскрытие минералов при измельчении руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. №8. С. 224-234.
8. Газалеева Г.И. и др. Критерии выбора оптимальных схем рудоподготовки // Обогащение руд. 2015. №6. С. 3-8.
9. Морозов В.В., Демьяненко А.П., Николаева Т.С. Исследование стадийного обогащения смешанных медно-молибденовых руд в условиях последовательного раскрытия минеральных комплексов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. №9. С. 128-135.
10. Васильев П.В. Разработка метода прогнозирования и контроля степени раскрытия магнетита на основе стереологического анализа при обогащении железистых кварцитов: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГИ (МГТУ), 1989. 194 с.
11. Головин Ю.И. и др. Размерные эффекты упругих и прочностных свойств отдельных фаз и межфазных границ поликристаллических материалов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2016. Т.80. №5. С. 573-573.
12. Влияние границ срастания минералов железистых кварцитов на рудоподготовку / Гзогян Т.Н., Головин Ю.И., Тюрин А.И., Гзогян С.Р. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. №3. С. 154-162.
13. Адаптация технологий сухой переработки горно-промышленных отходов: метод. указания / Шадрунова И.В., Ожогина Е.Г., Орехова Н.Н., Горлова О.Е., Чекушина Т.В., Колодежная Е.В., Стефунько М.С., Воробьев К.А. Екатеринбург, 2018. 50 с.
14. Никандров С. Н. Согласованная система классификаций основных групп породообразующих минералов (амфиболов, пироксенов, слюд) как матричных моделей. Геология и минералогия Ильменского комплекса: ситуация и проблемы. Мисс, 2006. С. 131-160.
15. Халкечев Р.К., Каширский А.С., Халкечев К.В. Управление технологией разрушения материалов на основе математического моделирования устойчивого и неустойчивого развития трещин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. №11. С. 359-366.
16. Хопунов Э.А. Проблемы моделирования дезинтеграции руд // Современные научные исследования и инновации. 2016. №1. С. 102-112.
17. Обоснование параметров шлаков черной и цветной металлургии для селективной центробежно-ударной дезинтеграции / Горлова О.Е., Орехова Н.Н., Колодежная Е.В., Колкова М.С. // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения (Плаксинские чтения – 2022): материалы междунар. конф. М., 2022. С. 365-368.
18. Чантурия В.А., Шадрунова И.В., Горлова О.Е. Инновационные процессы глубокой и экологически безопасной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т.13. №2(48). С. 224-237.
19. Зарубин М.Ю. Нейронные сети в системах управления процессами измельчения и обогащения руд черных металлов // Современные тенденции технических наук: материалы III Междунар. науч. конф., г. Казань, октябрь 2014 г. Казань: Бук, 2014. С. 33-40.
20. Коннова Н.И. Рудная и технологическая минералогия: учеб. пособие. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. 176 с. ISBN 978-5-7638-4086-5
21. Количественный анализ изображений (structure.by). <http://structure.by/index.php/metallografiya/31-kolichestvennyj-analiz-izobrazhenij>
22. Оценка селективности дезинтеграции металлургических шлаков / Шадрунова И.В., Ожогина Е.Г., Колодежная Е.В., Горлова О.Е. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. №5. С. 180-190.
23. Технологии сухого обогащения природного и техногенного сырья с использованием центробежно-ударной техники / Артамонов А.В., Гаркави М.С., Горлова О.Е., Колодежная Е.В., Шадрунова И.В. // Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья: материалы международной научно-практической конференции, приуроченной к 90-летию со дня основания института «Уралмеханобр». Екатеринбург, 2019. С. 140-143.
24. Шадрунова И.В., Горлова О.Е., Колодежная Е.В. Технология получения высококачественных концентратов из отвальных металлургических шлаков // Обогащение руд. 2019. №4. С. 54-60.

References

1. Marchenko N.V., Kovtun O.N. *Metallurgicheskoe syrie* [Metallurgical raw materials]. Krasnoyarsk, 2017, 221 p. (In Russ.)
2. Khopunov E.A. A role of load factors in forming the selective crushing of ores. *Obogashchenie rud* [Ore beneficiation]. 2011;(2):24. (In Russ.)
3. Aleksandrova T.N., Afanasova A.V., Kuznetsov V.V., Babenko T.A. Study on selective disintegration processes of copper-nickel ores from the Zapolyarny deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2021;(12):73-87. (In Russ.)
4. Smolyakov A.R. Interfaces of the mineral intergrowth in ore. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2007;(11):346-353. (In Russ.)
5. Ramdohr P. *Rudnye mineraly i ikh srastaniya* [Ore minerals and their intergrowth]. Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1962, 1432 p. (In Russ.)

6. Pirogov B.I. Methodology of process mineralogy and nature of process properties of minerals. *Rezultaty fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy po razrabotke metodik tekhnologicheskoy otsenki rud metallov i promyshlennykh mineralov na rannikh stadiyakh geologorazvedochnykh rabot* [Results of basic and applied studies on developing procedures for a technological assessment of metal ores and industrial minerals at early stages of exploration activities]. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2006, p. 6. (In Russ.)
7. Smolyakov A.R. Release of minerals during ore crushing. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2007;(8):224-234. (In Russ.)
8. Gazaleeva G.I. et al. Criteria of selecting optimal ore preparation process flow charts. *Obogashchenie rud* [Ore beneficiation]. 2015;(6):3-8. (In Russ.)
9. Morozov V.V., Demyanenko A.P., Nikolaeva T.S. Study on the stage beneficiation of mixed copper-molybdenum ores during stage-by-stage release of mineral complexes. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2010;(9):128-135. (In Russ.)
10. Vasiliev P.V. *Razrabotka metoda prognozirovaniya i kontrolya stepeni raskrytiya magnetita na osnove stereologicheskogo analiza pri obogashchenii zhelezistykh kvartsitov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of the method for predicting and monitoring of the release of magnetite based on a stereological analysis during beneficiation of ferruginous quartzites: PhD thesis]. Moscow: Moscow Institute of Mining, 1989. 194 p.
11. Golovin Yu.I. et al. Size effects of elastic and strength properties of separate phases and interface boundaries of polycrystalline materials. *Izvestiya Rossiiskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics]. 2016;80(5):573-577. (In Russ.)
12. Gzogyan T.N., Golovin Yu.I., Tyurin A.I., Gzogyan S.R. Influence of the interface of intergrowth of ferruginous quartzite minerals on ore preparation. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Sciences]. 2017;(3):154-162. (In Russ.)
13. Shadrunkova I.V., Ozhogina E.G., Orekhova N.N., Gorlova O.E., Chekushina T.V., Kolodezhnaya E.V., Stefunko M.S., Vorobev K.A. *Adaptatsiya tekhnologiy sukhoy pererabotki gornopromyshlennykh otkhodov: metod. ukazaniya* [Adapting technologies of dry processing of mining wastes: guidelines]. Yekaterinburg, 2018, 50 p. (In Russ.)
14. Nikandrov S.N. An approved system of classifications of main groups of rock-forming minerals (amphiboles, pyroxenes, micas) as matrix models. *Geologiya i mineralogiya Ilmenogorskogo kompleksa: situatsiya i problemy* [Geology and mineralogy of the Ilmenogorsk complex: situation and difficulties]. Miass, 2006, pp. 131-160. (In Russ.)
15. Khalkechev R.K., Kashirskiy A.S., Khalkechev K.V. Controlling the technology of crushing materials based on a mathematical simulation of sustainable and unsustainable cracking. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2014;(11):359-366. (In Russ.)
16. Khopunov E.A. Difficulties of simulating the ore disintegration. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Modern Research and Innovation]. 2016;(1):102-112. (In Russ.)
17. Gorlova O.E., Orekhova N.N., Kolodezhnaya E.V., Kolkova M.S. Providing a rationale for parameters of ferrous and non-ferrous metallurgical slags for the selective centrifugal impact disintegration. *Sovremennye problemy kompleksnoy i glubokoy pererabotki mineralnogo syrya prirodnogo i tekhnogennogo proizvodstva (Plakinskies chteniya – 2022): materialy mezhdunar. konf.* [Current difficulties of integrated and advanced processing of mineral raw materials of natural and technology-related origins (The 2022 Plaksin Readings): Proceedings of the International Conference]. Moscow, 2022, pp. 365-368. (In Russ.)
18. Chanturiya V.A., Shadrunkova I.V., Gorlova O.E. Innovative processes of advance and environmentally safe processing of technology-related raw materials during new economic challenges. *Ustoychivoe razvitiye gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories]. 2021;13(2(48)):224-237. (In Russ.)
19. Zarubin M.Yu. Neural networks in systems for controlling ferrous metal ore crushing and beneficiation processes. *Sovremennye tendentsii tekhnicheskikh nauk: materialy III Mezhdunar. nauch. konf.* [Current trends in engineering sciences: Proceedings of the 3rd International Research Conference]. Kazan: Book, 2014, pp. 33-40. (In Russ.)
20. Konnova N.I. *Rudnaya i tekhnologicheskaya mineralogiya: ucheb. posobie* [Ore and process mineralogy: study guide]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2019, 176 p. (In Russ.) ISBN 978-5-7638-4086-5
21. A quantitative analysis of images. Available at: <http://structure.by/index.php/metallografiya/31-kolichestvennyj-analiz-izobrazhenij>
22. Shadrunkova I.V., Ozhogina E.G., Kolodezhnaya E.V., Gorlova O.E. Assessing selectivity of the disintegration of metallurgical slags. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Sciences]. 2013;(5): 180-190. (In Russ.)
23. Artamonov A.V., Garkavi M.S., Gorlova O.E., Kolodezhnaya E.V., Shadrunkova I.V. Dry beneficiation technologies for natural and technology-related raw materials using centrifugal impact machines. *Sovremennye tendentsii v oblasti teorii i praktiki dobychi i pererabotki mineralnogo i tekhnogennogo syrya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k 90-letiyu so dnya osnovaniya instituta «Uralmekhanobr»* [Current trends in the field of theory and practice of mining and processing of mineral and technology-related raw materi-

als: Proceedings of the International Research and Practical Conference devoted to the 90th anniversary of the Uralmekhanobr Institute]. Yekaterinburg, 2019, pp. 140-143. (In Russ.)

24. Shadrunkova I.V., Gorlova O.E., Kolodezhnaya E.V. Technology of producing high-quality concentrates from dump metallurgical slags. *Obogashchenie rud* [Ore beneficiation]. 2019;(4):54-60. (In Russ.)

Поступила 03.08.2023; принята к публикации 16.08.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 03/08/2023; revised 16/08/2023; published 25/09/2023

Горлова Ольга Евгеньевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: gorlova_o_e@mail.ru.

Орехова Наталья Николаевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: n_orehova@mail.ru.

Колодежная Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела горной экологии, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика В.Н. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия. Email: kev@uralomega.ru.

Колкова Мария Сергеевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель кафедры геологии, маркшейдерского дела и обогащения полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: kolkova_ms@mail.ru.

Глаголева Ирина Викторовна – старший преподаватель кафедры прикладной математики и информатики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: iva_290983@mail.ru.

Olga E. Gorlova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Geology, Mine Survey and Beneficiation of Minerals, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: gorlova_o_e@mail.ru.

Natalia N. Orekhova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Geology, Mine Survey and Beneficiation of Minerals, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: n_orehova@mail.ru.

Ekaterina V. Kolodezhnaya – PhD (Eng.), Lead Researcher of the Mining Ecology Department, Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Email: kev@uralomega.ru.

Mariya S. Kolkova – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Lecturer of the Department of Geology, Mine Survey and Beneficiation of Minerals, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: kolkova_ms@mail.ru.

Irina V. Glagoleva – Senior Lecturer of the Department of Applied Mathematics and Information Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: iva_290983@mail.ru.

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

УДК 622.79

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-27-41



СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССОВ СГУЩЕНИЯ И ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ОТХОДОВ ФЛОТАЦИИ УГЛЕЙ

Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю.

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

Аннотация. Работа выполнена с целью выявления наиболее перспективных направлений совершенствования процессов сгущения и обезвоживания отходов флотации углей. Показано, что актуальность этой темы связана с тенденцией к увеличению объёма углей, обогащаемых флотацией, и содержания в них тонких частиц породных минералов, в том числе глинистых, что, в свою очередь, приводит к увеличению количества образующихся отходов флотации и возрастанию трудности их обезвоживания. С другой стороны, требования по охране окружающей среды и рациональному использованию природных ресурсов обуславливают целесообразность работы углеобогачительных фабрик с замкнутым водно-шламовым циклом, обеспечивающим получение осветлённой чистой воды для повторного использования на фабрике и твёрдой фазы обезвоженного осадка для последующего транспортирования и складирования в сухом виде. В статье приведены сведения о составе и физико-химических характеристиках отходов флотации, влияющих на показатели процессов сгущения и обезвоживания. Рассмотрены процессы сгущения суспензий отходов флотации в сгустителях: радиальных, цилиндрических, в том числе пастовое, и пластинчатых. Показана целесообразность применения радиальных сгустителей со взвешенным слоем и осадкоуплотнителем для получения слива с возможно более низким содержанием твёрдой фазы и концентрированной сгущённой суспензии. Приведены сведения о процессах обезвоживания отходов флотации: фильтрованием на ленточных и камерных фильтр-прессах, вакуум-фильтрах, осадительных центрифугах. Указаны достоинства и недостатки рассмотренных методов обезвоживания. Показано, что перспективными способами интенсификации процессов сгущения и обезвоживания отходов флотации являются: совместное применение коагулянтов и флокулянтов; оптимизация значений расхода флокулянтов и режима их перемешивания с суспензией, в том числе дробная подача; рециркуляция части слива в процессе сгущения.

Ключевые слова: отходы флотации углей, сгущение, обезвоживание, сгустители, фильтр-прессы, флокуляция

© Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., 2023

Для цитирования

Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю. Состояние процессов сгущения и обезвоживания отходов флотации углей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 27-41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-27-41>



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

THICKENING AND DEWATERING OF COAL FLOTATION TAILINGS

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu.

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

Abstract. This research was carried out to determine the most promising ways of improving thickening and dewatering of coal flotation tailings. It has been shown that the significance of this topic is associated with a trend towards increasing the volume of coal beneficiation by flotation, and the content of fine particles of rock minerals, including clay minerals, which, in turn, leads to an increase in flotation tailings and the difficulty of their dewatering. On the other hand, the requirements for environmental protection and rational use of natural resources make it feasible to operate coal preparation plants with a closed water-sludge cycle, which provides clarified clean water for reuse at the coal preparation plant, and a solid phase in the form of a dewatered cake for subsequent transportation and storage in a dry state. This paper provides information on the composition and physical and chemical properties of coal flotation tailings, influencing the performance of thickening and dewatering processes. The authors described a thickening process of suspensions of flotation tailings in thickeners: radial, cylindrical-conical, including paste, and lamella thickeners. The authors showed efficiency of radial thickeners with a fluidized bed and a sludge densifier for producing the overflow with minimum solids content and highly concentrated underflow. The article contains information on dewatering of coal flotation tailings: by filtration on belt and chamber press filters, vacuum filters, and solid bowl centrifuges. The authors mentioned the advantages and disadvantages of the said dewatering technologies and showed that the promising methods of intensifying the processes of thickening and dewatering of flotation tailings are a combined application of coagulants and flocculants, an optimized flow rate of flocculants and the mode of their mixing with a suspension, including fractional dosing, and recycling of some overflow during thickening.

Keywords: coal flotation tailings, thickening; dewatering; thickeners; press filters; flocculation

For citation

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu. Thickening and Dewatering of Coal Flotation Tailings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 27-41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-27-41>

Введение

В настоящее время в связи с тенденцией увеличения объёма углей, направляемых на обогащение, и содержанием в них тонких частиц возрастает доля углей, особенно коксующихся марок, обогащаемых флотацией. Эти причины, а также ужесточение требований по охране окружающей среды, в свою очередь, актуализируют проблему повышения эффективности методов обезвоживания продуктов флотации, в том числе отходов, для того чтобы свести к минимуму вредные последствия для окружающей среды. Так как метод флотации применяют на 28-ми обогатительных фабриках (ОФ) России [1], то указанная проблема имеет существенное значение в масштабах угольной отрасли. С учетом того, что выход отходов флотации составляет порядка 5% от рядового угля, направляемого на обогащение [2], то количество твёрдой фазы этого материала, ежегодно образующегося на ОФ России, составляет ориентировочно 5-7 млн т.

Отходы флотации получают на ОФ непосредственно с флотационных машин в виде относительно малоконцентрированной суспензии (содержание твёрдой фазы, как правило, в пределах от 10 до 100 кг/м³). При этом объёмный расход такой суспензии весьма значителен, и на некоторых ОФ достигает 3000 м³/ч. Другими словами, более половины от общего объёма воды, циркулирующей на ОФ, приходится на суспензию отходов флотации. Поэтому её разделение с получением обезвоженной твёрдой фазы и осветленной воды для повторного использования в технологическом цикле представляет важную задачу для ОФ. Практика сброса отходов флотации в наружные илосборники, существовавшая вплоть до конца XX века, в настоящее время неприемлема, что обусловлено требованиями по охране окружающей среды. Поэтому вновь строящиеся ОФ проектируют с замкнутой водно-шламовой схемой, а на действующих предприятиях осуществляют реконструкцию схемы для её замыкания. Такие схемы исключают жидкие выбросы в окружающую сре-

ду, предусматривают глубокое (с применением флокулянтов) осветление отходов флотации с направлением осветленной воды в технологическую схему ОФ и обезвоживание твёрдой фазы с получением осадка, пригодного для последующего транспортирования и складирования в породном отвале [3, 4]. Также известны альтернативные способы утилизации обезвоженных отходов флотации, включая использование в качестве:

- компонента закладки для заполнения пустых горных выработок [5];
- сырья для производства строительных материалов [6, 7];
- сырья для получения германия, редких, рассеянных и других потенциально ценных элементов [8];
- сырья для производства сорбентов [9].

В связи с вышеизложенным очевидно, что дальнейшее совершенствование технологического комплекса обогащения углей немислимо без повышения эффективности процессов сгущения и обезвоживания отходов флотации углей.

Целью настоящей работы является выявление наиболее перспективных направлений совершенствования процессов сгущения и обезвоживания отходов флотации углей с учетом их состава и свойств, а также дальнейшей утилизации твердой фазы.

Состав и свойства отходов флотации

На углеобогащательных фабриках непосредственно с флотационных машин получают относительно малоконцентрированную суспензию отходов флотации: содержание твёрдой фазы, как правило, в пределах 10-50 кг/м³ [3, 4]. Поэтому для получения чистой воды и обезвоженной твёрдой фазы применяют, как правило, двухстадийную схему обработки, включающую последовательные операции:

- сгущение под действием силы тяжести с применением флокулянтов для получения чистой оборотной воды (слива) и сгущённой суспензии с содержанием твёрдой фазы порядка 200 кг/м³ и более;
- обезвоживание сгущённой суспензии фильтрованием или центрифугированием с применением флокулянтов, при этом получают осветленную воду и осадок, пригодный для транспортирования и складирования в сухом виде.

Для определения рациональных условий складирования отходов флотации и оценки возможности утилизации их как потенциально тех-

ногенное сырьё необходимы данные по *минеральному составу твёрдой фазы*. Согласно [3, 10, 11] в составе отходов флотации содержатся: глины (41-92%), угольное вещество (до 17%), пирит (до 12%), карбонаты (до 6%). Вещественный состав отходов флотации представлен оксидами алюминия, кремния, железа, солями щелочных и щелочноземельных металлов [3]. Зольность находится в широких пределах – от 55 до 85%, как правило, 70-75% [4, 12]. С увеличением зольности, а также дисперсности твёрдой фазы возрастает трудность её обезвоживания.

Основой для разработки рациональных режимов сгущения и обезвоживания суспензий отходов флотации являются данные по *гранулометрическому составу твёрдой фазы*. Доля тонких частиц весьма значительна: выход класса крупностью менее 10 мкм составляет порядка 50-60%, а менее 1 мкм – 10-15% [9, 13, 14], что связано с высоким содержанием глинистых минералов, склонных к набуханию и деструкции в водной среде. Так как субмикронные частицы, в отличие от микронных, флокулируются по перикинетическому варианту, причём время этого процесса составляет несколько сотен секунд [14], то возможно загрязнение слива субмикронными частицами.

Для рационального выбора режима применения флокулянтов и коагулянтов существенное значение имеет *электрокинетический потенциал твердой фазы* ζ , значение которого необходимо для оценки агрегативной устойчивости суспензий отходов флотации. В слабокислой, нейтральной и щелочной средах ζ находится в области отрицательных значений [9]. Это обусловлено диссоциацией потенциалопределяющих функциональных групп, в основном гидроксильных и силанольных на поверхности глинистых частиц [15]. Значение ζ при естественном рН составляет $-(20...40)$ мВ. Зависимость ζ от рН, как правило, монотонно убывающая в области отрицательных значений, но при рН свыше 9 возможно некоторое уменьшение абсолютного значения; в целом суспензии отходов флотации рассматривают как агрегативно устойчивые [16].

Для обоснования эффективного использования флокулянтов и коагулянтов необходимы данные по *ионному составу водной фазы* суспензии отходов флотации. Он аналогичен составу оборотной воды углеобогащательных фабрик и включает, согласно [3], катионы калия, натрия, кальция, магния, хлорид-, сульфат- и гидрокарбонат-анионы. Суммарное содержание раство-

рённых веществ от 1,6 до 4,1 кг/м³, ионная сила от 0,02 до 0,07 г-ион/л. Расчётные данные, приведенные в работе [17], показывают, что с увеличением ионной силы при прочих равных условиях для частиц с абсолютным значением дзета-потенциала свыше 30 мВ значение потенциала поверхности уменьшается; видимо, это обусловлено сжатием двойного электрического слоя. В работе [18] указано на способность глинистых веществ в суспензии отходов флотации к набуханию и ионному обмену в водной среде, причём отмечено, что с увеличением концентрации катионов кальция уменьшается набухание и, соответственно, повышается эффективность обезвоживания суспензии.

Важное практическое значение для определения режимов транспортирования суспензий имеют их *реологические характеристики*. Согласно [19], суспензии тонкодисперсных отходов обогащения минерального сырья, в том числе углей, при сравнительно низких значениях концентрации твёрдой фазы C_T проявляют свойства ньютоновских жидкостей. С увеличением значения C_T наблюдается тенденция к проявлению псевдопластичных свойств. Причина этого, вероятно, заключается в образовании структур коагуляционного типа. При возрастании C_T свыше 18-20 мас.% эти суспензии приобретают свойства твердообразных псевдопластичных тел: при напряжении сдвига τ , меньшем по сравнению с предельным статическим значением τ_y , имеет место упругая деформация, а при большем – течение с уменьшающейся вязкостью. С ростом C_T от 18-20 до 28-30 мас.% значение τ_y увеличивается от 0 до 600-800 Па.

Общие принципы организации обработки отходов флотации на ОФ

Обработка отходов флотации на ОФ обусловлена необходимостью получения осветленной воды для повторного использования в технологическом цикле обогащения и обезвоженной твёрдой фазы в виде осадка, пригодного для транспортирования и складирования в сухом виде. Поскольку концентрация исходной суспензии относительно невелика, то для удаления большей части свободной воды наиболее экономически целесообразной операцией является сгущение под действием силы тяжести. В результате получают осветлённую воду (слив) и сгущённую суспензию, дальнейшая обработка которой зависит от содержания твёрдой фазы C_T :

– при сравнительно низких значениях C_T , порядка 200-400 кг/м³, осуществляется дальнейшее обезвоживание сгущённой суспензии фильтрованием или центрифугированием;

– при более высоких значениях C_T возможно направление сгущённой суспензии в породный отвал для сухого складирования.

Важнейшим условием эффективного разделения суспензии отходов флотации в этих операциях является применение флокулянтов. В настоящее время широко применяют реагенты отечественного и зарубежного производства марок «Праестол», «Технофлок», «Суперфлок» и ряд других. Практика работы ОФ показала [4], что для сгущения суспензий наиболее эффективны анионоактивные флокулянты с молярной массой выше 10^7 кг/кмоль и долей отрицательно заряженных групп порядка 30-60%; расход, как правило, до 100 г/т. В отдельных случаях после анионоактивного флокулянта предусматривают подачу катионоактивного с молярной массой $(3-10) \cdot 10^6$ кг/кмоль, долей положительно заряженных групп порядка 30-80% и расходом до 20 г/т. Для обезвоживания на ленточных фильтр-прессах общепринятой практикой является последовательная подача анионоактивного и катионоактивного флокулянтов с вышеуказанными свойствами, причём суммарный расход составляет от 300 до 1000 г/т. Рациональные значения расходов флокулянтов определяют опытным путём, как правило, в лабораторных условиях: для процесса сгущения – по скорости осаждения суспензии; для процессов обезвоживания фильтрованием – по времени капиллярного всасывания либо по удельному объёмному сопротивлению осадка; для центрифугирования – по влажности осадка и содержанию твёрдой фазы в фугате.

Сгущение отходов флотации

Суть процесса заключается в разделении исходной суспензии под действием силы тяжести на осветлённую воду и концентрированную суспензию с применением флокулянтов. На практике сгущение и осветление осуществляют одновременно в одном аппарате – сгустителе. Механизм процесса заключается в следующем. Макромолекулы флокулянта соединяют мостиковыми связями значительное количество частиц, порядка нескольких десятков и сотен, в результате чего образуются относительно крупные флокулы (диаметром порядка 50-500 мкм), быстро осаждающиеся под действием силы тя-

жести. Макромолекулы анионоактивных флокулянтов и частиц твёрдой фазы имеют одноименный (в данном случае отрицательный) заряд, поэтому закрепление макромолекул на частицах происходит за счёт притяжения отрицательно заряженных групп флокулянта катионами диффузной части двойного электрического слоя [20]. Существенной особенностью описываемого процесса является протекание флокуляции по двум различным вариантам [14]:

- ортокINETическому – для частиц крупностью свыше 1 мкм; взаимное перемещение частиц и макромолекул флокулянта происходит за счёт конвективного массопереноса, характерное время процесса – несколько секунд;

- перикINETическому – для субмикронных частиц, перемещающихся относительно макромолекул флокулянта под действием броуновского движения, характерное время процесса – сотни секунд. Поэтому если время пребывания суспензии в сгустителе меньше времени протекания перикINETического процесса, то существует вероятность извлечения субмикронных частиц в слив. В то же время последовательное применение двух флокулянтов различной природы (как правило, анионоактивного, а затем – катионоактивного) позволяет получить практически чистый слив.

В настоящее время отечественными и зарубежными производителями выпускаются сгустители следующих конструкций:

- радиальные;
- цилиндрикоконические;
- пластинчатые.

Ведущие производители сгустителей: АО «Машзавод "Труд"» (Новосибирск, Россия); ОАО ПО «Иркутский завод тяжёлого машиностроения» (Иркутск, Россия); "FLShmidt & Co. A/S" (Дания-США); "Enviro Clear Company, Inc." (США), "WesTech Engineering, LLC" (США), "Metso Outotec Group" (Финляндия) и др.

Радиальные сгустители (РС) получили широкое распространение в отечественной и зарубежной практике углеобогащения. На ОФ России применяют, как правило, РС с диаметром сгустительного чана от 16 до 30 м [4], за рубежом – до 125 м [21]. Привод – центральный или периферический. Технологическая схема сгущения отходов флотации в РС включает: систему приготовления и дозирования растворов флокулянтов; собственно сгуститель; насосы для слива и для сгущённой суспензии. Согласно [4], значения технологических показателей ра-

боты РС с применением флокулянтов на ОФ Кузбасса составляют:

- удельная нагрузка по исходной суспензии – 0,5-1,5 м³/м²·ч;
- расход флокулянта – до 100 г/т;
- содержание твёрдой фазы: в сливе – до 10 кг/м³, в сгущённой суспензии 200-400 кг/м³;
- время пребывания суспензии в сгустителе – 0,5-2,0 ч.

РС сравнительно просты по конструкции. Благодаря сравнительно большому объёму время пребывания суспензии в сгустителе, как правило, достаточно для эффективного осветления; процесс сгущения в них поддаётся автоматизации. Существенным недостатком РС является большая занимаемая площадь и, как следствие, значительная материалоёмкость. Вследствие относительно небольшой глубины сгустительного чана значение гидростатического давления не позволяет повысить содержание твёрдой фазы в сгущённой суспензии за счёт её уплотнения.

Цилиндрикоконические сгустители (ЦКС) отличаются от радиальных большим отношением глубины к диаметру, благодаря этому обеспечивается более высокая степень сгущения суспензии за счёт уплотнения осадка в конической части сгустителя под действием гидростатического давления. Поэтому такие сгустители называются также сгустителями с осадкоуплотнителем. Диаметр выпускаемых в настоящее время ЦКС – до 24 м [22]. По сравнению с РС ЦКС обеспечивают возможность достижения более высоких значений удельной нагрузки – до 4 м³/м²·ч. В то же время очевидно, что поверхность осаждения сгустителя возрастает пропорционально квадрату диаметра чана. Поэтому в случаях, когда суммарный объёмный расход суспензии отходов флотации, поступающей на сгущение, превышает 1500-2000 м³/ч, более целесообразным представляется применение РС.

В отличие от РС, в ЦКС может быть реализован процесс пастового сгущения. Он заключается в получении сгущённой суспензии с максимальным возможным содержанием твёрдой фазы (порядка 40-60 % по массе) для того, чтобы исключить последующие операции механического обезвоживания суспензии [23]. Согласно [24], для этого применяют ЦКС с диаметром до 25 м. В ряде случаев предусматривается перемешивание сгущённой суспензии с отходами гравитационного обогащения углей.

Достоинства технологии пастового сгущения [25]:

- невысокие капитальные и эксплуатационные затраты по сравнению с технологиями, предусматривающими механическое обезвоживание осадка;
- возможность получения чистого слива;
- относительно небольшая площадь территорий для складирования отходов и меньшие потери воды по сравнению с технологическими схемами, предусматривающими сброс относительно малоконцентрированных суспензий отходов в илонакопители.

Недостатки:

- для получения сгущённого продукта с высокой концентрацией твёрдой фазы требуется значительное время пребывания суспензии в сгустителе – порядка нескольких часов; в условиях действующего производства это не всегда возможно, так как приводит к значительному снижению производительности сгустителей;
- сложность осуществления и высокие затраты энергии на транспортирование сгущённой суспензии в породный отвал, особенно на большие расстояния;
- применение этой технологии нецелесообразно для предприятий, на которых уже имеется оборудование для сгущения и обезвоживания отходов флотации.

Таким образом, применение технологии пастового сгущения ограничено. Оно может быть целесообразным для предприятий, расположенных в засушливых регионах, для которых характерен дефицит воды [25], а также в тех случаях, когда площадь территорий для складирования отходов ограничена, а расстояние от сгустителя до места складирования сравнительно небольшое (как правило, несколько сотен метров). В то же время большая часть ОФ России расположена в регионах, не испытывающих проблем с водоснабжением, также есть территории для размещения отходов; на многих ОФ технологические схемы предусматривают глубокое обезвоживание отходов флотации. Поэтому в России технология пастового сгущения не получила распространения.

Пластинчатые сгустители [27]. Принцип их работы заключается в том, что осаждение частиц твёрдой фазы суспензии происходит при ламинарном течении снизу вверх через пакет пластин, расположенных наклонно. Осевшие частицы двигаются по поверхностям пластин вниз, собираются в бункере, где происходит уплотне-

ние осадка, и удаляются в виде сгущённого продукта. Жидкая фаза суспензии, двигаясь вдоль пластин вверх, удаляется в виде слива. По сравнению с РС пластинчатые характеризуются следующими преимуществами: компактностью; возможностью достижения высоких значений удельной нагрузки по исходной суспензии – до $12 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; невысокой материало- и энергоёмкостью. Недостатки: сложность в изготовлении; сравнительно высокое содержание твёрдой фазы в сливе из-за возможных турбулентных пульсаций при течении суспензии между пластинами.

Особую группу составляют *сгустители со взвешенным слоем*, этот принцип может быть реализован как для РС, так и для ЦКС.

Особенности конструкции РС со взвешенным слоем [3, 28]:

- загрузочное устройство заглублено на уровень, соответствующий нижней части зоны осаждения;
- привод гребкового устройства – центральный.

Принцип работы сгустителей со взвешенным слоем заключается в том, что благодаря заглублению загрузочного устройства частицы твёрдой фазы и образующиеся флоккулы находятся во взвешенном состоянии в средней части аппарата. Таким образом, суспензия фильтруется через взвешенный слой, это обеспечивает высокую степень чистоты слива, а также возможность увеличения удельной нагрузки по исходной суспензии ориентировочно в 1,5-2 раза. В то же время наличие взвешенного слоя затрудняет получение сгущённой суспензии с высоким содержанием твёрдой фазы. Поэтому радиальные сгустители со взвешенным слоем в некоторых случаях снабжают осадкоуплотнителем, то есть глубоким конусом, присоединённым к нижней части сгустительного чана. Такие сгустители характеризуются большей металлоёмкостью и высотой по сравнению с радиальными сгустителями традиционной конструкции. Но, по нашему мнению, они наиболее эффективны для сгущения отходов флотации при сравнительно высоких значениях удельной нагрузки по исходной суспензии в тех случаях, когда требуется получение одновременно и чистого слива, и сгущённой суспензии с относительно высоким содержанием твёрдой фазы. В качестве примера на **рис. 1** представлена схема устройства радиального сгустителя со взвешенным слоем и осадкоуплотнителем, выпускаемого фирмой "Enviro Clear Company, Inc." (США) [29].

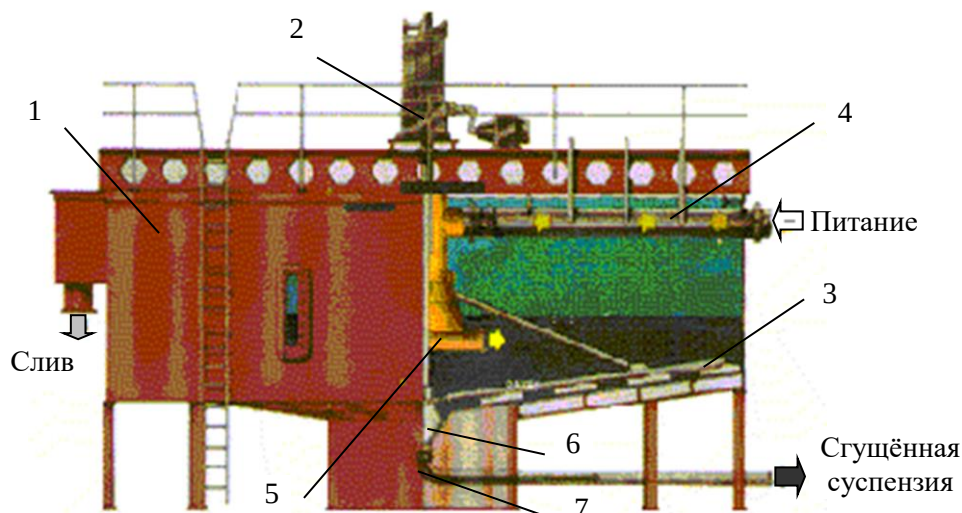


Рис. 1. Схема устройства радиального сгустителя со взвешенным слоем и осадкоуплотнителем фирмы "Enviro Clear Company, Inc." [29]: 1 – сгустительный чан; 2 – привод; 3 – гребковое устройство; 4 – питающая труба; 5 – загрузочное устройство; 6 – осадкоуплотнитель; 7 – разгрузочное устройство

Fig. 1. A structure diagram of the radial thickener with a fluidized bed and a sludge densifier by Enviro-Clear Company, Inc. [29]: 1 is a thickening tank; 2 is a drive; 3 is revolving arms; 4 is a feed pipe; 5 is a charging device; 6 is a sludge densifier; 7 is a discharging device

Обезвоживание отходов флотации

Обезвоживание на *ленточных фильтр-прессах* (ЛФП) получило широкое распространение в практике углеобогащения с конца XX века [30]. Суть этого процесса заключается в механическом отжиме осадка, образующегося при удалении из суспензии свободной влаги и зажатого между двумя фильтрующими лентами, двигающимися синхронно, при прохождении через систему валков. Ведущие производители ЛФП: "Andritz AG" (Австрия); "FLShmidt & Co. A/S" (Дания-США); "Phoenix Process Equipment" (США); "ДАКТ Инжиниринг" (Россия) и ряд других. Технологическая схема предусматривает последовательное перемешивание сгущённой суспензии отходов флотации с растворами анионоактивного и катионоактивного флокулянтов в гладких трубопроводах или статических смесителях, и последующее обезвоживание на ЛФП.

Технологические показатели работы ЛФП при обезвоживании отходов флотации [3, 4, 24]:

- содержание твёрдой фазы в исходной суспензии – 300-550 кг/м³;
- суммарный расход флокулянтов – до 1000 г/т;
- удельная производительность по твёрдой фазе – до 6 т/ч на 1 м ширины ленты;
- влажность обезвоженного осадка – 35-45%;
- содержание твёрдой фазы в фильтрате – до 30 кг/м³.

Достоинства ЛФП: сравнительно низкие капитальные затраты; возможность получения обезвоженного осадка, пригодного для транспортирования и складирования в сухом виде; непрерывный режим работы; относительная простота устройства. Недостатки: значительные затраты на флокулянты; необходимость точного подбора и соблюдения реагентного режима.

Камерные фильтр-прессы (КФП) работают под давлением до 1,5 МПа, благодаря этому обеспечивается наиболее высокая (по сравнению с другими способами) степень обезвоживания отходов флотации: влажность осадка без просушки составляет 18-26% [31], с просушкой осадка воздухом или с отжимом при помощи диафрагм – порядка 20% и менее [32]. Для КФП, оснащённых диафрагмами, предусматривается подача воды под давлением, а для КФП с просушкой осадка – система подачи сжатого воздуха. К числу ведущих производителей КФП относятся: ООО «Гидротренд» (Екатеринбург, Россия); "Andritz AG" (Австрия); "FLShmidt & Co. A/S" (Дания-США); "JingJin Equipment Inc." (Китай) и др.

Технологические показатели работы КФП при обезвоживании отходов флотации [24, 32]:

- содержание твёрдой фазы в исходной суспензии – 25-45 мас.%;
- влажность обезвоженного осадка: без просушки – 18-26%, с просушкой воздухом или отжимом – 15-20%;

- удельная производительность по твёрдой фазе – $10\text{--}50 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$;
- содержание твёрдой фазы в фильтрате – до 10 кг/м^3 .

В России КФП эксплуатируют на ряде углеобогащательных предприятиях, в том числе ЦОФ «Печорская» (производства фирмы "McLanahan Corporation") [32], ОФ «Щедрухинская», ГОФ «Тайбинская», ГОФ «Коксовая» [33, 34].

Достоинства КФП [35]: высокая степень обезвоживания, в том числе для труднофильтруемых осадков; сравнительно невысокие затраты на флокулянты; устойчивый режим работы; высокое значение извлечения твёрдой фазы в осадок (не менее 98%); возможность получения чистого фильтрата. Недостатки: высокие капитальные затраты; периодический режим работы, что, в свою очередь, обуславливает низкую удельную производительность по твёрдой фазе; высокая металлоёмкость; большие габаритные размеры, особенно длина (до 15 м для КФП с площадью поверхности фильтрования порядка 1400 м^2), что обуславливает сложность монтажа фильтров на ОФ. По нашему мнению, применение КФП целесообразно в тех случаях, когда требуется получение осадка с возможно более низкой влажностью и чистого фильтрата. При этом предпочтительнее крупнометражные КФП (с площадью поверхности фильтрования порядка 1000 м^2 и более), так как это позволит несколько снизить капитальные и эксплуатационные затраты по сравнению с фильтрами, имеющими меньшую площадь поверхности фильтрования.

Обезвоживание на *вакуум-фильтрах – дисковых (ДВФ) и барабанных (БВФ)* – не получило широкого распространения. Причина заключается в том, что отходы флотации образуют весьма труднофильтруемые осадки, для которых значение удельного объёмного сопротивления α_0 без применения флокулянтов составляет, как правило, не менее 10^{15} м^{-2} [36]. Результаты расчётов показывают, что даже при минимальной частоте вращения дисков фильтра значение толщины осадка будет меньше минимального допустимого, составляющего порядка 7–8 мм для ДВФ и 4–5 мм для БВФ [36]. Применение флокулянтов не во всех случаях позволяет обеспечить эффективный режим работы ДВФ, так как значение α_0 при расходах флокулянта до 100 г/т снижается, как правило, примерно в 3–6 раз. При более высоких значениях расхода возможно возрастание α_0 вследствие стерического стабилизации частиц твёрдой фазы макромолекулами флокулянта, или

интенсивное осаждение флоккул в ванне фильтра, что нарушает нормальный режим его работы. Поэтому применение ДВФ представляется целесообразным для сравнительно концентрированных и легкофильтруемых суспензий отходов. Так, по данным исследований фирмы "Bokela GmbH" (Германия) [37], для суспензии отходов обогащения, содержащей сравнительно крупные частицы (средний диаметр 40 мкм) и концентрацией твёрдой фазы 50% по массе, при обезвоживании без применения флокулянтов на ДВФ с площадью поверхности фильтрования 176 м^2 удельная производительность по твёрдой фазе составила $625 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$, влажность осадка – 19–22%. На основании результатов технико-экономического анализа авторами указанной работы был сделан вывод о том, что для исследованных отходов обезвоживание на ДВФ является наиболее экономически целесообразным по сравнению с применением ленточных вакуум-фильтров и камерных фильтр-прессов: значения удельных затрат на этот процесс (в австралийских долларах на тонну) составили 0,49 против соответственно 0,78 и 0,69.

Представляет интерес также технология обезвоживания отходов флотации на керамических ДВФ. Их рабочая поверхность изготовлена из специальной мелкопористой керамики. Обезвоживание суспензий происходит под действием капиллярных сил. Регенерация фильтрующей поверхности осуществляется азотной кислотой. Как правило, эти фильтры применяют для обезвоживания тонкодисперсных концентратов. По данным НТЦ «Бакор», при обезвоживании на таком фильтре суспензии каолина, близкой по свойствам к отходам флотации углей, влажность осадка составляет около 20%, а удельная производительность по твёрдой фазе – $400\text{--}600 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ [38]. Достоинства керамических фильтров: сравнительно высокая степень обезвоживания осадка; возможность получения чистого фильтрата и в меньших затратах энергии по сравнению с ДВФ. Недостатки: необходимость использования специальной, сравнительно дорогостоящей керамики и кислотоупорных конструкционных материалов; сложность эксплуатации. Поэтому целесообразность применения названных фильтров для обезвоживания отходов флотации углей не очевидна.

Обезвоживание с применением *осадительных центрифуг (ОЦ)* известно в практике обогащения углей с последней трети XX века [3, 39, 40], однако не получило широкого распространения по причине весьма значительного уноса твёрдой фа-

зы в фугат – до 40% при влажности обезвоженного осадка 28-34% [3]. Добавление флокулянтов позволяет снизить значение уноса примерно до 5-10%, но при этом значение влажности возрастает до 40-45%. В то же время по сравнению с фильтровальным оборудованием технологическая схема обезвоживания отходов флотации на ОЦ является более простой, так как не требуется вспомогательное оборудование. В работе [41] показано, что унос твёрдой фазы в фугат может быть сокращён путём применения коагулянтов.

Методы интенсификации процессов сгущения (осветления) и обезвоживания отходов флотации

В ряде случаев возникает необходимость повышения эффективности работы действующих сгустителей и фильтров путём усовершенствования конструкции и (или) технологии. В отличие от обезвоживания угольных флотационных концентратов, для которых характерна высокая гидрофобность частиц твёрдой фазы и требуется получение осадка с возможно более низкой влажностью, в случае отходов флотации, содержащих тонкодисперсные гидрофильные частицы, требуется обеспечить минимальное возможное содержание твёрдой фазы в сливе (фильтрате), при этом осадок обезвоживают до транспортибельного состояния.

Ниже описаны известные из отечественной и зарубежной литературы способы интенсификации указанных процессов:

1) *Оптимизация режима подачи флокулянтов и их перемешивания с суспензией.* Известно, что с увеличением степени турбулентности режима перемешивания суспензии с флокулянтom сокращается необходимое для перемешивания время. С другой стороны, возрастает степень механической деструкции флоккул, что, в свою очередь, обуславливает снижение скорости осаждения. Отсюда очевидно, что при определённых параметрах гидродинамического режима перемешивания достигается оптимальная крупность флоккул, что соответствует максимальному значению скорости осаждения и минимальному значению удельного объёмного сопротивления осадка. В работе [42], посвящённой исследованию режима перемешивания суспензии отходов флотации углей с флокулянтами в гладком трубопроводе и в статическом смесителе, было показано, что зависимость величины удельного объёмного сопротивления осадка α_0 от величины объёмного расхода суспензии имеет минимум, причём для статического смесителя минимальное значение α_0

примерно в 1,5 раза меньше по сравнению с гладким трубопроводом. Оптимальные значения параметров режима перемешивания определяют, как правило, экспериментально.

Для аналитического определения оптимального режима течения суспензии, обработанной флокулянтами, была предложена методика расчёта максимального допустимого значения скорости v , обеспечивающей сохранность флоккул, при поступательном течении суспензий по трубопроводам в неизотропном турбулентном режиме [43]. В основу методики положена зависимость величины v от предельного динамического напряжения сдвига, которое, в свою очередь, зависит от среднего диаметра частиц твёрдой фазы, расхода флокулянта и его молярной массы.

Повышение эффективности перемешивания суспензий с флокулянтами может быть достигнуто путём применения компактных вращающихся мешалок, встраиваемых в трубопровод, за счёт возможности гибкого регулирования гидродинамического режима процесса путем изменения частоты вращения мешалки [44]. Также существует возможность интенсификации процессов сгущения и обезвоживания суспензий путём дробной подачи флокулянтов. По нашим данным, это обеспечивает снижение удельного объёмного сопротивления осадка на величину до 35% (рис. 2).

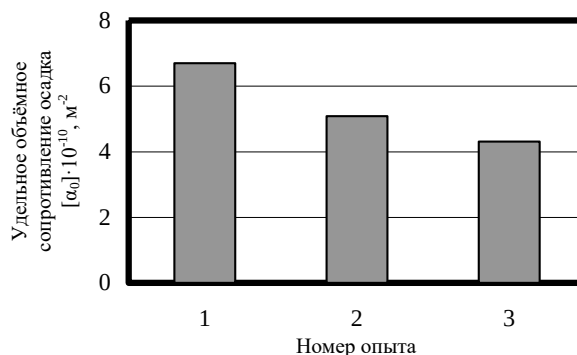


Рис. 2. Влияние дробной подачи флокулянтов на удельное объёмное сопротивление осадка при обезвоживании отходов флотации углей дренированием: 1 – 200 г/т анионоактивного и 400 г/т катионоактивного (единовременная подача); 2 – 100+100 г/т анионоактивного и 400 г/т катионоактивного; 3 – 100+100 г/т анионоактивного и 200+200 г/т катионоактивного

Fig. 2. Influence of fractional dosing of flocculants on volume resistance of the filter cake, when dewatering the coal flotation tailings by draining: 1 is 200 g/t anionic and 400 g/t cationic flocculants (charged at the same time); 2 is 100+100 g/t anionic and 400 g/t cationic flocculants; 3 is 100+100 g/t anionic and 200+200 g/t cationic flocculants

2) *Совместное применение коагулянтов и флокулянтов.* Данный способ широко применяется для очистки сточных вод [45]. В практике углеобогащения этот способ может быть оправдан при сгущении и обезвоживании отходов флотации с высоким содержанием тонкодисперсных глинистых частиц [11, 46]. Применяются коагулянты-электролиты (водорастворимые соли Al, Ca, Mg, Fe), реже – гетерокоагулянты. Как правило, коагулянт добавляют к суспензии перед подачей флокулянта для уменьшения отрицательного заряда частиц твёрдой фазы. Это, в свою очередь, создает благоприятные условия для последующего закрепления на поверхности частиц макромолекул флокулянтов. Известно также о применении алюминиевого коагулянта совместно с анионоактивным флокулянтom для обезвоживания суспензии отходов флотации на ЛФП [4]. Существенным недостатком описанного способа является значительный расход коагулянта (порядка 1-5 кг/т твёрдой фазы), что увеличивает текущие затраты. По нашему мнению, перспективным направлением интенсификации разделения суспензий является применение новых коагулянтов, содержащих титан, так как, по данным [47], коагулирующая способность ионов Ti^{4+} в несколько раз больше по сравнению Al^{3+} . Это дает основание предполагать возможность эффективной реализации указанных процессов при сравнительно низких значениях расхода коагулянта.

3) *Рециркуляция определённой части слива* осуществляется с целью повышения эффективности флокуляции частиц твёрдой фазы суспензии и сокращения расхода флокулянта [48]. Этот способ основан на том, что с увеличением концентрации твёрдой фазы скорость осаждения частиц и их агрегатов снижается из-за стесненных условий. Поэтому разбавление исходной суспензии водой приводит к увеличению скорости осаждения твёрдой фазы. Кроме того, положительное влияние на агрегирование частиц твёрдой фазы может оказать остаточный флокулянт, содержащийся в сливе. Одним из вариантов реализации этого способа является разбавление исходной суспензии осветлённой водой из верхнего слоя сгустительного чана непосредственно в загрузочном устройстве, применяемое в конструкции радиальных сгустителей "Supaflo", выпускаемых фирмой "Metso Outotec Group" (Финляндия) [49].

Данные предварительных расчётов, выполненных авторами настоящей работы в соответствии с методикой, изложенной в [50], показали, что при содержании твёрдой фазы в суспензии

порядка 50 кг/м^3 и более становится заметным снижение скорости осаждения флоккул с характерным диаметром 50-150 мкм за счёт стеснённых условий по сравнению со скоростью свободного осаждения (рис. 3). Поэтому разбавление может быть целесообразным для относительно концентрированных суспензий. Следует также принимать во внимание, что подача добавочной воды повышает нагрузку на сгуститель. Следовательно, количество воды для разбавления целесообразно определять таким образом, чтобы не превысить максимально допустимую удельную нагрузку на сгуститель.

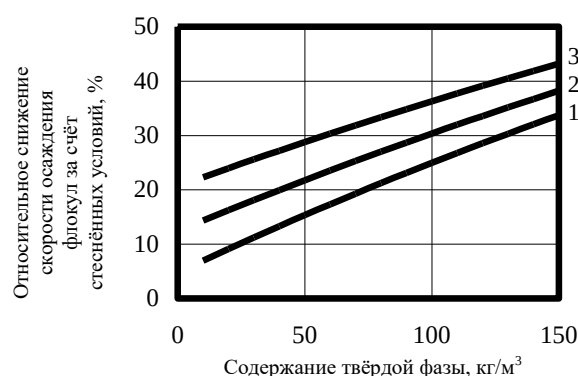


Рис. 3. Зависимость относительного снижения скорости осаждения флоккул различного диаметра от содержания твёрдой фазы в суспензии за счёт стеснённых условий: 1, 2, 3 – диаметр флоккул соответственно 50, 100 и 150 мкм

Fig. 3. Dependence between a relative decrease in the settling rate of flocs of various diameters and content of a solid phase in suspension due to limited space: 1, 2, 3 are floc diameters of 50, 100 and 150 μm , respectively

4) *Применение ультразвука* было исследовано в лабораторных условиях для интенсификации сгущения отходов флотации медных руд [51]. Было установлено, что под действием ультразвука происходит уплотнение сгущённой суспензии, в результате чего содержание в ней твёрдой фазы возрастает ориентировочно на величину до 3 мас.% при частоте ультразвука 22 кГц. Этот способ пока не нашел применения в промышленности по причине высоких энергозатрат.

5) *Обезвоживание на вакуум-фильтрах с применением вспомогательного фильтрующего вещества, в частности намывного слоя* [52, с. 114-118]. Суть способа: на фильтрующую поверхность предварительно наносят слой осадка из вспомогательного порошкообразного материала

(например, древесной муки, или перлита, или диатомита) с диаметром частиц порядка 10-50 мкм или из волокнистого материала с диаметром волокон до 30 мкм. Далее осуществляют фильтрование суспензии отходов флотации с образованием слоя осадка на поверхности намывного слоя. Благодаря этому даже при сравнительно небольшой толщине образующегося осадка отходов флотации (порядка 1-3 мм) создаются вполне благоприятные условия для его съёма. Это достигается путём регулирования угла наклона ножа для съёма осадка таким образом, чтобы обеспечить удаление осадка отходов флотации, причём удаление слоя вспомогательного вещества было бы минимальным. Также создается возможность получения сравнительно чистого фильтрата. Применение возможно на БВФ, а также на ДВФ с ножевым съёмом осадка. Практическая реализация описанного метода ограничена относительно невысокой его производительностью, а также тем, что возрастают текущие затраты в связи с применением вспомогательного материала.

Выводы

1. Необходимость повышения эффективности разделения суспензий отходов флотации углей на твёрдую и жидкую фазы обусловлена требованиями по рациональному использованию водных ресурсов и охране окружающей среды. Этому в наибольшей мере отвечают замкнутые водно-шламовые схемы углеобогащительных фабрик, предусматривающие эффективное сгущение и обезвоживание суспензий отходов флотации с получением чистой воды для повторного использования в системе оборотного водоснабжения внутри фабрики и обезвоженного осадка, пригодного для транспортирования и складирования в сухом виде.

2. Процесс сгущения суспензий отходов флотации с применением флокулянтов целесообразно осуществлять в сгустителях со взвешенным слоем и осадкоуплотнителем, это позволяет получать слив с возможно более низким содержанием твёрдой фазы и концентрированную сгущённую суспензию.

3. Применение пастового сгущения целесообразно для регионов с дефицитом водных ресурсов в тех случаях, когда расстояние от сгустителя до места складирования отходов сравнительно небольшое.

4. Применение ленточных фильтр-прессов эффективно для обезвоживания сгущённых суспензий отходов флотации, различных по составу

и свойствам, при соблюдении режима подачи флокулянтов, обеспечивающего достижение минимального возможного значения удельного объёмного сопротивления осадка.

5. Обезвоживание с применением камерных фильтр-прессов целесообразно для труднофильтруемых суспензий отходов флотации в тех случаях, когда требуется получение осадка с минимальной возможной влажностью и чистого фильтрата.

6. Наиболее перспективные методы повышения эффективности сгущения и обезвоживания отходов флотации, обеспечивающие снижение отрицательного воздействия угольных обогащительных фабрик на окружающую среду:

- последовательное применение коагулянта, анионоактивного и катионоактивного флокулянтов;
- совершенствование процесса перемешивания суспензии отходов флотации с флокулянтами, включая применение вращающихся мешалок, встраиваемых в трубопровод, и дробную подачу флокулянтов;
- эффективность процесса сгущения может быть повышена путём рециркуляции части слива, при этом не должна быть превышена максимальная допустимая удельная нагрузка на сгуститель.

Список источников

1. Хамзина Т.А. Состояние флотации угольных шламов // Глобус. 2022. №4(73). С. 158-159.
2. Андреева Т.А. Отходы производства в угольной промышленности // X Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Россия молодая», Кемерово, 24-27 апреля 2018 г. Кемерово: КузГТУ им. Т.Ф. Горбачёва, 2018. С. 53301.1-53301.4.
3. Техника и технология обогащения углей. Справочное пособие / под ред. В.А. Чантурия, А.Р. Моляко. 3-е изд. М.: Наука, 1995. 622 с.
4. Антипенко Л.А. Технологические регламенты обогащительных фабрик Кузнецкого бассейна. Прокопьевск: Прокопьевское полиграфическое производственное объединение, 2007. 463 с.
5. Rankine R., Pacheco M., Sivakugan N. Underground Mining with Backfills // Soils and Rocks. 2007, vol. 30, no. 2, pp. 93-101.
6. Coal mine wastes recycling for coal recovery and eco-friendly bricks production / Taha Y., Benzaazoua M., Hakkou R., Mansori M. // Minerals Engineering. 2017, vol. 107, pp. 123-138.
7. Использование отходов флотации битуминозных углей в производстве керамического кирпича / Лавриненко А.А., Свечникова Н.Ю., Коновницына Н.С., Игуменшева Е.А., Куклина О.В., Хасанзянова А.И. // Химия твердого топлива. 2018. №6. С. 64-68.
8. Шпирт М.Я., Артемьев В.Б., Силютин С.А. Использование твердых отходов добычи и перера-

- ботки углей. М.: Горное дело ООО «Киммерийский центр», 2013. 431 с.
9. Use of coal beneficiation tailings as solid sorbents in the treatment of nitrate-contaminated real wastewater / Nunes K.G.P., Illi J.C., Dávila I.V.J., Feris L.A. // Applied Water Science. 2020, vol. 10, no. 4, p. 14.
10. Oruç F., Sabah E. Effect of mixing conditions on flocculation performance of fine coal tailings // Proceeding of the XXIII International Mineral Processing Congress, 3-8 September 2006, Istanbul-Turkey. Istanbul: IMPC, 2006, pp. 1192-1197.
11. Innovation in dewatering process of flotation tailings by study of particle interaction in colloidal environment / Malíková P., Thomas J., Chromíková J., Vidlár J., Kupka J. // Perspectives in Science. 2016, vol. 7, pp. 171-177.
12. Coal Flotation // Сайт 911metallurgist.com. URL: <https://www.911metallurgist.com/blog/coal-flotation>. (дата обращения: 20.04.2023).
13. Effects of Energy Input on the Laboratory Column Flotation of Fine Coal / Yaowen Xing, Xiahui Gui, Jiongtian Liu, Yijun Cao & Yu Lu // Separation Science and Technology. 2015, vol. 50, pp. 2559-2567.
14. Гольберг Г.Ю., Вигдергауз В.Е. Кинетические закономерности флокуляции тонкодисперсных продуктов обогащения: два механизма для частиц микронной и субмикронной крупности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. №3. С. 90-96.
15. Chorom M., Rengasamy P. Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type // European Journal of Soil Science. 1995, vol. 46, pp. 657-665.
16. Kumar S., Bhattacharya S., Mandre N.R. Characterization and flocculation studies of fine coal tailings // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014, vol. 114, no. 11, pp. 945-949.
17. Моделирование процесса флокуляции тонкодисперсных отходов флотации углей в замкнутом водооборотном цикле / Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., Палкин А.Б., Раджабов М.М. // Вода: химия и экология. 2016. №12. С. 22-28.
18. De Kretser R., Scales P.J., Boger D.V. Improving clay-based tailings disposal: Case study on coal tailings // American Institute of Chemical Engineering Journal. 1996, vol. 43, no. 7, pp. 1894-1903.
19. Sharma A., Goel P. Rheological Properties of Tailings Materials // International Journal of Engineering Research & Technology. 2022, vol. 11, no. 7, pp. 80-85.
20. Fellows C.M., Doherty W.O.S. Insights into Bridging Flocculation // Macromol. Symp. 2006, vol. 231, pp. 1-10.
21. Review of equipment for mine waste: from the conventional thickener to the deep cone for paste product / Grima-Olmedo C., Butragueño-Muñoz J.A., Ramírez-Gómez A., Gómez-Limón Galindo D. // DYNA Ingeniería e Industria. 2015, vol. 90, pp. 359-365.
22. Schoenbrunn F.R. A Short History of Deep Cone Thickener Development // Paste 2007. Proceedings of the Tenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2007, pp. 51-55.
23. Schoenbrunn F., Bach M., Miller M. The development of Paste Thickening and its Application to the minerals Industry; An Industry Review // BHM berg- und Hüttenmännische Monatshefte. Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metallurgie, Werkstoffe, Maschinen- und Anlagentechnik. 2015, vol. 160, no. 6, pp. 257-263.
24. Woodruff D., MacNamara L. Treatment of coal tailings. In: The coal handbook. Towards cleaner production. V. 1: Coal production. Ed. By D. Osborne. Woodhead Publishing Limited, 2013, 755 p.
25. Risk assessment methodology for paste and thickened tailings. / Fernandez-Iglesias A., Correa A., Morton O., Laine J., Luiña R., Martinez G. // Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015, pp. 167-180.
26. Пастовое сгущение для экологической утилизации хвостов горного производства // Сайт Внедра.Ру. URL: www.vnedra.ru/tehnologii/pastovoe-sgushhenie-dlya-ekologichnoy-ut-1542/ (дата обращения: 20.04.2023).
27. Lamella Thickeners // Сайт 911metallurgist.com. URL: <https://www.911metallurgist.com/lamella-thickeners/> (дата обращения: 20.04.2023).
28. Бауман А.В. Сгущение и водооборот. Комплексные решения и «ноу-хау» // Сайт Гормашэкспорт. URL: https://gmexp.ru/netcat_files/multifile/2382/Sguschenie_i_vodooborot.pdf (дата обращения: 20.04.2023).
29. High Capacity Clarifier/Thickeners // Сайт Enviro-Clear Company, Inc. URL: <http://enviro-clear.com/clarifier-thickener/high-capacity/> (дата обращения: 20.04.2023).
30. Сингх Б., Эрдман В. Обезвоживание флотохвостов на прессе с ситовой лентой // Глюкауф. 1978. Т. 114. №7. С. 25-30.
31. Турченко В.К., Байдал В.А. Технология и оборудование для обогащения углей. М.: Недра, 1995. 359 с.
32. Godwin P., Jenson C., Park T. Dewatering Fine Coal Tailings with Recessed Chamber or Membrane Plate Filter Press // 16th Australian Coal Preparation Conference, 2017. 15 p.
33. Установка камерных фильтр-прессов на обогатительных фабриках это следование высочайшим экологическим стандартам // Сайт Холдинга «ТопПром». URL: https://top-prom.ru/press-center/news/ustanovka_kamernyh_filtrpressov_na_obogatitelnyh_fabrikah_eto sledovanie_vysochajshim_ekologicheskimi_standartami/ (дата обращения: 20.04.2023).

34. Отделить воду от кека: в России растёт спрос на фильтр-прессы // Сайт dprom.online. URL: <https://dprom.online/mtindustry/v-rossii-rastet-spros-na-filtr-pressy/> (дата обращения: 20.04.2023).
35. Meiring S. Cake formation: three tailings filtration technologies using pressure // Paste 2021. The Proceedings of the 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered, Perth, 21-23 September 2021. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2021, pp. 91-104.
36. Брук О.Л. Фильтрация угольных суспензий. М.: Недра, 1978. 271 с.
37. Hahn J., Bott R., Langeloh T. Economical dewatering of tailings for mine backfill with high performance disc filters // Mine Fill 2014. Ed. by Y. Potvin and A.G. Grice. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2014, pp. 41-48.
38. КДФ – керамический дисковый фильтр для обезвоживания концентратов с высокоэффективными фильтрующими элементами // Сайт НТЦ «Бакор». URL: http://www.ntcbakor.ru/kdf_rus.pdf (дата обращения: 20.04.2023).
39. Борц М.А., Гупало Ю.П. Обезвоживание хвостов флотации угольных шламов. М.: Недра, 1972. 143 с.
40. Meiring S. Thickeners versus centrifuges – a coal tailings technical comparison // Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015, pp. 55-65.
41. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation / Nguyen C.V., Nguyen A.V., Doi A., Dinh E., Nguyen T.V., Ejtemaei M., Osborne D. // Separation and Purification Technology. 2021, vol. 259, no. 15, pp. 118-172.
42. Линёв Б.И., Гольберг Г.Ю., Панфилов П.Ф. К вопросу об эффективности перемешивания суспензий с флокулянтами в статических перемешивающих устройствах // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2005. Деп. 15.09.2005. № 429/12-05. 14 с.
43. Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю. Гидродинамический режим течения минеральных суспензий, обеспечивающий сохранность флокуляционных структур // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. №3. С. 106-112.
44. Floccmaster-System. Operation Instructions. Inline-Mixer AT // Сайт YUMPU. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/7326243/inline-mixer-at-www.jfknauerde-status-july-2008-jf-knauer-gmbh> (дата обращения: 20.04.2023).
45. Качалова Г.С. Коагуляционно-сорбционная очистка сточных вод // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. №2(78). С. 32-39.
46. A Review on Coagulation/Flocculation in Dewatering of Coal Slurry / Khazaie A., Mazarji M., Samali B. a.o. // Water. 2022, vol. 14, no. 918, 20 p.
47. Азопков С.В. Комплексные титаносодержащие коагулянты: синтез и применение: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2023. 18 с.
48. Banisi S., Yahyaei M. Feed Dilution-Based Design of a Thickener for Refuse Slurry of a Coal Preparation Plant // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2008, vol. 28, no. 4, pp. 201-223.
49. Высокопроизводительный сгуститель – Metso Outotec // Сайт Metso Outotec Group. URL: <https://www.mogroup.com/ru/portfolio/high-rate-thickener/> (дата обращения: 20.04.2023).
50. Разделение гетерогенных систем. Осаждение, отстойники // Сайт РХТУ им. Д.И. Менделеева. URL: https://www.muctr.ru/upload/iblock/abe/Spring_14th_lecture.pdf (дата обращения: 20.04.2023).
51. Effect of Ultrasonic Frequency on Thickener Performance / Gongcheng Li, Shulong Liu, Zengsheng Wen, Guolei Liu, Yu Cui, Yajian Shao // Advances in Materials Science and Engineering. 2021. Article ID 6624704. 12 p.
52. Фильтрация технологических пульп / Белоглазов И.Н., Голубев В.О., Тихонов О.Н., Куукка Ю., Яскеляйнен Эд. М.: Руда и металлы, 2003. 320 с.

References

1. Khamzina T.A. Flotation of coal sludge. *Globus [Globe]*. 2022;(4(73)):158-159. (In Russ.)
2. Andreeva T.A. Production waste in the coal industry. X *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsia molodykh uchenykh "Rossiya molodaya"* [The 10th All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists *Young Russia*]. Kemerovo: Gorbachev Kuzbass State Technical University, 2018, pp. 53301.1-53301.4. (In Russ.)
3. Chanturiya V.A., Molyavko A.R. *Tekhnika i tekhnologiya obogashcheniya ugley. Spravochnoe posobie* [Coal beneficiation process and equipment]. Moscow: Nauka, 1995, 622 p. (In Russ.)
4. Antipenko L.A. *Tekhnologicheskie reglamenty obogatitelnykh fabrik Kuznetskogo basseina* [Technological regulations for beneficiation plants of the Kuznetsk Basin]. Prokopenvsk: Prokopenvsk Polygraphic Production Association, 2007, 463 p. (In Russ.)
5. Rankine R., Pacheco M., Sivakugan N. Underground mining with backfills. *Soils and Rocks*. 2007;30(2): 93-101.
6. Taha Y., Benzaazoua M., Hakkou R., Mansori M. Coal mine wastes recycling for coal recovery and eco-friendly bricks production. *Minerals Engineering*. 2017;107:123-138.
7. Lavrinenko A.A., Svechnikova N.Yu., Konovnitsyna N.S., Igumensheva E.A., Kuklina O.V., Khasanzyanova A.I. Utilization of bituminous coal flotation wastes in manufacturing of ceramic bricks. *Khimiya tverdogo top-liva* [Solid Fuel Chemistry]. 2018;(6):64-68. (In Russ.)
8. Shpirt M.Ya., Artemiev V.B., Silyutin S.A. *Ispolzovanie tverdykh otkhodov dobychi i pererabotki ugley* [Utilisation of solid wastes of coal mining and processing]. Moscow: Gornoe Delo, 2013, 431 p. (In Russ.)
9. Nunes K.G.P., Illi J.C., Dávila I.V.J., Feris L.A. Use of coal beneficiation tailings as solid sorbents in the

- treatment of nitrate-contaminated real wastewater. *Applied Water Science*. 2020;10(4):14.
10. Oruç F., Sabah E. Effect of mixing conditions on flocculation performance of fine coal tailings. Proceedings of the 23rd International Mineral Processing Congress, 3-8 September 2006, Istanbul-Turkey. Istanbul: IMPC, 2006, pp. 1192-1197.
11. Malíková P., Thomas J., Chromíková J., Vidlář J., Kupka J. Innovation in dewatering process of flotation tailings by study of particle interaction in colloidal environment. *Perspectives in Science*. 2016;7:171-177.
12. Coal flotation. Available at: <https://www.911metallurgist.com/blog/coal-flotation>. (Accessed on April 20, 2023).
13. Yaowen Xing, Xiahui Gui, Jiongtian Liu, Yijun Cao, Yu Lu. Effects of energy input on the laboratory column flotation of fine coal. *Separation Science and Technology*. 2015;50:2559-2567.
14. Golberg G.Yu., Vigdergauz V.E. Kinetic regulations in flocculation of fine-dispersed washed products: two mechanisms for micron and submicron particles. *Journal of Mining Science*. 2011;47(3):376-381.
15. Chorom M., Rengasamy P. Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type. *European Journal of Soil Science*. 1995;46:657-665.
16. Kumar S., Bhattacharya S., Mandre N.R. Characterization and flocculation studies of fine coal tailings. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014;114(11):945-949.
17. Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu., Palkin A.B., Radzhabov M.M. Modeling of a flocculation process of fine coal flotation tailings in a closed water circulation cycle. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: Chemistry and Ecology]. 2016;(12):22-28. (In Russ.)
18. De Kretser R., Scales P.J., Boger D.V. Improving clay-based tailings disposal: Case study on coal tailings. *American Institute of Chemical Engineering Journal*. 1996;43(7):1894-1903.
19. Sharma A., Goel P. Rheological properties of tailings materials. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2022;11(7):80-85.
20. Fellows C.M., Doherty W.O.S. Insights into bridging flocculation. *Macromol. Symp*. 2006;231:1-10.
21. Grima-Olmedo C., Butragueño-Muñoz J.A., Ramírez-Gómez A., Gómez-Limón Galindo D. Review of equipment for mine waste: from the conventional thickener to the deep cone for paste product. *DYNA Ingeniería e Industria*. 2015;90:359-365.
22. Schoenbrunn F.R. A short history of deep cone thickener development. *Paste 2007*. Proceedings of the Tenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2007, pp. 51-55.
23. Schoenbrunn F., Bach M., Miller M. The development of paste thickening and its application to the minerals industry; An industry review. *BHM Bergbau und Hüttenmännische Monatshefte. Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metallurgie, Werkstoffe, Maschinen-und Anlagentechnik*. 2015;160(6):257-263.
24. Woodruff D., MacNamara L. Treatment of coal tailings. *The coal handbook. Towards cleaner production*. V. 1: Coal production. Ed. by D. Osborne. Woodhead Publishing Limited, 2013, 755 p.
25. Fernandez-Iglesias A., Correa A., Morton O., Laine J., Luiña R., Martinez G. Risk assessment methodology for paste and thickened tailings. *Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015, pp. 167-180.
26. Paste thickening used for environmental recovery of mining tailings. Available at: www.vnedra.ru/tehnologii/pastovoe-sgushhenie-dlya-ekologichnoj-ut-1542/ (Accessed on April 20, 2023).
27. Lamella thickeners. Available at: <https://www.911metallurgist.com/lamella-thickeners/> (Accessed on April 20, 2023).
28. Bauman A.V. Thickening and water circulation. Integrated solutions and know how. Available at: https://gmexp.ru/netcat_files/multifile/2382/Sguschenie_i_vodooborot.pdf (Accessed on April 20, 2023).
29. High capacity clarifier/thickeners. Available at: <http://enviro-clear.com/clarifier-thickener/high-capacity/> (Accessed on April 20, 2023).
30. Singh B.K., Erdmann W. Das Entwässerung von Flotationsbergen mit einer Siebbandpresse. *Glückauf*. 1978;114(7):25-30.
31. Turchenko V.K., Baidal V.A. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya obogashcheniya ugley* [Coal beneficiation technology and equipment]. Moscow: Nedra, 1995, 359 p. (In Russ.)
32. Godwin P., Jenson C., Park T. Dewatering fine coal tailings with recessed chamber or membrane plate filter presses. *The 16th Australian Coal Preparation Conference*, 2017, 15 p.
33. Installing chamber filter presses at beneficiation plants means compliance with the highest environmental standards. Available at: https://topprom.ru/press-center/news/ustanovka_kamernyh_filtrpressov_na_obogatitelnyh_fabrikah_eto sledovanie_vysochajshim_ekologicheskim_standartam_holding_topprom/ (Accessed on April 20, 2023).
34. Separating water from filter cakes: Russia witnesses a growing demand for filter presses. Available at: <https://dprom.online/mtindustry/v-rossii-rastet-sprosn-na-filtr-pressy/> (Accessed on April 20, 2023).
35. Meiring S. Cake formation: three tailings filtration technologies using pressure. *Paste 2021*. The Proceedings of the 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2021, pp. 91-104.
36. Bruk O.L. *Filtrovaniye ugolnykh suspenzii* [Filtration of coal suspensions]. Moscow: Nedra, 1978, 271 p. (In Russ.)
37. Hahn J., Bott R., Langeloh T. Economical dewatering of tailings for mine backfill with high performance

- disc filters. Mine Fill 2014. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2014, pp. 41-48.
38. CDF – a ceramic disk filter for dewatering concentrates with highly efficient filtering elements. Available at: http://www.ntcbakor.ru/kdf_rus.pdf (Accessed on April 20, 2023).
 39. Borts M.A., Gupalo Yu.P. *Obezvozhivanie khvostov flotatsii ugolnykh shlamov* [Dewatering of coal sludge flotation tailings]. Moscow: Nedra, 1972, 143 p. (In Russ.)
 40. Meiring S. Thickeners versus centrifuges – a coal tailings technical comparison. Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015, pp. 55-65.
 41. Nguyen C.V., Nguyen A.V., Doi A., Dinh E., Nguyen T.V., Ejtemaei M., Osborne D. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation. Separation and Purification Technology. 2021;259(15): 118-172.
 42. Linev B.I., Golberg G.Yu., Panfilov P.F. Efficiency of mixing suspensions with flocculants in static mixers. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. Moscow: Moscow State Mining University, 2005, 429/12-05, 14 p. (In Russ.)
 43. Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu. Flow regime of mineral suspensions with preserved structure of flocs. Journal of Mining Science. 2019;(3):437-443.
 44. Floccmaster-System. Operation Instructions. Inline-Mixer AT. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/7326243/inline-mixer-at-wwwjfknauerde-status-july-2008-jf-knauer-gmbh> (Accessed on April 20, 2023).
 45. Kachalova G.S. Coagulation and sorption treatment of wastewater. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and Ecology: Problems and Solutions]. 2019;(2(78)):32-39. (In Russ.)
 46. Khazaie A., Mazarji M., Samali B. et al. A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry. Water. 2022;14(918):20.
 47. Azopkov S.V. *Kompleksnye titanoderzhashchie koagulyanty: sintez i primeneniye: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Integrated titanium-containing coagulants: synthesis and application. Extended abstract of the Ph.D. dissertation]. Moscow, 2023, 18 p.
 48. Banisi S., Yahyaei M. Feed dilution-based design of a thickener for refuse slurry of a coal preparation plant. International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2008;28(4):201-223.
 49. High-rate thickener Metso Outotec. Available at: <https://www.mogroup.com/ru/portfolio/high-rate-thickener/> (Accessed on April 20, 2023).
 50. Separation of heterogeneous systems. Settling, settlers. Available at: https://www.muctr.ru/upload/iblock/abe/Spring_14th_lecture.pdf (Accessed on April 20, 2023).
 51. Gongcheng Li, Shulong Liu, Zengsheng Wen, Guolei Liu, Yu Cui, Yajian Shao. Effect of ultrasonic frequency on thickener performance. Advances in Materials Science and Engineering. 2021; Article ID 6624704, 12 p.
 52. Beloglazov I.N., Golubev V.O., Tikhonov O.N., Kuukka Iu., Iaskeliainen E. *Filtrovaniye tekhnologicheskikh pulp* [Filtration of process sludge]. Moscow: Ore and Metals, 2003, 320 p. (In Russ.)

Поступила 03.05.2023; принята к публикации 06.05.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 03/05/2023; revised 06/05/2023; published 25/09/2023

Лавриненко Анатолий Афанасьевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия. Email: lavrin_a@mail.ru.

Гольберг Григорий Юрьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия. Email: gr_yu_g@mail.ru.

Anatoly A. Lavrinenko – DrSc (Eng.), Chief Researcher, Head of the Laboratory, Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Email: lavrin_a@mail.ru.

Grigory Yu. Golberg – DrSc (Eng.), Lead Researcher, Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Email: gr_yu_g@mail.ru.

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

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

УДК 549:54.055

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-42-50



ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ БОРСОДЕРЖАЩИХ ШЛАКОВ ИЗ КЛЮЧЕВСКОГО ЗАВОДА ФЕРРОСПЛАВОВ

Пономарев В.С., Ерохин Ю.В., Фаррахова Н.Н.

Институт геологии и геохимии имени академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Урал уже несколько веков является металлургическим центром России и здесь накопились большие объемы шлаков. Изучение вещественного состава шлаков является актуальной задачей, так как прежде чем их утилизировать, надо оценить их минеральный состав. Многие шлаки представляют собой потенциальную руду, которую можно дополнительно переработать. **Цель работы.** Изучение вещественного (минерального) состава борсодержащих шлаков Ключевского завода ферросплавов, полученных при производстве ферробора. **Используемые методы.** Химический состав породообразующих и рудных минералов шлака установлен на электронно-зондовом микроанализаторе CAMECA SX 100 с пятью волновыми спектрометрами (ИГТ УрО РАН, г. Екатеринбург). Для анализа использовались полированные петрографические шлифы, вырезанные из кусочков шлака. **Новизна.** Изучение вещественного состава шлаков проводилось с точки зрения классической минералогии и с использованием современной обязательной номенклатуры Международной минералогической ассоциации. **Результат.** Впервые изучена минералогия борсодержащих шлаков Ключевского завода ферросплавов. Установлено, что они сложены хибонит-Са-Al-оксидоборатым агрегатом со значительным содержанием шпинели, корунда и присутствием различных боридов, а также хромферита и хлоралюминатов кальция и калия. Данные шлаки являются отходами ферроборного производства, а температура их образования оценивается в узких пределах – 1350-1460°C. **Практическая значимость.** Изученные нами шлаки можно пускать в дополнительную переработку, так как породообразующие шпинель и хибонит, а также акцессорный гексаборид кальция являются хорошим абразивным материалом, а попутно выделяемые бориды марганца и железа (они легко выделяются магнитной сепарацией) можно далее использовать в металлургическом переделе.

Ключевые слова: хибонит, шпинель, Са-Al-оксидоборат, бориды, минералогия, шлаки, Ключевской завод ферросплавов

Авторы благодарят руководство ПАО «Ключевской завод ферросплавов» и Ключевской обогатительной фабрики за возможность посетить предприятие и отобрать пробы на шлакоотвале.

© Пономарев В.С., Ерохин Ю.В., Фаррахова Н.Н., 2023

Для цитирования

Пономарев В.С., Ерохин Ю.В., Фаррахова Н.Н. Вещественный состав борсодержащих шлаков из Ключевского завода ферросплавов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 42-50. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-42-50>



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

MATERIAL COMPOSITION OF BORON-CONTAINING SLAGS FROM THE KLYUCHEVSKY FERROALLOY PLANT

Ponomarev V.S., Erokhin Yu.V., Farrakhova N.N.

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The Urals has been a metallurgical center of Russia for several centuries, resulting in large volumes of accumulated slag. The study on the material composition of slags is a relevant task, because before they are disposed of, it is necessary to evaluate their mineral composition. Many slags are potential ore that can be further processed. **Objectives.** The research is aimed at studying the material (mineral) composition of boron-containing slags from the Klyuchevsky Ferroalloy Plant obtained during the production of ferroboron. **Methods Applied.** The chemical composition of rock-forming and ore minerals of the slag was determined on a CAMECA SX 100 electron probe microanalyzer with five wave spectrometers (the Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg). To carry out the analysis, we used polished petrographic thin sections cut from pieces of slag. **Originality.** The study on the material composition of the slags was carried out from the point of view of classical mineralogy, using the modern mandatory nomenclature of the International Mineralogical Association. **Findings.** The mineralogy of boron-containing slags from the Klyuchevsky Ferroalloy Plant was studied for the first time. It has been established that they are composed of a hibonite-Ca-Al-oxyborate aggregate with a significant content of spinel, corundum and various borides, as well as chromferide and calcium and potassium chloraluminates. These slags are wastes of ferroboron production, and the temperature of their formation is estimated within narrow limits, namely 1350-1460°C. **Practical Relevance.** The slags studied by us can be used for additional processing, because rock-forming spinel and hibonite, as well as accessory calcium hexaboride, are a good abrasive material, while manganese and iron borides formed as by-products (they are easily separated by magnetic separation) can be further used at a metallurgical processing stage.

Keywords: hibonite, spinel, Ca-Al-oxyborate, borides, mineralogy, slags, Klyuchevsky Ferroalloy Plant

The authors express their gratitude to the management of PJSC Klyuchevsky Ferroalloy Plant and Klyuchevskaya Beneficiation Plant for an opportunity to visit the plants and take samples in a slag disposal area.

For citation

Ponomarev V.S., Erokhin Yu.V., Farrakhova N.N. Material Composition of Boron-Containing Slags from the Klyuchevsky Ferroalloy Plant. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 42-50. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-42-50>

Введение

Ключевской завод ферросплавов расположен в 20-22 км к юго-востоку от города Екатеринбурга, если считать от аэропорта и микрорайона Кольцово, на восточной окраине поселка Двуреченск (Сысертский район, Свердловская область). Завод был создан в 1941 г. на базе существовавшей тогда хромо-обогащительной фабрики, хромиты для которой добывались здесь же в окрестностях поселка. Ключевской завод представляет собой современное предприятие по производству ферросплавов и лигатур с добавлением различных металлов, а также бора. На данный момент это одно из ведущих предприятий страны в выплавке ферросплавов [1].

К сожалению, за столь продолжительную историю завода детального изучения вещественного состава борсодержащих шлаков здесь не прово-

дилось, хотя незначительные сведения по их минеральному и химическому составу в литературе приводились [2].

Отбор образцов шлака и методы исследования

Борсодержащие шлаки, как редкие и малотоннажные и, соответственно, наиболее ценные, находятся в пределах заводского шлакоотвала (привязка с GPS-навигатора – N 56°60'19.6'', E 61°11'71.4''), огороженного от внешнего мира. В отвале преобладают вполне обычные для данного завода шлаки шпинелевого, корунд-дьююидоитового и корунд-хибонитового состава [2-8]. С северной стороны данного отвала были установлены крупные таблитчатые блоки шлака белого цвета размером до 2-3 м. Внешний вид породы представлен скелетным агрегатом крупных пла-

стинчатых кристаллов белого цвета, которые сидят в сплошной массе светло-серой окраски. С поверхности шлака данные пластины выдаются над общей массой и между ними наблюдаются пустоты размером до 3 см (рис. 1). Сплошная масса визуально выглядит однородной, но под микроскопом содержит многочисленные включения октаэдров шпинели и мелких пластин. В полостях отмечаются единичные октаэдры белой шпинели и белые налеты, которые имеют игольчатое и войлокоподобное строение.

Химический состав минералов из борсодержащего шлака определен на электронно-зондовом микроанализаторе CAMECA SX 100 с пятью волновыми спектрометрами (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург, аналитики Н.Н. Фаррахова, И.А. Готтман, В.А. Булатов). Для изучения использовались полированные микрозондовые шашки и петрографические шлифы, вырезанные из кусочков шлака.

Полученные результаты и их обсуждение

В результате исследований оказалось, что отобранные нами шлаки сложены хибонит-Са-Al-оксидоборатовым агрегатом со значительным содержанием шпинели, корунда и присутствием различных боридов кальция, марганца и железа, а также хромфериды и хлоралюминатов кальция и калия.

Хибонит (CaAl_2O_9) является одним из главных породообразующих минералов шлака, он образует вытянутые пластинчатые белые кристаллы размером до 10-15 см в длину. Его содержание достигает 40 об.% породы (рис. 1-4). По данным микрозондового анализа (табл. 1, анализы 1-4) пластинчатые кристаллы вполне уверенно определяются как хибонит. Из значимых примесей в минерале определяется только магний (MgO до 0,7 мас.%). Интересно, что хибонит из шлаков производства ферротитана с этого же Ключевского завода характеризуется значительными примесями титана (TiO_2 в пределах 10-11 мас.%) и магния (MgO до 1,8 мас.%) [7]. В природных условиях встречается как акцессорный минерал в высокоградиентных метаморфических породах [9] и скарнах [10], а также часто отмечается в углистых хондритах [11]. В крупных выделениях хибонит является драгоценным камнем в силу своей редкости, а также высокой твердости и дисперсии [12].

Са-Al-оксидоборат ($\text{CaAl}[\text{BO}_3]\text{O}$) является главным породообразующим минералом шлака,

он в виде сплошной светло-серой массы выполняет интерстиции между крупными пластинчатыми кристаллами хибонита (см. рис. 2-4). Его количество достигает 40 об.% породы, сам он постоянно содержит включения хибонита, шпинели, корунда и рудных минералов. В лучах ультрафиолетовой лампы эта масса приобретает светло-желтую окраску. При большом увеличении полированная поверхность данного вещества выглядит неровной, кавернозной, то есть её твердость явно ниже окружающего хибонита. Химический состав светло-серой массы (см. табл. 1, анализы 5-7) немного варьирует, но при этом вполне неплохо пересчитывается на теоретическую формулу. В качестве примесей в минерале отмечаются магний (MgO до 1,2 мас.%), натрий (Na_2O до 1,1 мас.%), кремнезем (SiO_2 до 0,6 мас.%), а также фтор (F до 2,0 мас.%) и хлор (Cl до 0,6 мас.%). В природе минерал с таким составом пока не установлен, но он был синтезирован еще в середине прошлого века [13].

Шпинель (MgAl_2O_4) является второстепенным породообразующим минералом в изученном шлаке, его содержание не превышает 10-15 об.% (см. рис. 2-3). Он обычно приурочен к индивидам хибонита, часто обрастая их. Минерал в основном бесцветный, реже имеет белую окраску. В пустотах кристаллы размером до 3 мм в диаметре, сложены хорошо образованными октаэдрами и их двойниками по {111}. По данным микрозондового анализа минерал уверенно определяется как шпинель (табл. 2, анализы 1-3). Из более-менее значимых примесей в минерале отмечается только кальций (CaO до 0,2 мас.%). Шпинель похожего состава отмечалась нами в ферровольфрамовых шлаках из этого же Ключевского завода [14]. В то же время в шлаках производства хрома шпинель отличается присутствием до 5,6 мас.% Cr_2O_3 [8]. В природных условиях данный минерал встречается достаточно часто, он характерен для магнезиальных скарнов [15] и различных метеоритов [16].

Корунд (Al_2O_3) является второстепенным породообразующим минералом шлака с содержанием не более 5 об.%. Он, как и хибонит, образует пластинчатые индивиды размером до 100-150 мкм в массе Са-Al-оксидобората (см. рис. 3). Никаких минеральных включений корунд не содержит. По химическому составу (см. табл. 2, анализы 4-6) отличается своей чистотой, то есть практически не имеет примесей. При этом красный корунд из

шлаков производства хрома из этого же Ключевского завода содержит от 1,5 до 29 мас.% Cr_2O_3 [8], а синяя разновидность из ферротитановых шлаков имеет примесь титана до 3,7 мас.% TiO_2 [7]. В целом корунд является очень распростра-

ненным минералом в природе, встречаясь в широких физико-химических условиях – от магматических до гидротермальных систем. При этом в парагенезисе с хибонитом он отмечается только в метаморфических породах [17] и метеоритах [11].



Рис. 1. Внешний вид шлака Ключевского завода с пластинчатыми кристаллами хибонита.
Фото В.С. Пономарева

Fig. 1. Appearance of slag from the Klyuchevsky plant with lamellar crystals of hibonite.
Photo by V.S. Ponomarev

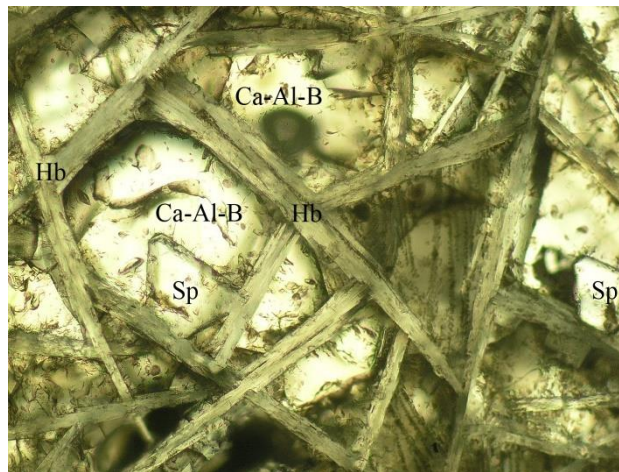


Рис. 2. Хибонит (Hb), шпинель (Sp) и Ca-Al-оксиборат (Ca-Al-B) в матрице шлака. Фото шлифа, без анализатора, размер поля 3 мм

Fig. 2. Hibonite (Hb), spinel (Sp) and Ca-Al-oxyborate (Ca-Al-B) in a slag matrix. Photo of the section, without the analyzer, the field size is 3 mm

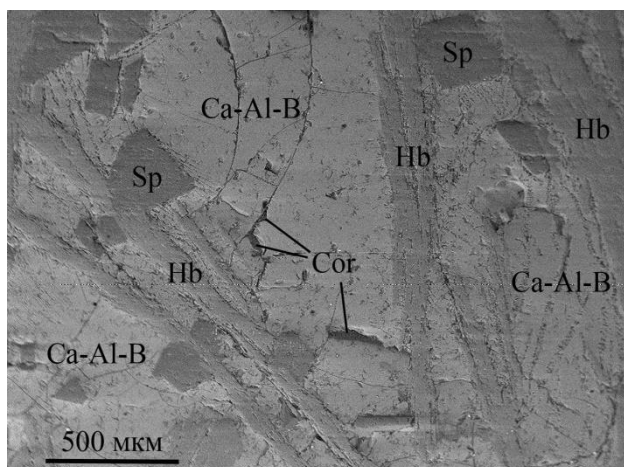


Рис. 3. Хибонит (Hb), шпинель (Sp), корунд (Cor) и Ca-Al-оксиборат (Ca-Al-B) в матрице шлака. BSE-изображение, CAMECA SX 100

Fig. 3. Hibonite (Hb), spinel (Sp), corundum (Cor) and Ca-Al-oxyborate (Ca-Al-B) in a slag matrix. BSE image, CAMECA SX 100

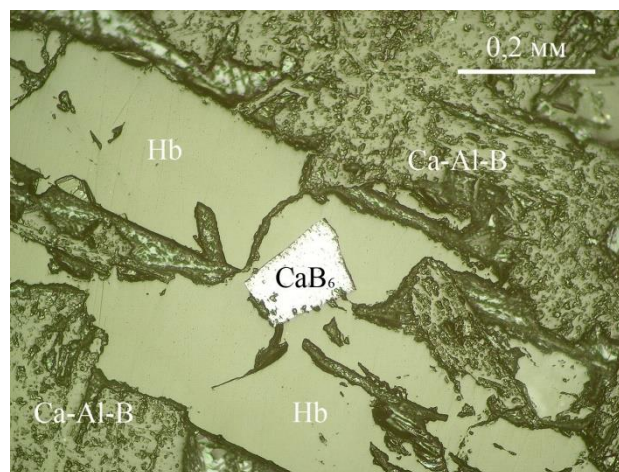


Рис. 4. Включение гексаборида кальция (CaB_6) в хибоните (Hb) среди Ca-Al-оксибората (Ca-Al-B). Фото шлифа на отражение

Fig. 4. Inclusion of calcium hexaboride (CaB_6) in hibonite (Hb) among Ca-Al-oxyborate (Ca-Al-B). Photo of the section for reflection

Таблица 1. Химический состав хибонита и Ca-Al-оксибората, мас. %

Table 1. Chemical composition of hibonite and Ca-Al-oxyborate, wt. %

Номер анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	F	Cl	Сумма
Хибонит										
1	0,03	0,01	89,54	–	0,70	9,16	0,02	–	–	99,46
2	0,03	0,03	89,32	–	0,42	9,04	0,01	–	–	98,85
3	0,04	0,01	89,60	–	0,50	9,07	–	–	–	99,22
4	0,04	0,04	90,09	–	0,48	8,96	–	–	–	99,61
Ca-Al-оксиборат										
5	0,56	0,06	27,27	24,94	1,11	41,87	1,13	1,82	0,64	99,40
6	–	0,02	28,39	25,13	1,18	42,07	1,04	1,78	0,64	100,25
7	0,56	0,07	30,03	24,64	1,05	40,85	1,14	1,99	0,60	100,93
Кристаллохимические формулы в пересчете на количество атомов кислорода										
1	$(\text{Ca}_{1,10}\text{Mg}_{0,08})_{1,18}\text{Al}_{11,85}\text{O}_{19}$									
2	$(\text{Ca}_{1,09}\text{Mg}_{0,05})_{1,14}\text{Al}_{11,88}\text{O}_{19}$									
3	$(\text{Ca}_{1,09}\text{Mg}_{0,06})_{1,15}\text{Al}_{11,88}\text{O}_{19}$									
4	$(\text{Ca}_{1,07}\text{Mg}_{0,05})_{1,12}\text{Al}_{11,89}\text{O}_{19}$									
5	$(\text{Ca}_{1,09}\text{Al}_{0,78}\text{Na}_{0,05}\text{Mg}_{0,03})_{1,95}[(\text{B}_{1,04}\text{Si}_{0,01})_{1,05}\text{O}_3](\text{O}_{0,83}\text{F}_{0,14}\text{Cl}_{0,03})_{1,00}$									
6	$(\text{Ca}_{1,08}\text{Al}_{0,80}\text{Na}_{0,05}\text{Mg}_{0,03})_{1,96}[(\text{B}_{1,04}\text{O}_3)(\text{O}_{0,83}\text{F}_{0,14}\text{Cl}_{0,03})_{1,00}]$									
7	$(\text{Ca}_{1,04}\text{Al}_{0,86}\text{Na}_{0,05}\text{Mg}_{0,02})_{1,97}[(\text{B}_{1,01}\text{Si}_{0,01})_{1,02}\text{O}_3](\text{O}_{0,83}\text{F}_{0,15}\text{Cl}_{0,02})_{1,00}$									

Таблица 2. Химический состав шпинели и корунда, мас. %

Table 2. Chemical composition of spinel and corundum, wt. %

Номер анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма
Шпинель									
1	0,06	0,01	71,90	–	0,01	0,04	28,64	0,16	100,82
2	0,04	–	71,72	0,05	0,02	0,03	28,04	0,06	99,96
3	0,05	0,02	71,94	0,05	0,01	–	28,65	0,14	100,86
Корунд									
4	0,07	–	99,62	–	–	–	0,03	0,02	99,74
5	0,01	–	99,91	0,01	–	–	0,03	0,01	99,97
6	0,03	0,02	99,96	–	0,03	–	0,01	–	100,05
Кристаллохимические формулы в пересчете на количество атомов кислорода									
1-3 _{ср.зн.}	$\text{Mg}_{1,00}\text{Al}_{2,00}\text{O}_4$								
4-6 _{ср.зн.}	$\text{Al}_{2,00}\text{O}_3$								

Гексаборид кальция (CaB₆) является главным аксессуарным минералом в изученном шлаке. Он образует отдельные и относительно крупные, размером до 200 мкм, черные кристаллы изометричного облика (см. **рис. 4**). Под пучком микронзонда сильно люминесцирует. Химический состав минерала (**табл. 3**, анализы 1-3) соответствует эталонному гексабориду кальция. Какие-либо примеси отсутствуют. В природе минерал с таким составом пока не установлен, но он был синтезирован еще в начале прошлого века [18].

Тетраборид тримарганца (Mn₃B₄) также является аксессуарным минералом в шлаке, но встречается реже, чем гексаборид кальция. Он образует удлиненные, видимо призматические индивиды и их сростки размером до 50-100 мкм. Химический состав минерала сильно варьирует от чисто марганцевого бориды (см. **табл. 3**, анализы 4-6) до марганцево-железистого (см. **табл. 3**, анализы 7-9), но при этом он хорошо рассчитывается на тетраборид тримарганца. Интересно, что в железистых разностях количество железа занимает 1/3 часть

позиции марганца и формула приобретает следующий вид – $(\text{Mn}_2\text{Fe})_3\text{B}_4$. В бориде отмечаются примеси хрома (Cr до 2,2 мас.%), меди (Cu до 0,9 мас.%), кальция (Ca до 0,7 мас.%), алюминия (Al до 0,7 мас.%) и циркония (Zr до 0,7 мас.%). В природе минерал с таким составом пока не установлен, но он был синтезирован в 1950 году [19].

Хромферид ($\text{Fe}_{15}\text{Cr}_2$) является единственным аксессуарным интерметаллидом в шлаке. Он слагает мелкие округлые зерна размером до 40-50 мкм по всей матрице породы. По данным микрозондового анализа имеет следующий химический состав (в мас.%, среднее из 3-х анализов): Cr – 11,25; Fe – 77,86; Mn – 8,86; Cu – 0,61; Ca – 0,76; сумма 99,34. Пересчет на кристаллохимическую формулу ($\text{Fe}_{13,15}\text{Mn}_{1,50}\text{Ca}_{0,20}\text{Cu}_{0,10}$) $_{14,95}\text{Cr}_{2,05}$ показывает, что этот состав полностью соответствует хромфериду. Интересным фактом является значительная примесь марганца в минерале, что позволяет предположить существование марганцевого аналога хромфериды. Пока такое соединение не описано. В природе хромферид встречается достаточно редко, установлен среди габброидов [20] и гипербазитов [21], при этом он является характерным минералом для феррохромовых шлаков [22].

Таблица 3. Химический состав боридов, мас.%
Table 3. Chemical composition of borides, wt. %

Номер анализа	Ca	Cu	B	Al	Zr	Cr	Mn	Fe	Сумма
1	38,09	–	61,72	–	–	–	–	0,02	99,83
2	37,92	0,02	61,43	–	–	0,02	–	0,02	99,41
3	38,07	–	62,01	–	–	0,01	0,01	0,02	100,12
4	0,67	0,86	20,81	0,11	0,20	0,44	76,07	0,35	99,51
5	0,73	0,15	20,59	0,11	0,65	0,26	76,12	0,28	98,89
6	0,23	0,68	20,71	0,66	0,59	0,42	76,31	0,12	99,72
7	0,03	0,25	20,39	0,12	0,13	2,15	49,18	27,02	99,27
8	0,02	0,48	20,72	0,31	0,10	1,87	48,26	28,55	100,31
9	0,02	0,36	20,64	0,27	0,07	1,75	48,21	28,19	99,51
Кристаллохимические формулы в пересчете на 7 атомов									
1-3 _{ср.зн.}	$\text{Ca}_{1,00}\text{B}_{6,00}$								
4	$(\text{Mn}_{2,89}\text{Ca}_{0,04}\text{Cu}_{0,03}\text{Cr}_{0,02}\text{Fe}_{0,01})_{2,99}\text{B}_{4,01}$								
5	$(\text{Mn}_{2,91}\text{Ca}_{0,04}\text{Zr}_{0,02}\text{Cu}_{0,01}\text{Cr}_{0,01}\text{Fe}_{0,01})_{3,00}\text{B}_{4,00}$								
6	$(\text{Mn}_{2,89}\text{Al}_{0,05}\text{Cu}_{0,02}\text{Cr}_{0,02}\text{Zr}_{0,01}\text{Ca}_{0,01}\text{Fe}_{0,01})_{3,01}\text{B}_{3,99}$								
7	$(\text{Mn}_{1,89}\text{Fe}_{1,02}\text{Cr}_{0,09}\text{Al}_{0,01}\text{Cu}_{0,01})_{3,02}\text{B}_{3,98}$								
8	$(\text{Mn}_{1,83}\text{Fe}_{1,06}\text{Cr}_{0,08}\text{Al}_{0,02}\text{Cu}_{0,02})_{3,01}\text{B}_{3,99}$								
9	$(\text{Mn}_{1,84}\text{Fe}_{1,06}\text{Cr}_{0,07}\text{Al}_{0,02}\text{Cu}_{0,01})_{3,00}\text{B}_{4,00}$								

Кроме того, ранее нами [23] в данных борных шлаках были установлены необычные хлоралюминаты кальция и калия, которые в природе пока не установлены.

Хлоралюминат калия ($\text{K}_4[\text{AlO}_2]\text{Cl}_3$) обнаружен в виде скелетных кристаллов размером до 20-25 мкм в матрице хибонита. Микрозондовые анализы минерала показали значимые количества калия, глинозема и хлора: K_2O варьирует от 48 до 51 мас.%, Al_2O_3 – в пределах 12-14 мас.% и Cl – 32-37,5 мас.%. Из примесей отмечаются кальций (CaO до 2,85 мас.%) и натрий (Na_2O до 1,58 мас.%). Пересчет на кристаллохимическую формулу следующий: $(\text{K}_{3,73}\text{Ca}_{0,17}\text{Na}_{0,08})_{3,98}[\text{Al}_{0,95}\text{O}_2]\text{Cl}_{3,07}$.

Хлоралюминат кальция ($\text{Ca}_2[\text{AlO}_3]\text{Cl}$) обнаружен в пустотах шлака в виде белых сплошных масс и агрегата длиннопризматических кристаллов размером до 40 мкм в длину. Полученные анализы показали значимые количества Ca, Al и Cl в минерале, при этом CaO варьирует от 52 до 54 мас.%, Al_2O_3 – в пределах 29-31 мас.% и Cl – 14,5-14,7 мас.%. Из примесей в минерале отмечается сера (SO_3 до 2,3 мас.%). Пересчет на кристаллохимическую формулу следующий: $\text{Ca}_{1,96}[\text{Al}_{1,15}\text{O}_3](\text{Cl}_{0,84}\text{S}_{0,05})_{0,89}$.

Описанная нами минералогия и установленные аксессуарные бориды позволяют уверенно говорить о том, что изученные шлаки являются отходами производства ферробора, который и в настоящее время выплавляется на Ключевском заводе. Химический состав шлака ферроборного производства с данного завода следующий (в вес.%): Al_2O_3 – 63-71,3; CaO – 15,6-18,7; B_2O_3 – 7-9,1; SiO_2 – 0,4; FeO – 1,1-1,6; MgO – 6-10 (дано по [2]). Минеральный состав (был установлен петрографическим и рентгенофазовым методами): кальциевый алюмоборат $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$, корунд, борсодержащая стеклофаза $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{B}_2\text{O}_3$, шпинель и FeB (дано по [2]). Как видно из полученных нами данных, минералогия борных шлаков Ключевского завода гораздо более разнообразная и совсем не такая, особенно в аксессуарной минерализации.

Интересной особенностью изученного шлака является наличие бориды марганца вместо выплавляемого продукта – бориды железа. По всей видимости, это связано с тем, что более легкоплавкий марганец в отличие от железа «ушел» в шлаковый расплав. При этом часть железа всё же попала в шлак в виде хромферита и значительной примеси в бориде марганца.

Температуру кристаллизации этих шлаков сложно оценить, так как в изученной породе нет надежных минералов-индикаторов. При этом гексаборид кальция в борокарбидной системе синтезируют в диапазоне 1400-1650°C [24]. Это хорошо соответствует сведениям самого предприятия (по [2]), по данным которого температура плавления/кристаллизации шлаков ферробора оценивается в пределах 1350-1460°C.

В целом изученный шлак можно пускать в дополнительную переработку. При использовании магнитной сепарации можно легко выделить бориды марганца и железа, которые далее пойдут в металлургический передел. Гексаборид кальция как твердый минерал является хорошим абразивным материалом, а также обладает огнеупорными, противокислотными и нейтронно-поглощающими свойствами. Хибонит и корунд, в силу высокой твердости, тоже можно использовать в качестве абразивного материала.

Заключение

Таким образом, впервые изучена минералогия борсодержащих шлаков Ключевского завода ферросплавов. Установлено, что они сложены хибонит-Са-Al-оксиборатовым агрегатом со значительным содержанием шпинели, корунда и

присутствием различных боридов, а также хромферита и хлоралюминатов кальция и калия. Данные шлаки являются отходами ферроборного производства, а температура их образования оценивается в узких пределах – 1350-1460°C.

Список источников

1. Ключевской завод ферросплавов: к 75-летию Ключевского завода ферросплавов. Энциклопедия / под ред. Н.В. Кузьмина. 2-е изд., перераб. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2016. 519 с.
2. Техногенное минеральное сырье Урала: монография / Перепелицын В.А., Рытвин В.М., Коротеев В.А., Макаров А.Б., Григорьев В.Г., Гильварг С.И., Абызов В.А., Абызов А.Н., Табулович Ф.А. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 332 с.
3. Лапин В.В., Курцева Н.Н., Острогорская О.П. О шпинели, корунде (рубине) и своеобразном «β-глиноземе» в алюминотермических шлаках // Труды ИГЕМ АН СССР. 1958. Вып. 30. С. 124-133.
4. Макаров А.Б., Талалай А.Г. Техногенно-минеральные месторождения и их экологическая роль // Литосфера. 2012. № 1. С. 172-176.
5. Перепелицын В.А., Рытвин В.М., Гильварг С.И. Малотоннажные алюминотермические шлаки ОАО «Ключевской завод ферросплавов» // Огнеупоры и техническая керамика. 2015. №4-5. С. 60-68.
6. Ерохин Ю.В. Минералогия глиноземистого шлака Ключевского завода ферросплавов // Минералогия техногенеза. 2012. №13. С. 65-75.
7. Ерохин Ю.В., Берзин С.В. Сапфир-хибонитовый шлак из Ключевского завода ферросплавов // Минералогия техногенеза. 2014. №15. С. 70-81.
8. Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Михеева А.В. Шпинелевый шлак из Ключевского завода ферросплавов // Минералогия техногенеза. 2018. №19. С. 70-80.
9. Sandiford M., Santosh M.A. granulite facies kalsilite-leucite-hibonite association from Punalur, Southern India // Mineralogy and Petrology. 1991, vol. 43, pp. 225-236.
10. Rakotondrazafy M.A.F., Moine B., Cuney M. Mode of formation of hibonite ($\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$) within the U-Th skarns from the granulites of S-E Madagascar // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1996, vol. 123, pp. 190-201.
11. Simon S.B., Davis A.M., Grossman L., McKeegan K.D. A hibonite-corundum inclusion from Murchison: a first-generation condensate from the Solar Nebula // Meteoritics and Planetary Science. 2002, vol. 37, pp. 533-548.
12. Hainschwang T., Notari F., Massi L., Armbruster T., Rondeau B., Fritsch E., Nagashima M. Hibonite: a new gem mineral // Gems and Gemology. 2010, vol. 46, no. 2, pp. 135-138.
13. Егоров-Тисменко Ю.К., Симонов М.А., Белов Н.В. О кристаллических структурах кальциоборита

- $\text{Ca}_2[\text{BO}_3\text{BO}]_2$ и синтетического бороалюмината кальция $2\text{CaAl}[\text{BO}_3]\text{O} = \text{Ca}_2[\text{AlO}_3\text{BO}]_2$ // Доклады АН СССР. 1980. Т. 251. С. 1122-1123.
- Ерохин Ю.В., Пономарев В.С. Вещественный состав шлаков ферровольфрамового производства Ключевского завода (Средний Урал) // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 44-52.
 - Лебедев А.М., Сумин Н.Г. О красной шпинели из Слюдянки // Труды Минералогического музея АН СССР. 1952. Вып. 4. С. 149-151.
 - Björnberg K., Schmitz B. Large spinel grains in a CM chondrite (Acfer 331): Implications for reconstructions of ancient meteorite fluxes // Meteoritics and Planetary Science. 2013, vol. 48, no. 2, pp. 180-194. doi:10.1111/maps.12050
 - Rajesh V.J., Arai S., Santosh M., Tamura A. LREE-rich hibonite in ultrapotassic rocks in Southern India // Lithos. 2010, vol. 115, pp. 40-50.
 - Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. М.: Атомиздат, 1975. 376 с.
 - Kiessling R. The borides of manganese // Acta Chemica Scandinavica. 1950, vol. 4, pp. 146-159.
 - Новые природные интерметаллические соединения железа и хрома – хромферид и ферхромид / Новгородова М.И., Горшков А.И., Трубкин Н.В., Цепин А.И., Дмитриева М.Т. // Записки ВМО. 1986. Ч. 115. Вып. 3. С. 355-359.
 - Мариинскит BeCr_2O_4 – новый минерал, хромовый аналог хризоберилла / Паутов Л.А., Попов М.П., Ерохин Ю.В., Хиллер В.В., Карпенко В.Ю. // Записки РМО. 2012. Ч. 141. Вып. 6. С. 43-62.
 - Panda C., Biswal S.S., Dash P., Jena T., Panda K.C., Sahu D. Study of chromium immobilization behavior in unbound and concrete bound ferrochromium slag // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2022, vol. 24, pp. 528-539. doi:10.1007/s10163-021-01337-x
 - Ерохин Ю.В., Пономарев В.С. Хлоралюминаты в шлаках производства ферробора из Ключевского завода // Минералогия техногенеза. 2020. № 21. С. 101-109.
 - Совместный синтез гетерофазных порошков в системе $\text{CaB}_6 - \text{TiB}_2$ / Несмелов Д.Д., Лысенков А.С., Данилович Д.П., Коцарь Т.В., Орданьян С.С. // Новые огнеупоры. 2018. №10. С. 31-36.
 - related mineral raw materials of the Urals: monograph]. Yekaterinburg: Editorial and Publishing Unit of the Ural Branch, Russian Academy of Sciences, 2013, 332 p. (In Russ.)
 - Lapin V.V., Kurtseva N.N., Ostrogorskaya O.P. On spinel, corundum (ruby) and a kind of “ β -alumina” in aluminothermic slags. *Trudy IGEM AN SSSR* [Proceedings of the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Academy of Sciences of the USSR]. 1958;30:124-133. (In Russ.)
 - Makarov A.B., Talalay A.G. Industry-related mineral deposits and their ecological role. *Litosfera* [Lithosphere]. 2012;(1):172-176. (In Russ.)
 - Perepelitsyn V.A., Rytvin V.M., Gilvarg S.I. Low production volume aluminothermic slags of OJSC Klyuchevsky Ferroalloy Plant. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Technical Ceramics]. 2015;(4-5):60-68. (In Russ.)
 - Erokhin Yu.V. Mineralogy of aluminous slag of the Klyuchevsky Ferroalloy Plant. *Mineralogiya tekhnogeneza* [Mineralogy of Technogenesis]. 2012;(13):65-75. (In Russ.)
 - Erokhin Yu.V., Berzin S.V. Sapphire-hibonite slag from the Klyuchevsky Ferroalloy Plant. *Mineralogiya tekhnogeneza* [Mineralogy of Technogenesis]. 2014;(15):70-81. (In Russ.)
 - Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Mikheeva A.V. Spinel slag from the Klyuchevsky Ferroalloy Plant. *Mineralogiya tekhnogeneza* [Mineralogy of Technogenesis]. 2018;(19):70-80. (In Russ.)
 - Sandiford M., Santosh M. A granulite facies kalsilite-leucite-hibonite association from Punalur, Southern India. *Mineralogy and Petrology*. 1991;43:225-236.
 - Rakotondrazafy M.A.F., Moine B., Cuney M. Mode of formation of hibonite ($\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$) within the U-Th skarns from the granulites of S-E Madagascar. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1996;123:190-201.
 - Simon S.B., Davis A.M., Grossman L., McKeegan K.D. A hibonite-corundum inclusion from Murchison: a first-generation condensate from the Solar Nebula. *Meteoritics and Planetary Science*. 2002;37:533-548.
 - Hainschwang T., Notari F., Massi L., Armbruster T., Rondeau B., Fritsch E., Nagashima M. Hibonite: a new gem mineral. *Gems and Gemology*. 2010;46(2):135-138.
 - Egorov-Tismenko Yu.K., Simonov M.A., Belov N.V. On crystal structures of calcioborite $\text{Ca}_2[\text{BO}_3\text{BO}]_2$ and synthetic calcium boroaluminate $2\text{CaAl}[\text{BO}_3]\text{O} = \text{Ca}_2[\text{AlO}_3\text{BO}]_2$. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences]. 1980;251:1122-1123. (In Russ.)
 - Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S. Material composition of slags of ferrotungsten production from the Klyuchevsky Plant (the Middle Urals). *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022;20(2):44-52. (In Russ.)

References

- Kuzmin N.V. *Klyuchevsky zavod ferrosplavov: k 75-letiyu Klyuchevskogo zavoda ferrosplavov. Entsiklopediya* [Klyuchevsky Ferroalloy Plant: to the 75th Anniversary of the Klyuchevsky Ferroalloy Plant. Encyclopedia]. Yekaterinburg: Ural Worker Publishing House, 2016, 519 p. (In Russ.)
- Perepelitsyn V.A., Rytvin V.M., Koroteev V.A., Makarov A.B., Grigoriev V.G., Gilvarg S.I., Abyzov V.A., Abyzov A.N., Tabulovich F.A. *Tekhnogennoe mineralnoe syrie Urala: monografiya* [Industry-

15. Lebedev A.M., Sumin N.G. On red spinel from Slyudyanka. *Trudy Mineralogicheskogo muzeya AN SSSR* [Proceedings of the Mineralogical Museum of the USSR Academy of Sciences]. 1952;4:149-151. (In Russ.)
16. Björnberg K., Schmitz B. Large spinel grains in a CM chondrite (Acfer 331): Implications for reconstructions of ancient meteorite fluxes. *Meteoritics and Planetary Science*. 2013;48(2):180-194. DOI:10.1111/maps.12050
17. Rajesh V.J., Arai S., Santosh M., Tamura A. LREE-rich hibonite in ultrapotassic rocks in Southern India. *Lithos*. 2010;115:40-50. DOI:10.1016/j.lithos.2009.11.004
18. Samsonov G.V., Serebryakova T.I., Neronov V.A. *Boridy* [Borides]. Moscow: Atomizdat, 1975, 376 p. (In Russ.)
19. Kiessling R. The borides of manganese. *Acta Chemica Scandinavica*. 1950;4:146-159.
20. Novgorodova M.I., Gorshkov A.I., Trubkin N.V., Tsepina A.I., Dmitrieva M.T. New natural intermetallic compounds of iron and chromium – chromferide and ferchromide. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva* [Proceedings of the All-Union Mineralogical Society]. 1986;115(3):355-359. (In Russ.)
21. Pautov L.A., Popov M.P., Erokhin Yu.V., Khiller V.V., Karpenko V.Yu. Mariinskie BeCr₂O₄ – a new mineral, a chromium analogue of chrysoberyl. *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva* [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]. 2012;141(6):43-62. (In Russ.)
22. Panda C., Biswal S.S., Dash P., Jena T., Panda K.C., Sahu D. Study of chromium immobilization behavior in unbound and concrete bound ferrochromium slag. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2022;24:528-539. DOI:10.1007/s10163-021-01337-x
23. Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S. Chloraluminates in slags produced from ferroboration from the Klyuchevsky plant. *Mineralogiya tekhnogeneza* [Mineralogy of Technogenesis]. 2020;(21):101-109. (In Russ.)
24. Nesmelov D.D., Lysenkov A.S., Danilovich D.P., Kotsar T.V., Ordanyan S.S. Joint synthesis of heterophase powders in the CaB₆ – TiB₂ system]. *Novye ognepory* [New Refractories]. 2018;(10):31-36. (In Russ.)

Поступила 16.05.2023; принята к публикации 08.06.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 16/05/2023; revised 08/06/2023; published 25/09/23

Пономарев Владимир Сергеевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия. Email: p123v@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1651-1281

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

Фаррахова Надежда Николаевна – научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия. Email: atlantida21@mail.ru. ORCID 0000-0002-3067-4044

Vladimir S. Ponomarev – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. Email: p123v@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1651-1281

Yury V. Erokhin – PhD (Geology and Mineralogy), Lead Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. Email: erokhin-yu@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0577-5898

Nadezhda N. Farrakhova – Researcher, Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia. Email: atlantida21@mail.ru. ORCID 0000-0002-3067-4044

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

METAL FORMING

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

УДК 621.787.4

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-51-61



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШУМОВ БАРКГАУЗЕНА ПРИ РЕВЕРСИВНОМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований по определению влияния основных технологических параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования (ППД) на величину сжимающих остаточных напряжений на поверхности деталей. Для реализации предлагаемого способа отделочно-упрочняющей обработки разработано устройство, обеспечивающее реверсивное круговое движение рабочего инструмента. С использованием эффекта шумов Баркгаузена определена величина сжимающих остаточных напряжений на поверхности детали. Экспериментальные исследования показали, что величина сжимающих остаточных напряжений при реверсивном ППД изменяется в пределах от 210 до 345 МПа и зависит от основных технологических параметров процесса. Среди основных технологических параметров реверсивного ППД величина радиального натяга и реверсивная частота вращения рабочего инструмента оказывают наибольшее влияние на величину сжимающих остаточных напряжений. Увеличение радиального натяга, реверсивной частоты вращения рабочего инструмента и снижение величины продольной подачи приводят к весьма существенному росту сжимающих остаточных напряжений на поверхности детали ($\sigma^{\text{ост}} \sim 342\text{--}345$ МПа). Установлено, что разница между экспериментальными и расчетными результатами не превышает 20%. По результатам экспериментальных исследований с помощью компьютерной программы Microsoft Visual Studio 2012 с языком программирования Python были определены оптимальные режимы упрочнения, обеспечивающие получение максимальных сжимающих остаточных напряжений на поверхности детали: продольная подача – 0,07–0,10 мм/об; частота вращения заготовки – 280–300 об/мин; величина радиального натяга – 0,25–0,28 мм; реверсивная частота вращения рабочего инструмента – 250–300 дв. ход/мин; начальный угол установки рабочего инструмента – 90° и величина угла реверсивного вращения рабочего инструмента $\pm 55\text{--}\pm 60^\circ$.

Ключевые слова: реверсивное поверхностное пластическое деформирование, сжимающие остаточные напряжения, двухрадиусный ролик, реверсивная частота вращения, шум Баркгаузена

© Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай, 2023

Для цитирования

Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Определение остаточных напряжений с использованием шумов Баркгаузена при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 51–61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-51-61>



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

DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES BY USING BARKHAUSEN NOISE IN THE REVERSE SURFACE PLASTIC DEFORMATION

Zaides S.A., Nguyen Huu Hai

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The paper presents the results of experimental studies conducted to determine the effect of the main technological parameters of reverse surface plastic deformation (SPD) on compressive residual stresses on the surface of parts. To implement the proposed method of finishing and hardening processing, a device has been developed providing a reverse circular movement of the working tool. Using the Barkhausen effect, we determined the value of compressive residual stresses on the surface of parts. Experimental studies have shown that the value of compressive residual stresses during reverse SPD varies from 210 to 345 MPa and depends on the main technological parameters of the process. A radial interference fit and reverse rotational velocity of the working tool have the greatest influence on compressive residual stresses among the main technological parameters of the reverse SPD. An increase in the radial interference fit, reverse rotational velocity of the working tool and a decrease in longitudinal feed leads to a very significant increase in compressive residual stresses on the surface of the part ($\sigma^{\text{res}} \sim 342\text{-}345$ MPa). It has been established that the difference between the experimental and calculated results does not exceed 20%. According to the experimental studies performed using the Microsoft Visual Studio 2012 computer program with the Python programming language, the optimal hardening modes were determined to ensure maximum compressive residual stresses on the surface of the part: longitudinal feed was 0.07-0.10 mm/rev; rotational velocity of the workpiece was 280-300 rpm; the radial interference fit was 0.25-0.28 mm; reverse rotational velocity of working tool was 250-300 double stroke/min; the initial angle of installation of the working tool was 90° and the angle of reverse rotation of the working tool was $\pm 55^\circ - \pm 60^\circ$.

Keywords: reverse surface plastic deformation, compressive residual stresses, two-radius roller, reverse rotational velocity, Barkhausen noise

For citation

Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Determination of Residual Stresses by Using Barkhausen Noise in the Reverse Surface Plastic Deformation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 51-61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-51-61>

Введение

Повышение качества и надежности технических изделий – одна из центральных задач современного машиностроения. Согласно экспертным оценкам, уменьшение расходов по эксплуатации изделий даже на 3-5% оправдывает увеличение затрат по повышению их качества на 15-20% [1, 2].

Для повышения качества поверхностного слоя деталей машин обычно используют финишные и отделочно-упрочняющие методы обработки, в том числе поверхностное пластическое деформирование (ППД) [1-3]. По результату воздействия на заготовку процессы ППД примерно равноценны и предназначены для создания благоприятного микрорельефа обработанной поверхности, уточнения размеров и формы изделий, формирования тонкого упрочнения слоя и наведения в нем сжимающих остаточных напряжений [4, 5]. При решении вопроса о качестве выпускаемой продукции немаловажное значение имеют остаточные напряжения, которые

возникают практически при всех технологических операциях и оказывают существенное влияние на работоспособность деталей машин и элементов конструкций. В работах [2, 4, 6] установлено, что при известных способах ППД в поверхностных слоях деталей машин образуются сжимающие остаточные напряжения, которые оказывают положительное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин. Сжимающие напряжения в поверхностных слоях металлоизделий могут полностью свести к нулю отрицательное действие выточек, отверстий, выступов, трещин, дефектов и других концентраторов напряжений.

При механической обработке традиционными способами ППД маложестких цилиндрических деталей типа валов и осей возникают проблемы по сохранению их формы и размеров, так как при упрочнении таких деталей поверхностным пластическим деформированием невозможно получить стабильное качество по длине обработки – это касается и твердости, и шероховатости.

сти, и остаточных напряжений. Если снизить величину радиальной нагрузки, то есть уменьшить величину радиального натяга рабочего инструмента, то не удастся обеспечить заданные показатели качества поверхностного слоя деталей машин. В этой связи возникает задача по интенсификации напряженного состояния в очаге упругопластической деформации процесса ППД без увеличения радиального натяга. Поиск способа повышения интенсивности напряжений в очаге деформации является актуальной задачей, которая позволит решить ряд проблем при упрочнении деталей малой жесткости. Один из путей повышения прочностных характеристик мало жестких цилиндрических деталей заключается в разработке упрочняющих технологий, обеспечивающих формирование такого структурного состояния материала, при котором максимально реализуются основные принципы дислокационной теории упрочнения [7, 8]. Для решения поставленной задачи в Иркутском национальном исследовательском техническом университете ведутся работы по созданию новых способов ППД [9, 10]. Одним из них является процесс, основанный на реверсивном круговом движении рабочего инструмента (РИ) [11].

Цель данной работы заключается в экспериментальном определении влияния параметров и режимов реверсивного ППД на величину сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое, что позволит оценить возможности предлагаемого способа по обеспечению качества деталей машин.

Материалы и методы исследования

Способ реверсивного поверхностного пластического деформирования. Схема реверсивного ППД цилиндрической заготовки представлена на **рис. 1**, где показана конструкция деформирующего элемента и схема упрочнения цилиндрической заготовки по предложенному способу.

Особенность данного способа заключается в том, что деформирующий элемент выполнен в виде двухрадиусного ролика, вершины которого располагаются относительно друг друга на некотором расстоянии l , при этом ось вращения деформирующего элемента расположена параллельно оси заготовки, а рабочему инструменту сообщают реверсивное вращение относительно оси, проходящей через плоскость, соединяющую два ролика деформирующего элемента и перпендикулярную оси заготовки, с круговой амплитудой угла α_p (см. **рис. 1**).

Как видно из схемы обработки (см. **рис. 1**) параметрами режима, определяющими кинематику процесса, являются: продольная подача РИ ($S_{пр}$), частота вращения заготовки (n_3), радиальный натяг (t), начальный угол установки РИ (α_n), амплитуда угла реверсивного вращения РИ (α_p) и реверсивная частота вращения РИ (n_p). Заготовку 3 закрепляют в трехкулачковом патроне 1 токарно-винторезного станка и поджимают вращающимся центром задней бабки 2. Заготовке придают вращательное движение с частотой n_3 , об/мин. Рабочему инструменту 4 одновременно сообщают продольную подачу $S_{пр}$ и реверсивное вращение n_p относительно оси r .

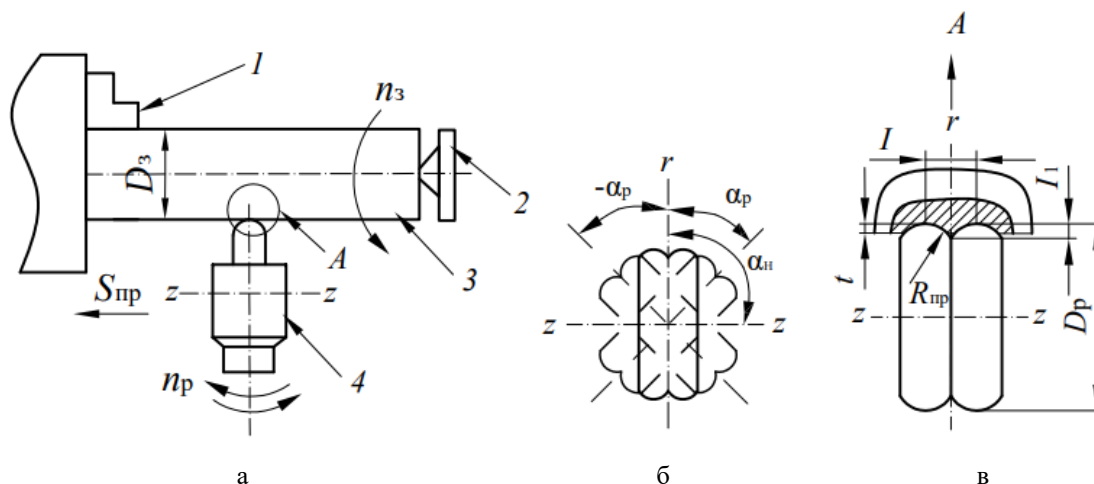


Рис. 1. Схемы реверсивного ППД двухрадиусным роликом (а), его реверсивного вращения (б) и рабочей зоны (в) [12]: 1 – трехкулачковый патрон; 2 – задняя бабка; 3 – заготовка; 4 – рабочий инструмент

Fig. 1. Diagrams of reverse SPD with a two-radius roller (a), its reverse rotation (б) and working zone (в) [12]: 1 is a three-jaw chuck; 2 is a tailstock; 3 is a workpiece; 4 is a working tool

Методика и техника выполнения эксперимента. Для определения остаточных напряжений на поверхности цилиндрических деталей при реверсивном ППД использовали цилиндрические образцы диаметром 30 мм из среднеуглеродистой стали 45. Опытные образцы разделены поперечными канавками на 6 одинаковых участков по длине и диаметру, которые упрочняли с использованием разных технологических параметров и режимов обработки. На каждом образце испытывался один параметр ППД с пятью разными режимами упрочнения, что позволяло построить соответствующие графики.

Для исключения биения обрабатываемой поверхности образец закрепляли в трехкулачковом патроне токарного станка и поджимали задним центром. После этого цилиндрическую поверхность образца диаметром 30 мм протачивали проходным резцом до диаметра 28 мм ($S_{пр} = 0,2$ мм/об, $n_3 = 600$ об/мин, $t = 0,2$ мм), а затем упрочняли реверсивным ППД.

Для реализации предлагаемого способа отделочно-упрочняющей обработки авторами статьи разработано устройство для образования реверсивного кругового движения рабочего инструмента. Устройство работает на основе использования шагового электродвигателя, реверсивное движение которого задается управляющей программой, запрограммированной на персональном компьютере [12].

Экспериментальные исследования проведены на токарном станке 1К62, где вместо верхней части суппорта устанавливается устройство для создания реверсивного кругового движения двухрадиусного ролика. Геометрические характеристики рабочего инструмента: диаметр рабочего ролика $D_p = 30$ мм, профильный радиус $r_{пр} = 2,5$ мм, расстояние между вершинами рабочего ролика $I = 1,5$ мм, материал – твердый сплав ВК-8. В качестве технологической смазки использовано индустриальное масло И-40А, которое широко применяется при обработке деталей ППД [13].

Методика измерения остаточных напряжений. Для измерения остаточных напряжений на поверхности упрочненных деталей использован метод на основе шумов Баркгаузена [14, 15]. Применение данного метода обусловлено построением корреляционной связи между амплитудой шумов Баркгаузена (магнитоупругим параметром) и остаточными напряжениями в исследуемых металлах и сплавах. В общем случае шумы Баркгаузена понижаются при повышении твердости и остаточных сжимающих напряжений и увеличиваются при наличии растягивающих напряжений [14].

Эксперименты выполнены на упрочненных

цилиндрических образцах из стали 45, которая является сталью ферромагнитного класса, хорошо отражающей эффект шумов Баркгаузена при воздействии магнитного поля. Измерения проводили с помощью цифрового анализатора шумов Баркгаузена Rollscan 300 (рис. 2). Оптимальная частота намагничивания по развертке составляет $f = 150$ Гц, а оптимальное напряжение намагничивания $U = 1,1$ В.

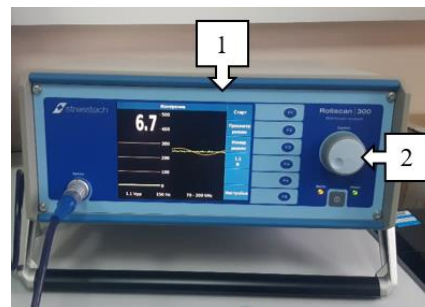


Рис. 2. Цифровой анализатор шумов Баркгаузена Rollscan 300: 1 – информационный экран; 2 – регулятор параметром шумов

Fig. 2. Rollscan 300, a digital Barkhausen noise analyzer: 1 is an information screen; 2 is a noise parameter regulator

Для определения корреляционной зависимости между шумами Баркгаузена и остаточными напряжениями проведены предварительные исследования напряженного состояния плоских образцов с размерами $1,8 \times 11 \times 140$ мм, изготовленных тоже из стали 45 (рис. 3, а).

Предварительные опыты на плоских образцах проводили в следующей последовательности: для первой пластины – сводили ее края навстречу друг другу вверх для создания сжимающих напряжений на верхней поверхности пластины; затем вторую пластину прогибали в обратном направлении для создания растягивающих напряжений на верхней поверхности, при этом одновременно регистрировали стрелу прогиба индикатором с двухопорной планкой на базе $b = 64$ мм (рис. 3, б). Увеличение стрелы прогиба на образец осуществляли с шагом 100 мкм. По значению стрелы прогиба вычисляли радиус изгиба пластины, по которому с учетом модуля упругости (для стали 45 $E = 2 \cdot 10^5$ МПа) определяли создаваемые напряжения на каждом образце. Параллельно процессу создания напряжений на пластинах измеряли соответствующие значения магнитоупругого параметра МП (амплитуды шумов) (рис. 3, в). Замеры стрелы прогиба пластин и расчет напряжений вычисляли по следующим формулам:

$$\sigma = E \nu \frac{1}{\rho_k}; \quad \rho_k = \frac{b^2}{8 f_c}; \quad \nu = \frac{S_j}{2}, \quad (1)$$

где f_c – прогиб пластины на базе b ; E – модуль упругости (для стали 45 $E = 2 \cdot 10^5$ МПа); ρ_k – кривизна пластины; Y – расстояние между нейтральными линиями поперечного сечения и поверхностью пластины; S_j – толщина пластины.

В результате численных расчетов по формулам (1) и результатов измерения построена корреляционная зависимость магнитоупругого параметра от максимальных напряжений при изгибе пластин (рис. 4).

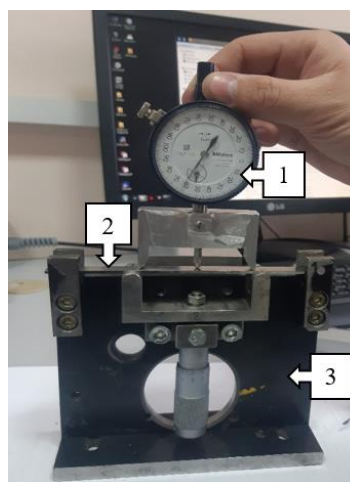
Анализируя рис. 4, можно сделать вывод о том, что для стали 45 сжимающие напряжения

соответствуют малым значениям МП (ниже 64-65 МП), а при значении МП свыше 65 единиц создаются растягивающие напряжения. На участках возрастания сжимающих и снижением растягивающих напряжений наблюдается уменьшение шумов.

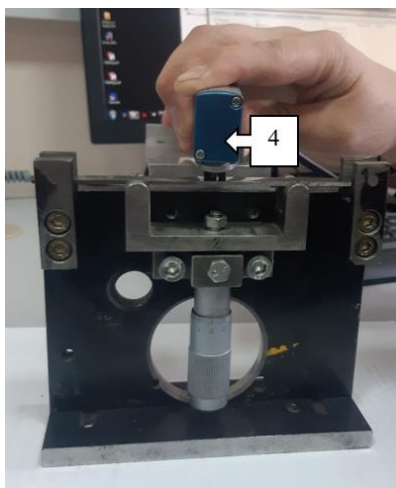
На каждом цилиндрическом участке измерение МП проводили непосредственно в 8-ми контрольных точках, расположенных на поверхности по двум окружностям (рис. 3, г) и с использованием графика на рис. 4 вычисляли напряжения на поверхности деталей, упрочненных реверсивным ППД.



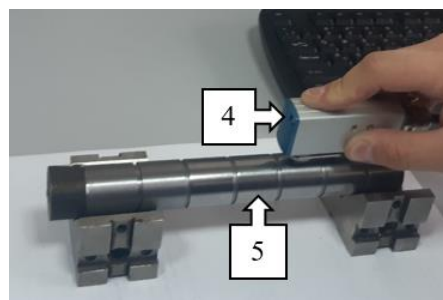
а



б



в



г

Рис. 3. Измерение остаточных напряжений на основе шумов Баркгаузена: а – контрольные образцы-пластины; б – измерение деформации пластины; в – измерение шумов Баркгаузена на плоских пластинах; г – измерение шумов Баркгаузена на цилиндрических образцах; 1 – индикатор для измерения стрелы прогиба; 2 – пластина; 3 – станок для изгиба пластины; 4 – датчик шумов Баркгаузена; 5 – цилиндрический образец

Fig. 3. Measurement of residual stresses based on Barkhausen noise: а are reference samples-plates; б is measurement of plate deformation; в is measurement of Barkhausen noise on flat plates; г is measurement of Barkhausen noise on cylindrical samples; 1 is an indicator for measuring the camber; 2 is a plate; 3 is a machine for bending the plate; 4 is a Barkhausen noise sensor; 5 is a cylindrical sample

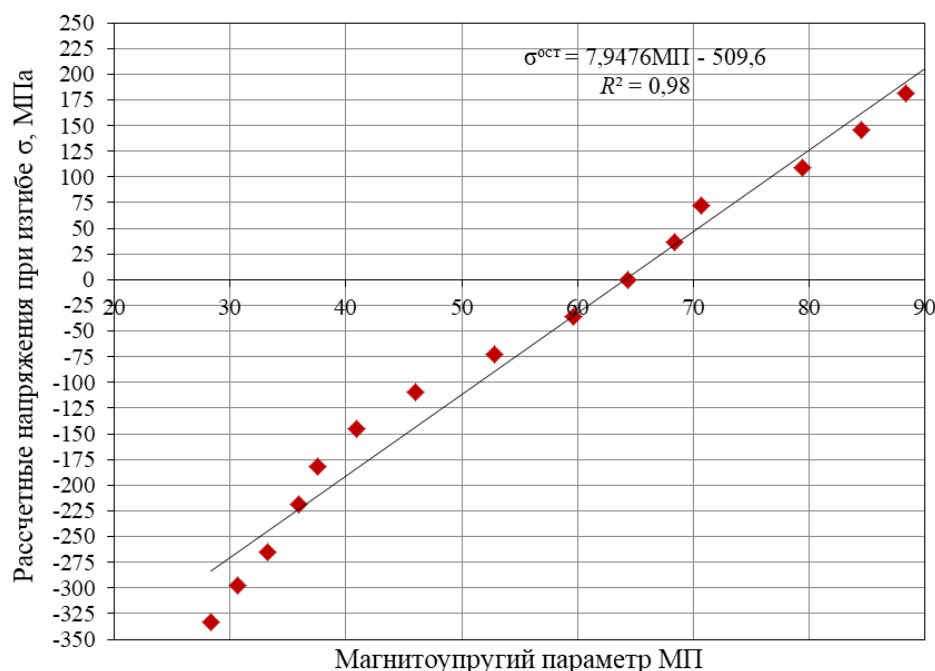


Рис. 4. Корреляционная зависимость остаточных напряжений от амплитуды шума в пластинах из стали 45
Fig. 4. Correlation dependence between residual stresses and noise amplitude in the steel 45 plates

Результаты экспериментальных исследований

Базовые режимы обработки, которые были установлены в результате предварительного упрочнения реверсивным ППД, представлены в работе [12]. Значения шумов Баркгаузена и остаточных напряжения до и после реверсивного ППД (при базовых режимах упрочнения) представлены в **таблице**.

Из **таблицы** видно, что на поверхности исходного образца после механической обработки резанием создаются небольшие растягивающие напряжения величиной 10,2 МПа, а после реверсивного ППД (при базовых режимах упрочнения) на поверхности деталей растягивающие напряжения переходят в сжимающие, значения которых достигают около 310 МПа.

Таблица. Значения шумов Баркгаузена и остаточных напряжений
Table. Barkhausen noise and residual stresses

Параметры измеряемых величин	Исходный образец (неупрочненный)	Упрочненный образец (базовые режимы)
Величина магнитоупругих параметров (МП)	65,4	25,1
Величина остаточных напряжений, МПа	+10,2	-310,2

Для сопоставления экспериментальных результатов определения остаточных напряжений с использованием шумов Баркгаузена с расчетными результатами, полученными при конечно-элементном моделировании [16], использовали интенсивность напряжений, которая оценивает сложное напряженное состояние следующей формулой [17, 18]:

$$\sigma_i^{\text{ост}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[\left(\sigma_z^{\text{ост}} - \sigma_\phi^{\text{ост}} \right)^2 + \left(\sigma_\phi^{\text{ост}} - \sigma_r^{\text{ост}} \right)^2 + \left(\sigma_r^{\text{ост}} - \sigma_z^{\text{ост}} \right)^2 \right]}, \quad (2)$$

где $\sigma_z^{\text{ост}}$, $\sigma_r^{\text{ост}}$, $\sigma_\phi^{\text{ост}}$ – компоненты остаточных напряжений, действующих по осям Oz, Or, Oφ (см. **рис. 1**).

Рассмотрим степень влияния каждого технологического параметра реверсивного ППД на величину сжимающих остаточных напряжений на поверхности цилиндрических образцов.

Влияние основных параметров реверсивного ППД. На **рис. 5** представлены экспериментальные и расчетные значения сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов от основных параметров реверсивного ППД (продольной подачи $S_{\text{пр}}$, частоты вращения заготовки n_z и радиального натяга t).

Из рис. 5 следует, что экспериментальные значения сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов увеличиваются при уменьшении продольной подачи и увеличении частоты вращения заготовки и величины радиального натяга. Уменьшение продольной подачи от 0,28 до 0,07 мм/об, увеличение частоты вращения заготовки от 60 до 300 об/мин и величины радиального натяга от 0,07 до 0,28 мм приводят к увеличению сжимающих остаточных напряжений на 16,6, 14,7 и 10,2% соответственно. Следует отметить, что полученные экспериментальные результаты по сравнению с расчетными показали

удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений сжимающих остаточных напряжений в зависимости от основных параметров реверсивного ППД. При этом разница между экспериментальными результатами и расчетными варьируется в пределах от 3 до 19%.

Влияние реверсивных параметров упрочнения. На рис. 6 представлены графики, показывающие экспериментальные и расчетные значения сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов в зависимости от начального угла установки РИ (α_n), амплитуды угла (α_p) и реверсивной частоты вращения РИ (n_p) при реверсивном ППД.

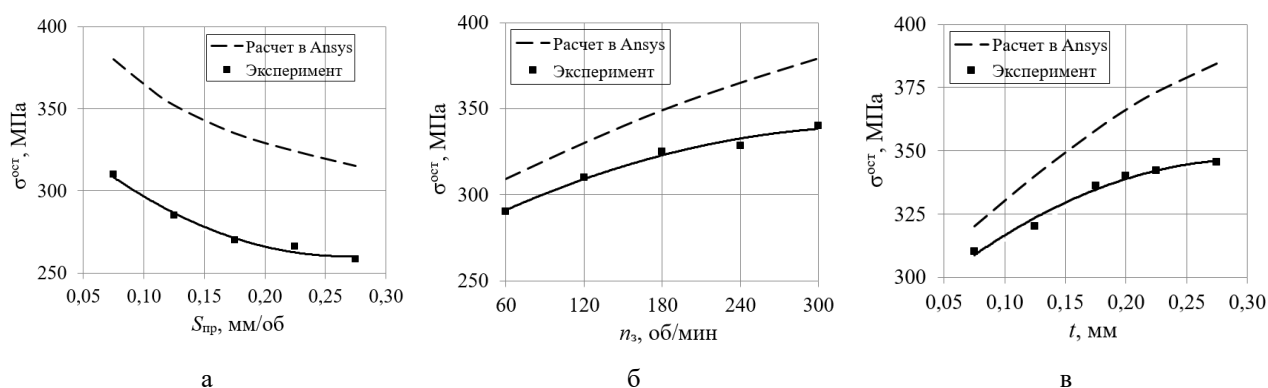


Рис. 5. Зависимость сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов от основных параметров реверсивного ППД: а – продольной подачи $S_{\text{пр}}$; б – частоты вращения заготовки n_z ; в – величины радиального натяга t

Fig. 5. Dependence between compressive residual stresses on the surface of the samples and the main parameters of reverse SPD: а is longitudinal feed (S_{long}); б is rotational velocity of the workpiece ($n_{\text{workpiece}}$); в is a radial interference fit (t)

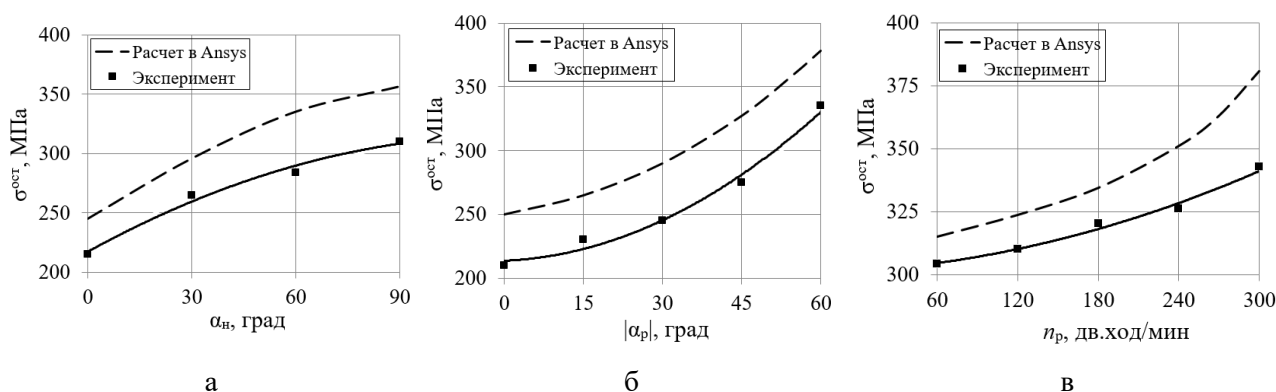


Рис. 6. Зависимость сжимающих остаточных напряжений на поверхности образцов при реверсивном ППД от: а – начального угла установки РИ; б – амплитуды угла и реверсивного вращения РИ; в – реверсивной частоты вращения РИ

Fig. 6. Dependence between compressive residual stresses on the surface of the samples during reverse SPD and: а is the initial angle of installation of the working tool; б are amplitudes of the angle and reverse rotation of the working tool; в is reverse rotational velocity of the working tool

По рис. 6 можно отметить, что с увеличением начального угла установки РИ от 0 до 90°, амплитуды угла реверсивного вращения РИ от 0 до 60° и реверсивной частоты вращения РИ от 60 до 300 дв. ход/мин экспериментальные значения сжимающих остаточных напряжений увеличиваются на 30,5, 37,3 и 11,2%, соответственно. Установлено, что характер изменения сжимающих остаточных напряжений в зависимости от реверсивных параметров упрочнения, полученный при экспериментальном определении, практически согласуется с результатами, полученными при моделировании. При этом расхождение при сопоставлении результатов, полученных в результате численных расчетов при моделировании и при экспериментальном определении, не превышает 15%.

Для поиска оптимальных режимов реверсивного ППД, обеспечивающих получение максимальных сжимающих остаточных напряжений на поверхности деталей, использовали компьютерную программу Microsoft Visual Studio 2012 с языком программирования Python [19, 20], которая является одним из широко применяемых программ для решения задач статистического

характера в области машиностроения. Для обработки данных в компьютерной программе необходимо использовать однофакторные уравнения (3), полученные при описании экспериментальных кривых (см. рис. 5 и 6). При этом сжимающие остаточные напряжения на поверхности деталей при реверсивном ППД являются основным параметром оптимизации:

$$\sigma_{\text{ост}} = \begin{cases} 1303,3S_{\text{пр}}^2 - 696,45S_{\text{пр}} + 353,24 \\ -0,0006n_3^2 + 0,4024n_3 + 269,04 \\ -724,05t^2 + 439,9t + 279,86 \\ 0,0003n_p^2 + 0,0338n_p + 301,4 \\ 0,0295\alpha_p^2 + 0,172\alpha_p + 213,76 \\ -0,0066\alpha_n^2 + 1,6015\alpha_n + 217,38 \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 7 представлены результаты статистической обработки по определению оптимальных режимов упрочнения, обеспечивающих получение максимальных сжимающих остаточных напряжений при реверсивном ППД.

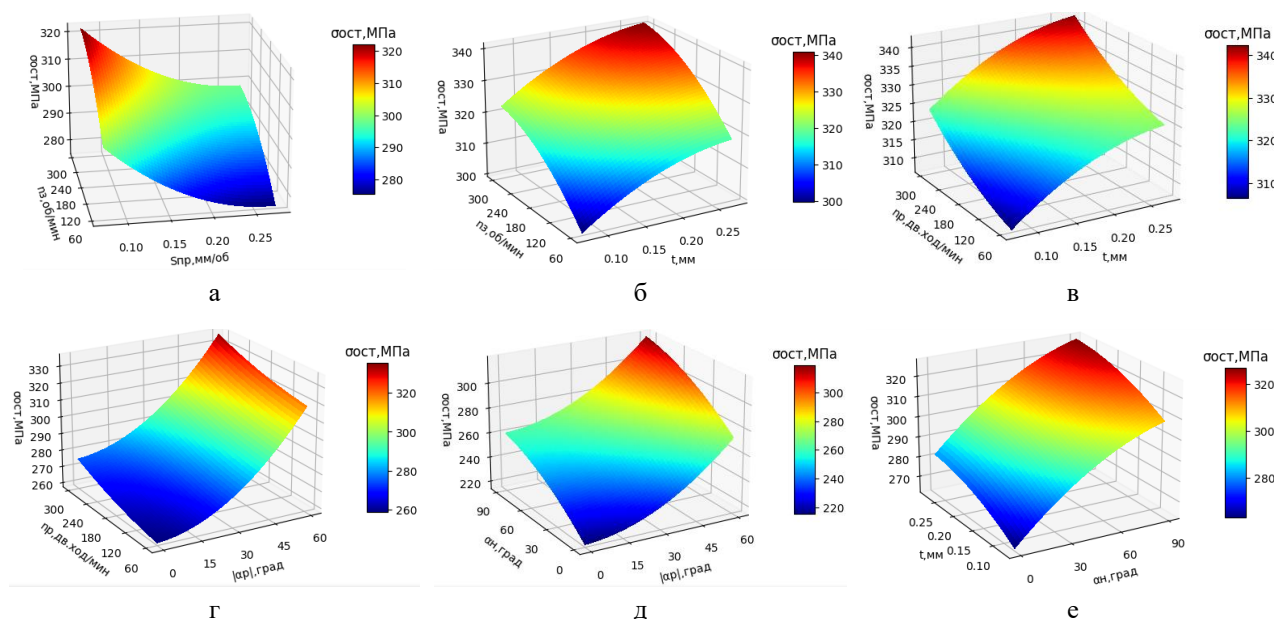


Рис. 7. Поверхности отклика сжимающих остаточных напряжений на поверхности цилиндрических деталей при реверсивном ППД в зависимости от: а – продольной подачи и частоты вращения заготовки; б – частоты вращения заготовки и величины радиального натяга; в – величины радиального натяга и реверсивной частоты вращения рабочего инструмента; г – реверсивной частоты вращения и амплитуда угла реверса рабочего инструмента; д – амплитуды угла реверса и начального угла установки рабочего инструмента; е – величины радиального натяга и начального угла установки рабочего инструмента

Fig. 7. Response surfaces of compressive residual stresses on the surface of cylindrical parts during reverse SPD depending on: a is longitudinal feed and rotational velocity of the workpiece; б is rotational velocity of the workpiece and the radial interference fit; в are the radial interference fit and reverse rotational velocity of the working tool; г is reverse rotational velocity and amplitude of the reverse angle of the working tool; д are amplitudes of the reverse angle and the initial angle of installation of the working tool; е are the radial interference fit and the initial angle of installation of the working tool

В результате регрессионного анализа установлено, что максимальные сжимающие остаточные напряжения на поверхности детали (около 345 МПа) при реверсивном ППД достигаются при следующих значениях технологических параметров ППД: продольная подача – 0,07-0,10 мм/об; частота вращения заготовки – 280-300 об/мин; величина радиального натяга – 0,25-0,28 мм; реверсивная частота вращения РИ – 250-300 дв. ход/мин; начальный угол установки РИ – 90° и величина угла реверсивного вращения РИ – $\pm 55 \pm 60^\circ$.

Таким образом, результаты экспериментального исследования доказывают эффективность способа реверсивного ППД по созданию сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое и его можно рекомендовать для проведения отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических деталей.

Выводы

1. С использованием шумов Баркгаузена установлена связь между магнитоупругим параметром (МП) и механическими напряжениями для стали 45, которая описывается следующим выражением: $\sigma = 7,9476 \text{ МПа} - 509,6$ (коэффициент достоверности $R^2 = 0,98$). Установлено, что сжимающие напряжения соответствуют малым значениям магнитоупругих параметров шумов (ниже 65 МПа), а при значении МП свыше 53 единиц создаются растягивающие напряжения.

2. Экспериментальными результатами установлено, что после реверсивного ППД на поверхности детали формируются сжимающие остаточные напряжения, величина которых варьируется в интервалах 210-345 МПа в зависимости от выбранных режимов обработки. Среди основных технологических параметров реверсивного ППД величина радиального натяга и реверсивная частота вращения РИ оказывают наибольшее влияние на величину сжимающих остаточных напряжений. Увеличение радиального натяга, реверсивной частоты вращения РИ и снижение величины продольной подачи приводит к весьма существенному росту сжимающих остаточных напряжений на поверхности детали ($\sigma^{\text{ост}} \sim 342\text{-}345 \text{ МПа}$).

3. Полученные экспериментальные результаты по сравнению с расчетными показали удовлетворительное совпадение остаточных напряжений в зависимости от технологических параметров реверсивного ППД. При этом разница между экспериментальными и расчетными результатами не превышает 20%.

4. Определены оптимальные режимы упрочнения, обеспечивающие получение максимальных сжимающих остаточных напряжений на поверхности детали: продольная подача – 0,07-0,10 мм/об; частота вращения заготовки – 280-300 об/мин; величина радиального натяга – 0,25-0,28 мм; реверсивная частота вращения РИ – 250-300 дв. ход/мин; начальный угол установки РИ – 90° и величина угла реверсивного вращения РИ – $\pm 55 \pm 60^\circ$.

Список источников

1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
2. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
3. Поверхностное пластическое деформирование как метод повышения качества деталей машин / Бутаков Б.И., Шебанин В.С., Марченко Д.Д., Артюх А.В. // Труды ГОСНИТИ. 2011. Т. 107. №2. С. 85-87.
4. Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Влияние режимов на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое при размерном совмещенном обкатывании // Обработка металлов. 2008. №2(39). С. 15-22.
5. Просвиркина Е.А., Саушкин М.Н. Исследование полей остаточных напряжений и пластических деформаций при поверхностном упрочнении цилиндрического образца с учетом организации процесса ППД // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2004. № 26. С. 194-195.
6. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования: монография / под ред. С.А. Зайдеса. Т. 2. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2022. 584 с.
7. Нгуен Тхань Ван, Нгуен Ван Хинь, Нгуен Хыу Хай. Влияние параметров тороидального ролика на геометрические характеристики отпечатков и давление в зоне контакта при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Современные материалы, техника и технологии. 2022. № 6(45). С. 99-103.
8. Нго Као Кыонг. Интенсификация напряженного состояния в очаге деформации при поверхностном пластическом деформировании цилиндрических деталей // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Иркутск: Изд-во Иркутского национального исследовательского технического университета, 2021. С. 16-26.
9. Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. №3. С. 129-139.
10. Нго Као Кыонг. Исследование внеконтактных деформаций при локальном нагружении // Вестник

науки и образования Северо-Запада России. 2015. Т. 1. №3. С. 6-13.

11. Пат. 2758713 Российская Федерация, МПК В24В39/04. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения / Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай; заявка № 2021100553; заявл. 14.01.2021; опублик. 01.11.2021. Бюл. № 31.
12. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на шероховатость упрочненных деталей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. №1. С. 120-130.
13. Абрамов А.Н., Боткин А.В., Балышева Э.Г. Влияние физико-химических свойств смазочного материала на шероховатость поверхности деформируемой заготовки при волочении // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. №7. С. 313-316.
14. Никитина Е.Н. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин // Вестник научнотехнического развития. 2010. №4(32). С. 18-28.
15. Ильяхинский А.В., Родюшкин В.М., Никитина Е.А. Об оценке действующих напряжений акустическим методом при пластическом деформировании стали // Транспортные системы. 2018. №1(17). С. 52-56.
16. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние начальной ориентации рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Технология металлов. 2022. №12. С. 11-20.
17. Attila Kossa, László Szabó. Numerical implementation of a novel accurate stress integration scheme of the von Mises elastoplasticity model with combined linear hardening // Finite Elements in Analysis and Design. 2010, vol. 46, pp. 391-400. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2009.12.006>
18. Strouboulisa T., Babuškab I., Dattaa D.K., Coppas K., Gangaraja S.K. A posteriori estimation and adaptive control of the error in the quantity of interest. Part I: A posteriori estimation of the error in the von Mises stress and the stress intensity factor // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2000, vol. 181, pp. 261-294. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00077-8)
19. Francesco Farina, Andrea Camisa, Andrea Testa, Ivano Notarnicola, Giuseppe Notarstefano. DISROPT: a Python Framework for Distributed Optimization // IFAC-PapersOnLine. 2020, vol. 53, pp. 2666-2671. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.382>
20. Antonio Benítez-Hidalgo, Antonio J. Nebro, José García-Nieto, Izaskun Oregi, Javier Del Ser. jMetalPy: A Python framework for multi-objective optimization with metaheuristics // Swarm and Evolutionary Computation. 2019, vol. 51, pp. 100598.

References

1. Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 328 p. (In Russ.)
2. Smelyansky V.M. *Mekhanika uprochneniya detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 300 p. (In Russ.)
3. Butakov B.I., Shebanin V.S., Marchenko D.D., Artyukh A.V. Surface plastic deformation as a method for improving the quality of machine parts. *Trudy GOSNITI* [Proceedings of GOSNITI]. 2011;107(2):85-87. (In Russ.)
4. Blyumenshtein V.Yu., Makhalov M.S. Influence of modes on the formation of residual stresses in the surface layer during dimensional combined burnishing. *Obrabotka metallov* [Metal Working]. 2008;(2(39)):15-22. (In Russ.)
5. Prosvirkina E.A., Saushkin M.N. Research on the fields of residual stresses and plastic deformations during surface hardening of a cylindrical sample taking into account the organization of the surface plastic deformation process. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences]. 2004;(26):194-195. (In Russ.)
6. Zaides S.A. *Spravochnik po protsessam poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya: monografiya* [Handbook of surface plastic deformation processes: Monograph]. Vol. 2. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2022, 584 p. (In Russ.)
7. Nguyen Thanh Van, Nguyen Van Hinh, Nguyen Huu Hai. Influence of parameters of a toroidal roller on the geometric characteristics of prints and pressure in the contact zone during reverse surface plastic deformation. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii* [Modern Materials, Equipment and Technologies]. 2022;(6(45)):99-103. (In Russ.)
8. Ngo Cao Cuong. Intensification of the stress state in the deformation zone during surface plastic deformation of cylindrical parts. *Materialy XI Vserossiiskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the 11th All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2021, pp. 16-26. (In Russ.)
9. Zaides S.A. New methods of surface plastic deformation in manufacturing machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018;16(3):129-139. (In Russ.)
10. Ngo Cao Cuong. Study on non-contact deformations under local loading. *Vestnik nauki i obrazovaniya*

- Severo-Zapada Rossii* [Journal of Science and Education of the North-West of Russia]. 2015;1(3):6-13. (In Russ.)
11. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. *Sposob poverkh-nostnogo plasticheskogo deformirovaniya naruzhnykh poverkhnostey tel vrashcheniya* [Method for surface plastic deformation of the outer surfaces of bodies of revolution]. Patent RU, no. 2758713, 2021.
 12. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Influence of parameters of reverse surface plastic deformation on roughness of hardened parts. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University]. 2023;19(1):120-130. (In Russ.)
 13. Abramov A.N., Botkin A.V., Balysheva E.G. Influence of physical and chemical properties of a lubricant on surface roughness of a deformable workpiece during drawing. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank Production in Mechanical Engineering]. 2018;16(7):313-316. (In Russ.)
 14. Nikitina E.N. Advantages of the acoustoelasticity method for non-destructive testing of mechanical stresses in machine parts. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Bulletin of Scientific and Technical Development]. 2010;(4(32)):18-28. (In Russ.)
 15. Ilyakhinsky A.V., Rodyushkin V.M., Nikitina E.A. On the assessment of acting stresses by the acoustic method during plastic deformation of steel. *Transportnye sistemy* [Transport Systems]. 2018;(1(17)):52-56. (In Russ.)
 16. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Influence of the initial orientation of the working tool on the stress and strain state during reverse surface plastic deformation. *Tekhnologiya metallov* [Technology of Metals]. 2022;(12):11-20. (In Russ.)
 17. Attila Kossa, László Szabó. Numerical implementation of a novel accurate stress integration scheme of the von Mises elastoplasticity model with combined linear hardening. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2010;46:391-400. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2009.12.006>
 18. Strouboulis T., Babuškab I., Dattaa D.K., Coppas K., Gangaraja S.K.. A posteriori estimation and adaptive control of the error in the quantity of interest. Part I: A posteriori estimation of the error in the von Mises stress and the stress intensity factor. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2000;181:261-294. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00077-8)
 19. Francesco Farina, Andrea Camisa, Andrea Testa, Ivano Notarnicola, Giuseppe Notarstefano. DISROPT: a Python framework for distributed optimization. *IFAC-PapersOnLine*. 2020;53:2666-2671. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.382>
 20. Antonio Benítez-Hidalgo, Antonio J. Nebro, José García-Nieto, Izaskun Oregi, Javier Del Ser. jMetalPy: A Python framework for multi-objective optimization with metaheuristics. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2019;51:100598.

Поступила 08.06.2023; принята к публикации 03.07.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 08/06/2023; revised 03/07/2023; published 25/09/2023

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

Нгуен Хыу Хай – аспирант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: nquan6799@gmail.com. ORCID 0000-0001-7909-385X

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

Nguyen Huu Hai – postgraduate student,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: nquan6799@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7909-385X

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

УДК 66-932.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-62-77



ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВА AL-РЗМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ВОЛОЧЕНИЯ

Ворошилов Д.С.¹, Лебедева О.С.¹, Беспалова Д.Д.¹,
Дурнопьянова А.С.¹, Бернгардт В.А.^{1,2}, Ворошилова М.В.¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² ООО «РУСАЛ ИТЦ», Красноярск, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты силовых параметров при получении прутков и проволоки диаметром 2 мм из них и механических и электрофизических свойств полученных полуфабрикатов из сплава системы Al-РЗМ с содержанием редкоземельных металлов в количестве 1%. Проволока получена в результате реализации технологии методами совмещенной прокатки-прессования (СПП), совмещенного литья и прокатки-прессования (СЛиПП) и волочения. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из экспериментального сплава на лабораторной установке СПП (СЛиПП)-200. Получены данные по временному сопротивлению разрыву при растяжении и относительному удлинению горячепрессованных прутков диаметром 5 и 9 мм, а также проволоки диаметром 2 мм, полученной из этих прутков после реализации процессов СПП и СЛиПП. Установлено, что предложенные режимы обработки позволяют получать методом комбинированной прокатки-прессования прутки диаметром 9 и 5 мм из заготовок размерами 14×14 мм (для процесса СПП), а также получать прутки из расплава, кристаллизующегося в валках и исключая передел в виде получения твердой заготовки (для метода СЛиПП). Усилия на валках не превышают 323 кН для процесса СПП и 279 кН для процесса СЛиПП. Усилия на матрице не превышают 206 кН для процесса СПП и 171 кН для процесса СЛиПП. Пластичность полученных прутков диаметром 5 и 9 мм после методов СПП и СЛиПП была достаточной для последующего волочения проволоки диаметром 2 мм без единого промежуточного отжига (значения относительного удлинения варьировались от 17 до 35% в зависимости от режима получения).

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, редкоземельные металлы, проволока, механические свойства, литье, совмещенное литье и прокатка-прессование, совмещенная прокатка-прессование, волочение, силовые параметры

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00028, <https://rscf.ru/project/23-29-00028/>.

В работе принимали участие студенты кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»: Шабарин Петр Николаевич, Назаренко Дмитрий Витальевич, Киреев Максим Евгеньевич.

© Ворошилов Д.С., Лебедева О.С., Беспалова Д.Д., Дурнопьянова А.С., Бернгардт В.А., Ворошилова М.В., 2023

Для цитирования

Изучение режимов получения проволоки из сплава Al-РЗМ с применением совмещенных методов обработки и последующего волочения / Ворошилов Д.С., Лебедева О.С., Беспалова Д.Д., Дурнопьянова А.С., Бернгардт В.А., Ворошилова М.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 62-77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-62-77>



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

STUDY ON MODES OF PRODUCING WIRE FROM AL-REM ALLOYS USING COMBINED METHODS OF PROCESSING AND SUBSEQUENT DRAWING

Voroshilov D.S.¹, Lebedeva O.S.¹, Beshpalova D.D.¹,
Durnopyanova A.S.¹, Berngardt V.A.^{1,2}, Voroshilova M.V.¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² LLC RUSAL ETC, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The paper presents the force parameters, when producing rods and wire from them with a diameter of 2 mm, and mechanical and electrophysical properties of the manufactured semi-finished products from an alloy of the Al-REM system, containing 1% of rare earth metals. The wire was produced by the methods of combined rolling-extrusion (CRE), combined casting and rolling-extrusion (CCRE) and drawing. The paper contains the results of experimental studies on the process of producing long deformed semi-finished products from an experimental alloy on the CRE (CCRE)-200 laboratory unit. The authors obtained data on ultimate tensile strength and percentage elongation of hot extruded rods with a diameter of 5 and 9 mm, as well as wire with a diameter of 2 mm produced from these rods after the CRE and CCRE processes. It has been established that the proposed processing modes make it possible to produce rods with a diameter of 9 mm and 5 mm by the combined rolling-extrusion method from billets with dimensions of 14×14 mm (for the CRE process), as well as to produce rods from melt that crystallizes in rolls, excluding a process stage of producing a solid billet (for the CCRE method). Roll forces do not exceed 323 kN for the CRE process and 279 kN for the CCRE process. The forces on the die do not exceed 206 kN for the CRE process and 171 kN for the CCRE process. Plasticity of the produced rods with a diameter of 5 and 9 mm after the CRE and CCRE methods was sufficient for the subsequent drawing of a wire with a diameter of 2 mm without a single intermediate annealing (percentage elongation varied from 17 to 35% depending on the production mode).

Keywords: aluminum alloys, rare earth metals, wire, mechanical properties, casting, combined casting-rolling-extrusion, combined rolling-extrusion, drawing, force parameters

The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation, No. 23-29-00028, <https://rscf.ru/project/23-29-00028/>.

The participants of the research included the students of the Metal Forming Department of the Non-Ferrous Metals Institute, Siberian Federal University: Petr N. Shabarin, Dmitrii V. Nazarenko, Maksim E. Kireev.

For citation

Voroshilov D.S., Lebedeva O.S., Beshpalova D.D., Durnopyanova A.S., Berngardt V.A., Voroshilova M.V. Study on Modes of Producing Wire from Al-REM Alloys Using Combined Methods of Processing and Subsequent Drawing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 62-77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-62-77>

Введение

Постоянный рост применения алюминиевых сплавов в энергетике, транспорте, строительстве и других отраслях техники требует разработки новых высокоэффективных технологий, обеспечивающих увеличение их прочности, термостабильности, надежности и долговечности [1-3]. Применение алюминия в этих отраслях объясняется тем, что помимо высокой электропроводности он позволяет значительно облегчить конструкцию силовых проводов, что, по сравнению с медными проводами, позволяет добиться увели-

чения пропускной способности линий электропередачи в 1,5-2 раза при использовании старых опор [4]. Другой причиной увеличения доли потребления алюминиевой катанки являются большие темпы роста цен на медь, которые на сегодняшний день в 4 раза выше цены на алюминий.

Наряду с экономическими преимуществами использования алюминия для производства силовых проводов, хорошо известны и его недостатки, сильно ограничивающие его применение в энергетике. В качестве материалов для проводов в России выпускают в основном катанку из алюминия марки А5Е и А7Е, имеющую низкие проч-

ностные свойства (временное сопротивление разрыву в твердом состоянии до 98 МПа) и термостойкость [3]. Недостаточная прочность, низкое сопротивление ползучести алюминиевой проволоки, изготовленной из такой катанки, даже при нормальной температуре эксплуатации под воздействием длительной нагрузки может привести к ее разрушению. При этом с увеличением рабочей температуры «ползучесть» алюминиевой проволоки повышается, что делает ее непригодной для изготовления термостойких проводов. Спрос на алюминий растет в последние годы, в основном за счет быстро развивающейся китайской экономики, которая уже потребляет около 40% производимого в мире алюминия [4].

Для изготовления алюминиевой катанки в России и за рубежом применяют литейно-прокатные агрегаты, имеющие высокую производительность и позволяющие получать ряд типоразмеров продукции различного диаметра. В России на сегодняшний день эксплуатируется 14 ЛПА, большая часть которых введена в эксплуатацию еще в 70-х годах прошлого столетия и не соответствует современному уровню оборудования. Прежде всего, это связано с недостаточной надежностью прокатных станов для производства катанки из высокопрочных электротехнических сплавов алюминия.

Эти ситуации делают актуальными исследования в области электротехнических сплавов Al-PЗМ, новых технологий их обработки и оборудования с целью получения длинномерных деформированных полуфабрикатов, имеющих повышенный уровень механических свойств и термостойкости при удовлетворительных характеристиках удельного электросопротивления [5-19]. В работах [5, 6] подробно изучены эвтектические превращения при добавке церия в алюминий. В работах [8, 12, 13, 19] изучено влияние редкоземельных элементов в алюминии на электропроводность сплава. Структура и механические свойства сплавов системы Al-PЗМ изучены в работах [7, 9, 11, 14, 15-18]. Легирование алюминия церием и лантаном в равной степени увеличивает прочностные свойства алюминиевого сплава, но на электропроводность более благоприятное влияние оказывает именно церий [13].

В основу энергосберегающих технологий производства длинномерных изделий положено развитие и применение совмещенных процессов прокатки-прессования (СПП) и литья и прокатки-прессования (СЛиПП) [20, 21]. Технологиче-

ские особенности этих способов позволяют получать длинномерные деформированные полуфабрикаты с повышенным уровнем механических характеристик, выходом годного и снизить затраты на производство [22-26].

Учитывая актуальность данной проблемы, целью работы является разработка режимов совмещенной обработки и последующего волочения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из алюминиевого сплава с содержанием 1% РЗМ. Для достижения данной цели было предусмотрено выполнение следующих задач:

1. Проведение экспериментальных исследований по получению прутков методами СПП и СЛиПП из сплава Al-1%РЗМ и проволоки из этих прутков.
2. Изучение силовых параметров процессов СПП и СЛиПП при получении прутков.
3. Исследование механических свойств полученных деформированных полуфабрикатов.
4. Исследование удельного электрического сопротивления полученных методами СПП и СЛиПП прутков и проволоки из них.

Материалы и методы исследования

Для проведения опытов по получению прутков и проволоки и дальнейшего их волочения в лаборатории методом СЛиПП и СПП на установке СПП (СЛиПП)-200 были получены прутки из экспериментального сплава. РЗМ (Ce и La) в сплаве содержалось до 1 мас.%, состав исследуемого сплава и режимы получения прутков приведены в **табл. 1** и **2**.

Для проведения опытов была применена следующая методика [20, 22, 26]. В электрической печи сопротивления нагревался расплав до заданной температуры и выдерживался 10-15 мин при процессе СЛиПП. Для процесса СПП в электрической печи сопротивления нагревались заготовки до заданной температуры и также выдерживались 10-15 мин. Температуру нагрева контролировали хромель-алюмелевой термопарой и потенциометром КСП-3. Одновременно осуществляли нагрев валков до максимальной температуры 100°C при помощи печи, выполненной в виде кожуха по форме валков и снабженного нихромовыми нагревателями. После нагрева до необходимой температуры приводили во вращение валки установки со скоростью 4 или 8 об/мин.

Таблица 1. Химический состав исследуемого сплава

Table 1. Chemical composition of the alloy under study

Содержание, %					
Al	Концентрация РЗМ, мас. %	Ni	Fe	B	Ti
Основа	1,0	0,004	0,1	0,001	0,006

Таблица 2. Технологические режимы СЛиПП и СПП

Table 2. Process modes of CCRE and CRE

Параметры	СЛиПП				СПП			
	$T = 750^{\circ}\text{C}$		$T = 780^{\circ}\text{C}$		$T = 480^{\circ}\text{C}$		$T = 550^{\circ}\text{C}$	
	Диаметр прутка, мм							
Скорость деформации $\xi = 0,74 \text{ с}^{-1}$ (4 об/мин)	9	5	9	5	9	5	9	5
Скорость деформации $\xi = 1,49 \text{ с}^{-1}$ (8 об/мин)	9	5	9	5	9	5	9	5

Расплав (для СЛиПП) или заготовку (для СПП) задавали в калибр и, после того как произошло застывание, при помощи тензометрической аппаратуры фиксировали усилие, оказываемое металлом на валки. Далее металл обжимался в калибре и достигал матрицы, смонтированной на матрице-держателе. С помощью гидравлического цилиндра матрица была плотно поджата к валкам снизу, поэтому металл распрессовывался, заполняя калибр в зоне распрессовки, а затем за счет постоянного поступления металла в калибр выдавливался через калибрующее отверстие матрицы в виде прутка. Далее полученные пресс-изделия подвергались испытаниям по определению механических, электрофизических свойств.

Сила на матрице фиксировалась тензометрической аппаратурой с помощью кольцевой месдозы. В качестве основной регистрирующей аппаратуры применяли универсальную тензостанцию ZET 017-T8.

Для фиксации энергосиловых параметров процесса совмещенной прокатки-прессования использовались месдозы, каждая из которых представляла собой металлический корпус с наклеенными на него тензодатчиками.

Тензометрическая станция ZET 017-T8 предназначена для проведения тензоизмерений одновременно по нескольким каналам. Прибор отличается высокая точность измерений и регистрации сигналов. Возможны различные вари-

анты подключения к ПК, а также работа в автономном режиме.

Тензостанция может работать в автономном режиме. Сначала тензостанция подключается к компьютеру и задается сценарий работы в автономном режиме. Далее проводятся измерения с записью сигналов на SD-карту. После окончания эксперимента тензостанция вновь подключается к компьютеру, данные с SD-карты переписываются на компьютер и производится их обработка.

Для измерения энергосиловых параметров кольцевые месдозы были установлены под нажимные винты и гидроцилиндр, подключены к регистрирующей аппаратуре. Для измерения усилия на матрице и нажимных винтах применяли датчики силы CWW-50tf и CWW-100tf фирмы DacellCo. LTD с максимально допустимым усилием сжатия 500 кН и 1 МН соответственно.

Полученные прутки диаметром 9 и 5 мм подвергали холодному волочению до диаметра 2 мм. Волочение производили на цепном волочильном стане однократного действия (рис. 1). Технические характеристики волочильного стана приведены в табл. 3. Маршрут волочения для прутков диаметром 9 мм составлял: 9,0–8,5–7,0–6,5–5,9–5,4–5,0–4,5–4,0–3,6–3,0–2,8–2,48–2,2–2,0 мм. Маршрут волочения для прутков диаметром 5 мм составлял: 5,0–4,5–4,2–4,0–3,6–3,3–3,0–2,8–2,48–2,2–2,0 мм.



Рис. 1. Цепной волочильный стан
однократного действия

Fig. 1. A single chain drawbench

Таблица 3. Технические характеристики
волочильного стана

Table 3. Specifications of the drawbench

Характеристики	Значения характеристик
Длина волочения, мм	2000
Количество ниток, шт.	1
Сила волочения, кН	50
Скорость волочения, м/с	0,17
Потребляемая мощность, кВт	25
Габаритные размеры, мм	3000×1800×1300

Суммарная степень деформации ε_{Σ} при холодном волочении прутков рассчитывалась по формуле

Таблица 4. Результаты исследований энергосиловых параметров сплава Al+1% РЗМ по методу СЛиПП
Table 4. Studies on force parameters of Al+1% REM alloy according to the CCRE method

Параметры		$T = 750^{\circ}\text{C}$		$T = 780^{\circ}\text{C}$	
		Ø 9 мм	Ø 5 мм	Ø 9 мм	Ø 5 мм
$\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ (4 об/мин)	$P_{\text{вал.}}$, кН	—	279	—	230
	$P_{\text{матр.}}$, кН	—	155	—	145
$\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$ (8 об/мин)	$P_{\text{вал.}}$, кН	208	270	190	223
	$P_{\text{матр.}}$, кН	146	171	127	150

Таблица 5. Результаты исследований энергосиловых параметров сплава Al+1% РЗМ по методу СПП
Table 5. Studies on force parameters of Al+1% REM alloy according to the CRE method

Параметры		$T = 550^{\circ}\text{C}$		$T = 480^{\circ}\text{C}$	
		Ø 9 мм	Ø 5 мм	Ø 9 мм	Ø 5 мм
$\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ (4 об/мин)	$P_{\text{вал.}}$, кН	235	255	294	323
	$P_{\text{матр.}}$, кН	127	176	167	206
$\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$ (8 об/мин)	$P_{\text{вал.}}$, кН	216	215	274	287
	$P_{\text{матр.}}$, кН	107	137	137	176

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{F_0 - F_i}{F_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения исходной заготовки для волочения (пруток); F_i – площадь поперечного сечения проволоки в i -м проходе.

Механические свойства определяли на оборудовании Walter + Bai AG LFM 400 кН и LFM 20 кН (Walter + Bai AG, Швейцария) в соответствии с ГОСТ 1497-84.

Удельное электрическое сопротивление ρ измеряли на образцах длиной 1 м с помощью омметра «Виток» по ГОСТ 7229-76.

Полученные результаты и их обсуждение

Для измерения энергосиловых параметров кольцевые месдозы были установлены под нажимные винты валков и гидроцилиндр матрицы и подключены к регистрирующей аппаратуре. Результаты измерений усилий представлены в табл. 4 и 5.

Усилия на валках не превышают 323 кН для процесса СПП и 279 кН для процесса СЛиПП. Усилия на матрице не превышают 206 кН для процесса СПП и 171 кН для процесса СЛиПП.

Следует отметить, что для получения проволоки не потребовалось ни одного промежуточного отжига. Для сравнения между собой механических свойств полученной проволоки были построены графики зависимости измеряемых величин от степени деформации (рис. 2-7).

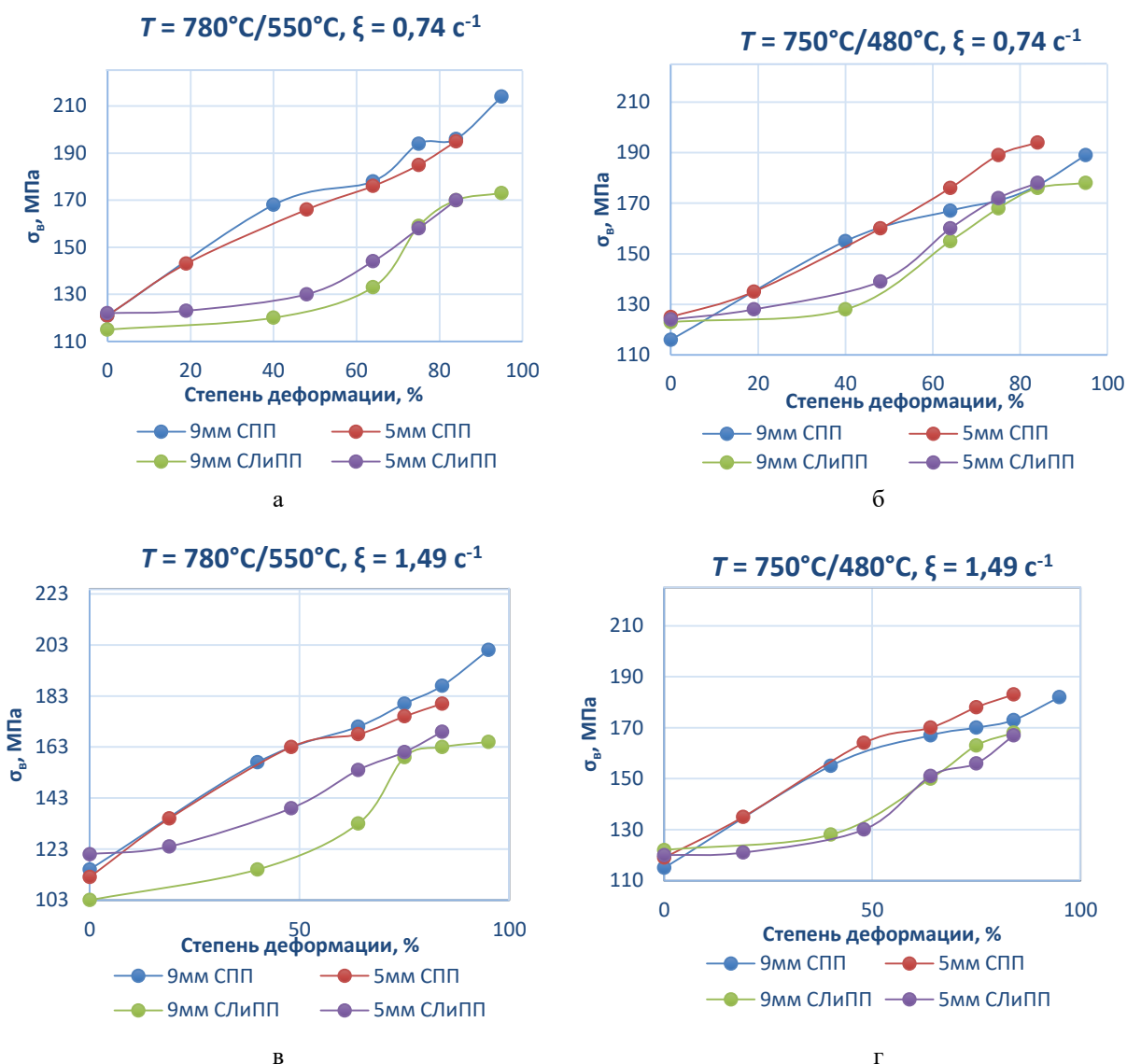
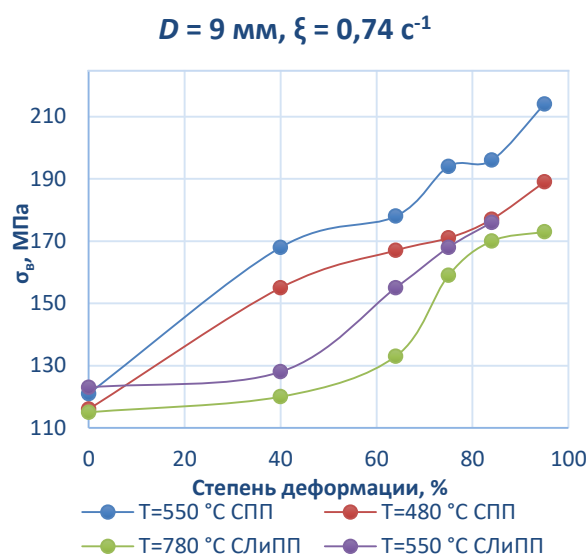


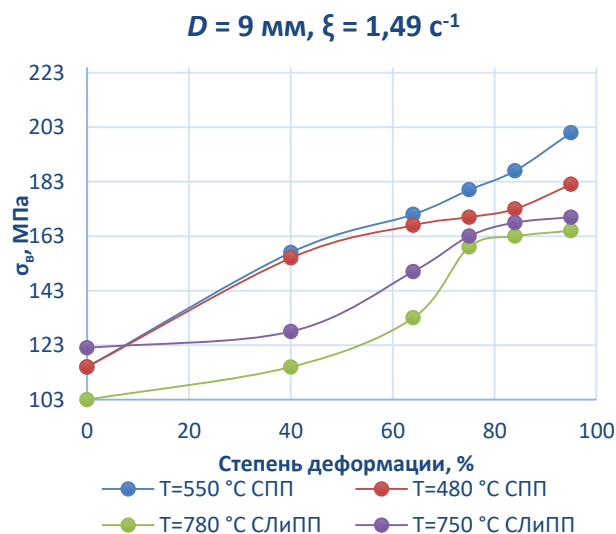
Рис. 2. Прочностные свойства прутков из сплава Al-1%РЗМ (сравнение по коэффициенту вытяжки)
Fig. 2. Strength properties of rods from Al-1% REM alloy (compared by the coefficient of elongation)

Как видно из **рис. 2**, наибольшей прочностью обладают прутки при режиме СПП при $T = 550^{\circ}\text{C}$ и скорости равной $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ (**рис. 2, а**), а при СЛПП максимальные показатели прочности

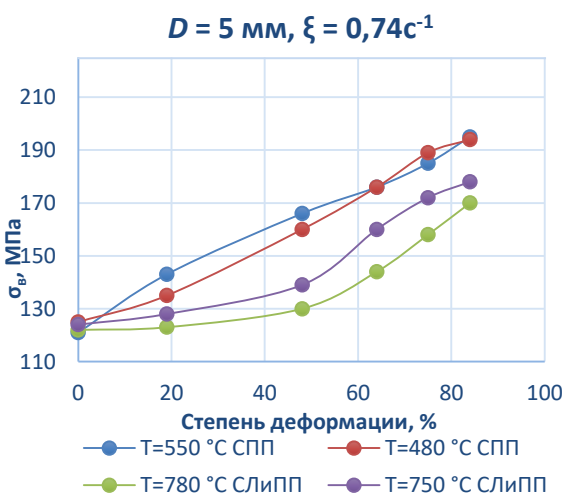
наблюдаются на **рис. 2, б**. Колебания значения σ_b в зависимости от режима получения полуфабриката составляют 10-40 МПа.



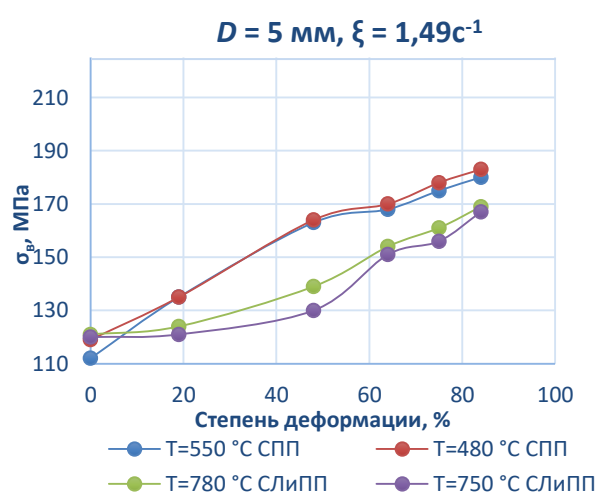
а



б



в



г

Рис. 3. Прочностные свойства прутков из сплава Al-1%РЗМ (сравнение по температуре)

Fig. 3. Strength properties of rods from Al-1% REM alloy (compared by temperature)

Как видно из **рис. 3**, наибольшей прочностью обладают режимы обработки при $T = 550^\circ\text{C}$ и скорость равной $\xi = 0,74 \text{ с}^{-1}$ (**рис. 3, а**). Температура оказывает влияние на режимы СПП: диаметр

получаемого прутка 9 мм и обоими скоростями, а вот при диаметре 5 мм конечные точки влияния температуры незначительно отличаются.

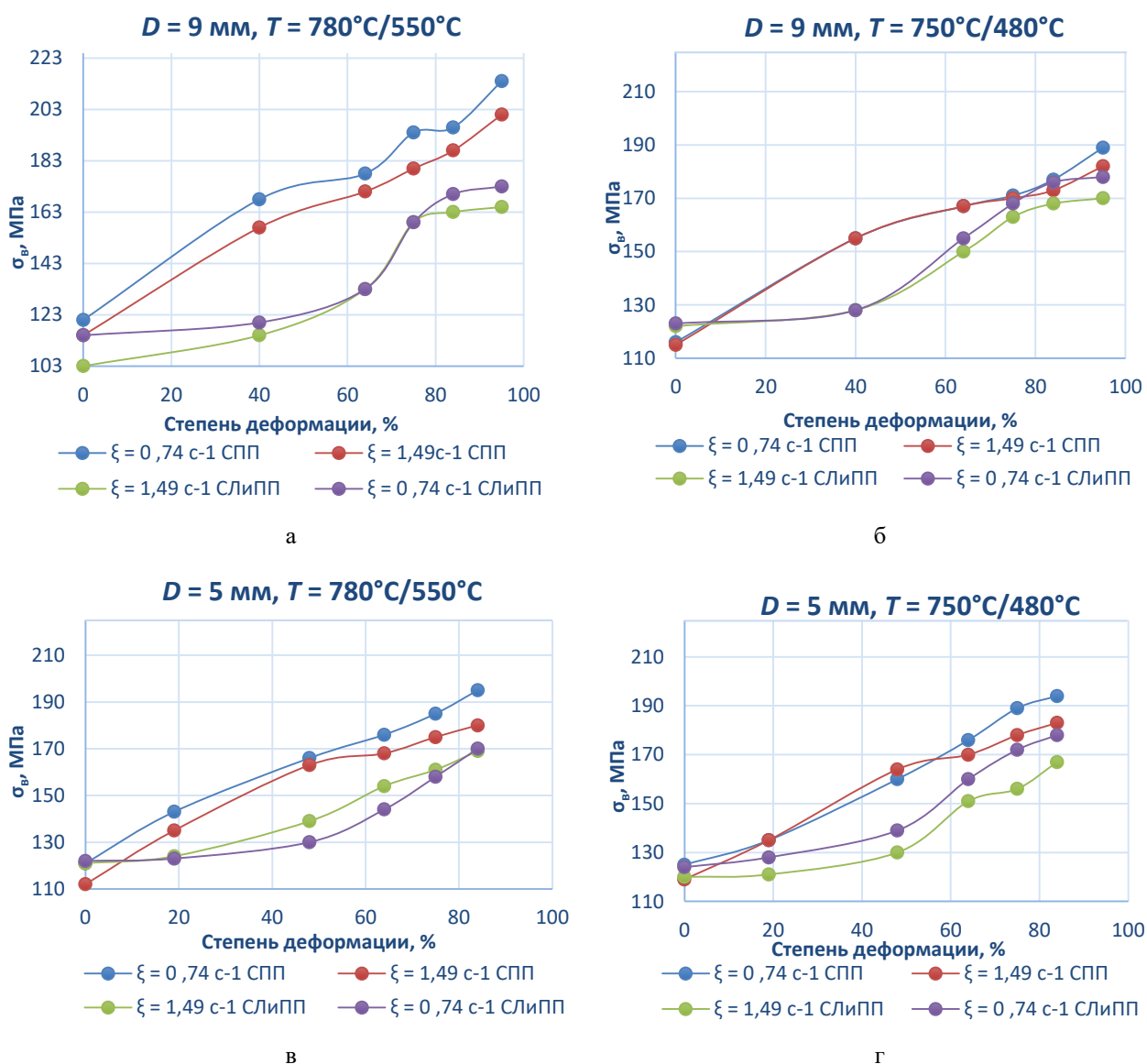
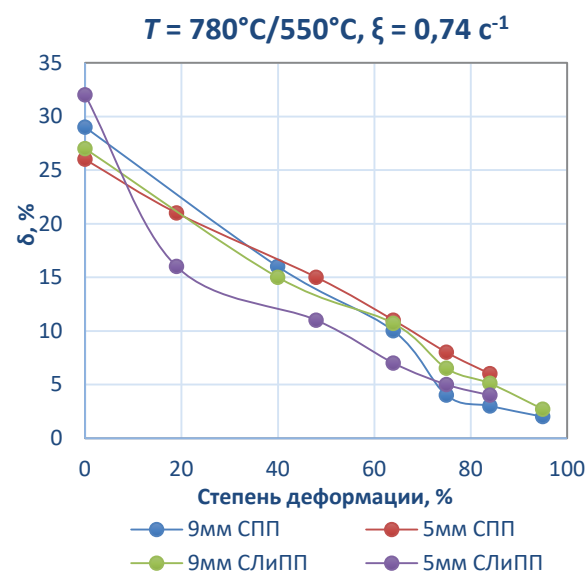


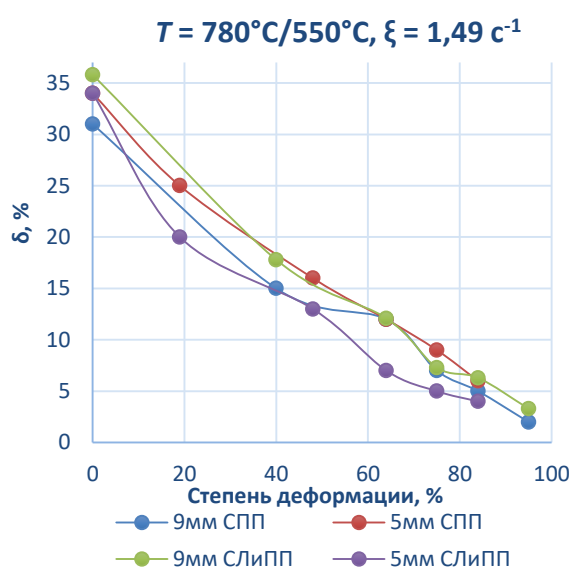
Рис. 4. Прочностные свойства прутков из сплава Al-0,5%РЗМ (сравнение по скорости деформации)
Fig. 4. Strength properties of rods from Al-0.5% REM alloy (compared by the strain rate)

Как видно из **рис. 4**, наибольшую разницу по значениям прочности между СПП и СЛиПП можно наблюдать на **рис. 4, а**. В результате холодного волочения происходит так называемый

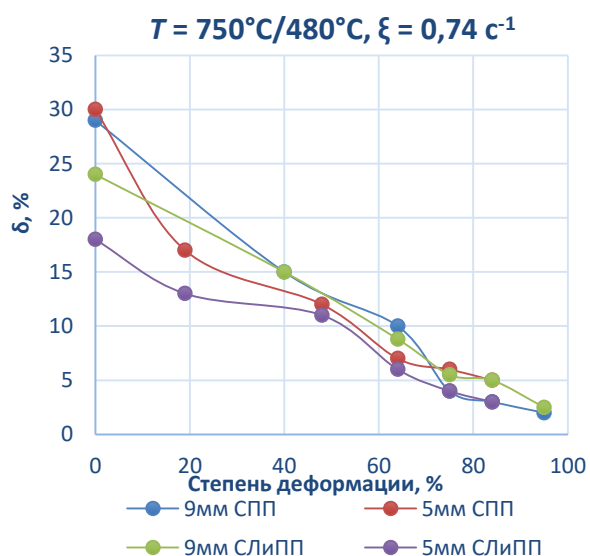
«наклеп» металла, то есть его упрочнение. Скорость деформации оказывает незначительное влияние на временное сопротивление разрыву (колебания значения σ_b составляют 1-10 МПа).



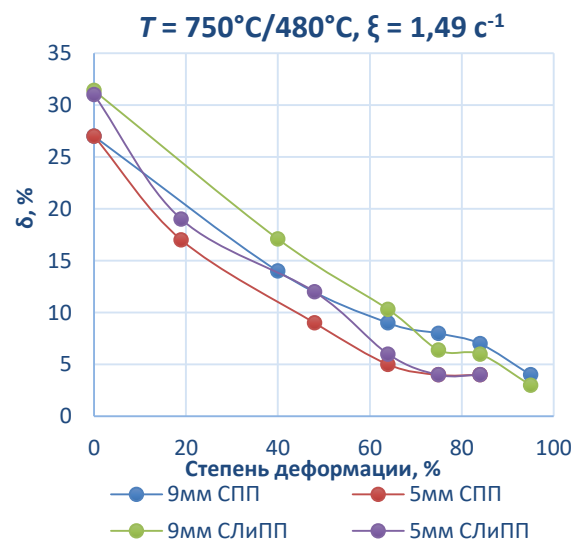
а



б



в



г

Рис. 5. Пластические свойства прутков из сплава Al-0,5%РЗМ (сравнение по коэффициенту вытяжки)
Fig. 5. Plastic properties of rods from Al-0.5% REM alloy (compared by the coefficient of elongation)

Как видно из **рис. 5**, наибольшей пластичностью обладают прутки при режиме обработки при $T = 780^{\circ}\text{C}$ (СЛПП) и $T = 550^{\circ}\text{C}$ (СПП), скорость $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$ (**рис. 5, б**). Однако хорошей пластичностью также обладают прутки при режиме обра-

ботки при $T = 780^{\circ}\text{C}$ (СЛПП) и $T = 550^{\circ}\text{C}$ (СПП) и скорость $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ (**рис. 5, а**). При сравнении можно сделать вывод, что они практически схожи по свойствам.

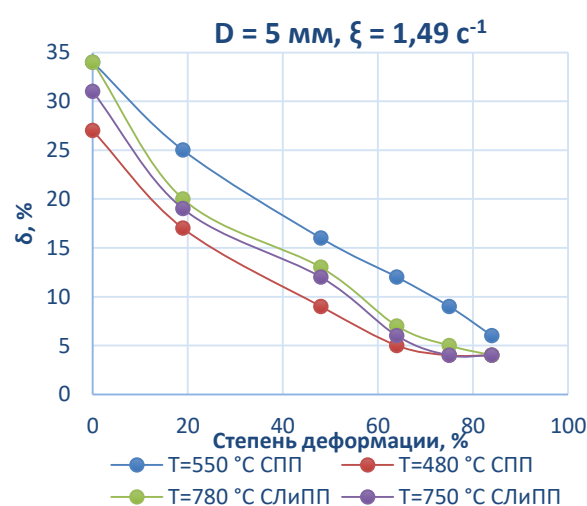
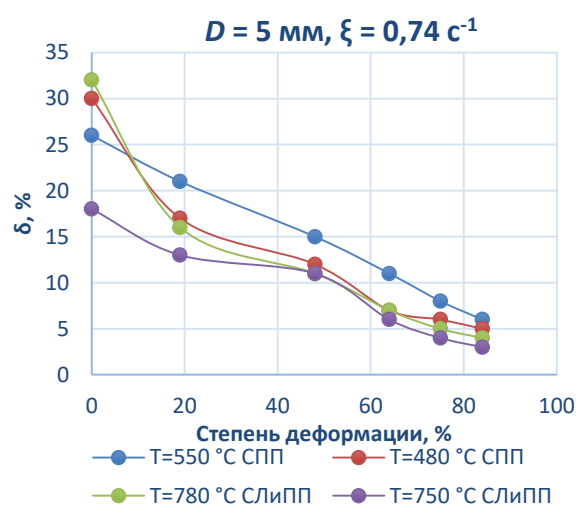
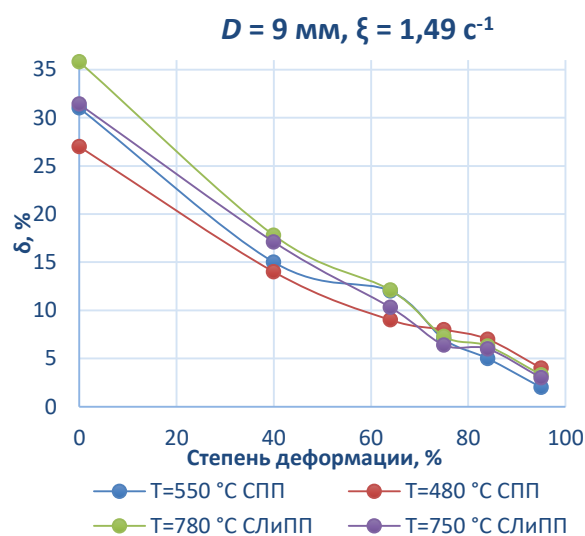
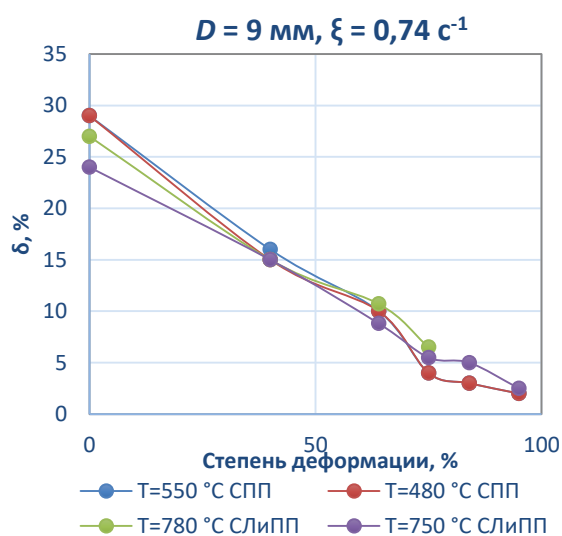


Рис. 6. Пластические свойства прутков из сплава Al-0,5%РЗМ (сравнение по температуре)
Fig. 6. Plastic properties of rods from Al-0.5% REM alloy (compared by temperature)

Как видно из **рис. 6**, наибольшей пластичностью обладают прутки при режиме обработки при $T = 780^\circ\text{C}$ (СЛПП) и диаметре прутка 9 мм при скорости $\xi = 1,49 \text{ с}^{-1}$ (**рис. 6, б**), высокая пла-

стичность также получается при $T = 550^\circ\text{C}$, диаметре 5 мм и скорости обработки $\xi = 1,49 \text{ с}^{-1}$ (**рис. 6, г**).

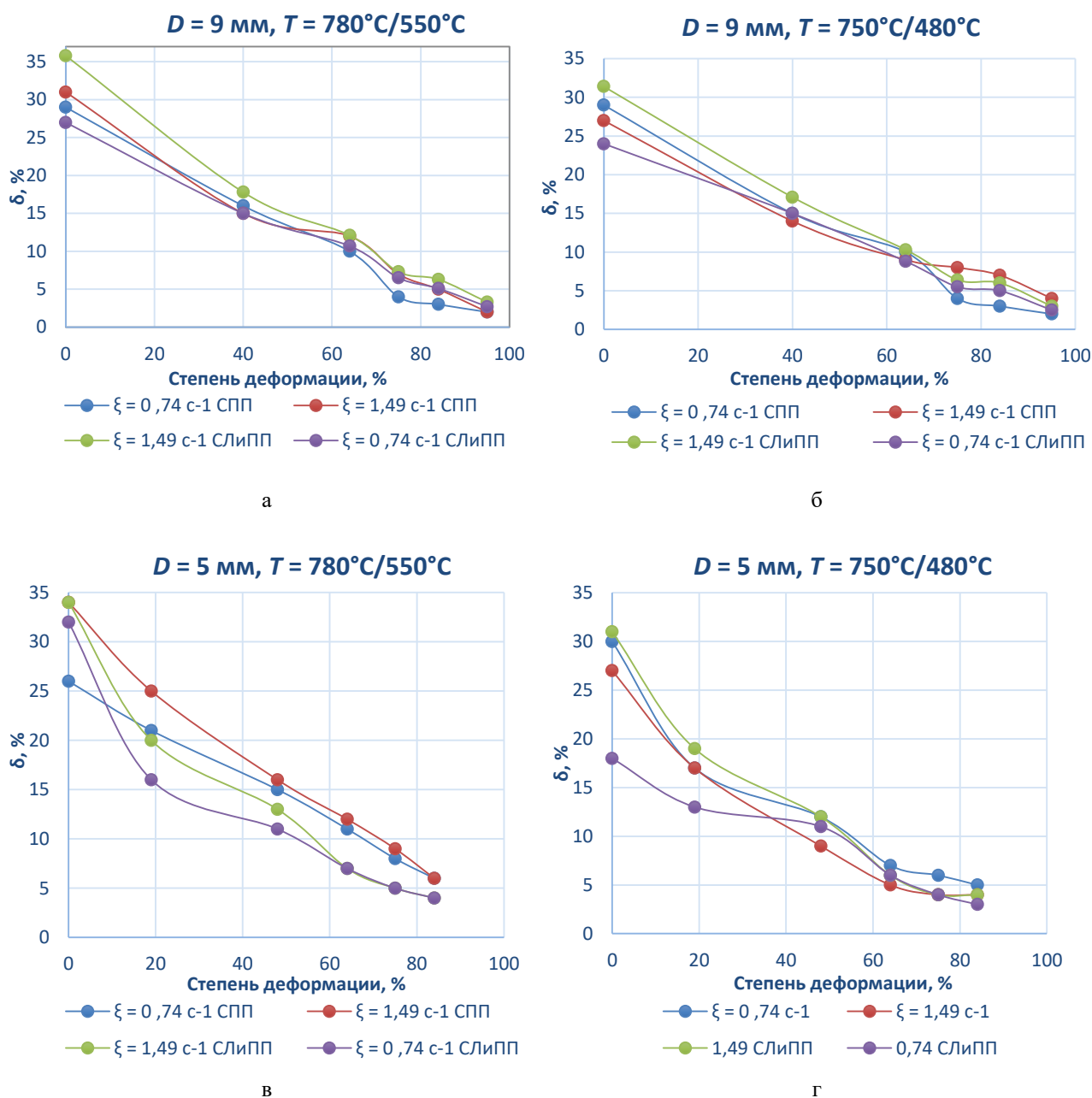


Рис. 7. Пластические свойства прутков из сплава Al-0,5%РЗМ (сравнение по скорости деформации)
 Fig. 7. Plastic properties of rods from Al-0.5% REM alloy (compared by the strain rate)

Как видно из **рис. 7**, наибольшей пластичностью обладают прутки при режиме обработки при $T = 780^\circ\text{C}$ (СЛПП) и диаметре прутка 9 мм (**рис. 7, а**). Скорость деформации оказывает су-

щественное влияние только на начальных этапах получения прутков (колебания значения δ составляют 10-15% (**рис. 7, б-г**)).

Следующим этапом было измерение электросопротивления прутков диаметром 9 и 5 мм и проволоки диаметром 2 мм согласно методике по ГОСТ 7229-76 с помощью омметра «Виток». Результаты замеров электросопротивления деформированных полуфабрикатов в зависимости от режимов обработки представлены в табл. 6.

Значения удельного электросопротивления варьировались от 0,02614 до 0,03413 Ом·мм²/м для прутков и от 0,02759 до 0,03059 Ом·мм²/м для проволоки диаметром 2 мм в зависимости от режимов обработки.

Заключение

Основные результаты исследования следующие:

1. Выполнены экспериментальные исследования по реализации процессов СЛиПП и СПП на экспериментальном сплаве системы Al-1% РЗМ при варьировании температуры обработки, скорости и степени деформации.

2. Проведен анализ силовых параметров процессов СЛиПП и СПП. Усилия на валках и

матрице ниже у процесса СЛиПП, что соответствует общепринятым законам ОМД. Усилия на валках не превышают 323 кН для процесса СПП и 279 кН для процесса СЛиПП. Усилия на матрице не превышают 206 кН для процесса СПП и 171 кН для процесса СЛиПП.

3. Проведена оценка зависимости механических свойств и представлены графические зависимости для деформированных полуфабрикатов, полученных методами СЛиПП и СПП, от варьируемых факторов в сравнении по температуре, коэффициенту вытяжки и скорости деформации. Следует отметить, что для получения проволоки диаметром 2 мм не потребовалось ни одного промежуточного отжига.

4. Исследованы значения удельного электрического сопротивления полученных методами СПП и СЛиПП прутков и проволоки из них. Значения удельного электросопротивления не превышают 0,03413 Ом·мм²/м для прутков и от 0,03059 Ом·мм²/м для проволоки диаметром 2 мм в зависимости от режимов обработки.

Таблица 6. Результаты измерения электросопротивления прутков и проволоки из сплава Al-1%РЗМ
Table 6. Measured electrical resistance of rods and wire from Al-1% REM alloy

Параметры		$T_{\text{распл}} = 750^{\circ}\text{C}/T_{\text{заг}} = 480^{\circ}\text{C}$				
		Ø, мм	9	2	5	2
		ε_{Σ} , %	0	95	0	84
ρ , Ом·мм ² /м	$\xi=0,74 \text{ с}^{-1}$ (4 об/мин)	СЛиПП	0,02614	0,02812	0,02835	0,02908
		СПП	0,03224	0,02788	0,02829	0,02896
	$\xi=1,49 \text{ с}^{-1}$ (8 об/мин)	СЛиПП	0,02659	0,0304	0,02838	0,02926
		СПП	0,03413	0,02807	0,02949	0,02789
Параметры		$T_{\text{распл}} = 780^{\circ}\text{C}/T_{\text{заг}} = 550^{\circ}\text{C}$				
		Ø, мм	9	2	5	2
		ε_{Σ} , %	0	95	0	84
ρ , Ом·мм ² /м	$\xi=0,74 \text{ с}^{-1}$ (4 об/мин)	СЛиПП	0,02536	0,02858	0,0285	0,02933
		СПП	0,03154	0,02798	0,02776	0,02842
	$\xi=1,49 \text{ с}^{-1}$ (8 об/мин)	СЛиПП	0,02602	0,03059	0,02854	0,02916
		СПП	0,03296	0,02759	0,02909	0,02761

Список источников

1. Czerwinski F. Cerium in aluminum alloys. *Journal of Materials Science*, 2020, vol. 55, no. 1, pp. 24-72. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03892-z>
2. Tukker A. Rare earth elements supply restrictions: Market failures, not scarcity, hamper their current use in high-tech applications. *Environ. Sci. Technol.*, 2014, no. 48, pp. 9973-9974. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es503548f>
3. Мировой рынок алюминия: тенденции развития, перспективы и ключевые проблемы / Чернавина Д.А., Чернавин Е.А., Фаллер А.В. и др. // Молодой ученый. 2018. №17. С. 206-210. <https://moluch.ru/archive/203/49838/>
4. Белый Д.И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий // Кабели и Провода. 2012. №1. С. 8-15.
5. Czerwinski F., Amirkhiz B.S. On the Al-Al₁₁Ce₃ eutectic transformation in aluminum-cerium binary alloys. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 20, p. 4549. <https://doi.org/10.3390/ma13204549>
6. Czerwinski F. Critical Assessment 36: Assessing differences between the use of cerium and scandium in aluminium alloying. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 2020, vol. 36, no. 3, pp. 255-263. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02670836.2019.1702775>
7. Belov N.A., Korotkova N.O., Akopyan T.K., Timofeev V.N. Structure and Properties of Al-0.6%Zr-0.4%Fe-0.4%Si (wt.%) Wire Alloy Manufactured by Electromagnetic Casting. 2020, vol. 72, no. 4, pp. 1561-1570. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03875-0>
8. Liao H., Liu Y., Lü C., Wang Q. Mechanisms for Ce-induced remarkable improvement of conductivity in Al alloys. *Journal of Materials Research*, 2017, vol. 32, no. 3, pp. 566-574. <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-materials-research/article/abs/mechanisms-for-ceinduced-remarkable-improvement-of-conductivity-in-al-alloys/9DD686C179F53B383C0A1E17B2527FB4#>
9. Shi Z.M., Gao K., Shi Y.T., Wang Y. Microstructure and mechanical properties of rare-earth-modified Al-1Fe binary alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, no. 632, pp. 62-71. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509315001963>
10. Zhang Meng, Wang Haoyu, Han Wei, Zhang Milin, Li Yunna, Wang Yanli, Xue Yun, Ma Fuqiu, Zhang Xingmei. Electrochemical extraction of cerium and formation of Al-Ce alloy from CeO₂ assisted by AlCl₃ in LiCl-KCl melts. *Sci China Chem*, 2014, vol. 57, no. 11, pp. 1477-1482. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11426-014-5214-8>
11. Mogucheva A., Zyabkin D., Kaibyshev R. Effect of the thermomechanical processing on microstructure and properties of an Al-Ce alloy. *Materials Science Forum*, 2012, no. 706-709, pp. 361-366. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.361>
12. Belov N.A., Alabin A.N., Teleuova A.R. Comparative analysis of alloying additives as applied to the production of heat-resistant aluminum-base wires. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 53, no. 9-10, pp. 455-459. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11041-012-9415-5>
13. Zhang Yu., Wei F., Mao J., Niu G. The difference of La and Ce as additives of electrical conductivity aluminum alloys. *Materials Characterization*, 2019, no. 158, p. 109963. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1044580319312847?via%3Dihub>
14. Zhu R., Su Y., Qin X., Hu N., Lu L. Effect of rare earth elements on the microstructure and properties of a die-cast aluminum alloy. *Materialpruefung / Materials Testing*, 2019, vol. 61, no. 2, pp. 159-163. <https://doi.org/10.3139/120.111299>
15. He Ya., Liu J., Qiu Sh., Deng Zh., Zhang J., Shen Ya. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-La alloys with varying La contents. *Mater. Sci. Eng. A*, 2017, no. 701, pp. 134-142. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509317307876>
16. Yang Q., Bu F.Q., Meng F.C., Qiu X., Zhang D.P., Zheng T., Liu X.J., Meng J. The improved effects by the combinative addition of lanthanum and samarium on the microstructures and the tensile properties of high-pressure die-cast Mg-4Al-based alloy. *Mater. Sci. Eng. A*, 2015, no. 628, pp. 319-326. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509315000660>
17. Jiang W., Fan Z., Dai Y., Li C. Effects of rare earth elements addition on microstructures, tensile properties and fractography of A357 alloy. *Mater. Sci. Eng. A*, 2014, no. 597, pp. 237-244. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509314000264>
18. Huang X., Yan H. Effect of trace La addition on the microstructure and mechanical property of as-cast ADC12 Al-Alloy. *J. Wuhan Univ. Technol.-Materials Sci. Ed.*, 2013, no. 28, pp. 202-205.
19. Ye W., Yan X., Zhang X., Liu E., Liu C., Di C., Miao Y. Effects of Trace Cerium on As-cast Microstructure and Electrical Conductivity of Industrial Pure Aluminum. *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin / Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2019, vol. 39, no. 10, pp. 1149-1151. DOI: 10.15980/j.tzzz.2019.10.027
20. Sidelnikov S.B., Galiev R.I., Bersenev A.S., Voroshilov D.S. Application and Research Twin Roll Casting-Extruding Process for Production Longish Deformed Semi-Finished Products from Aluminum Alloys. *Materials Science Forum*, 2018, no. 918, pp. 13-20. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.918.13>
21. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.
22. Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Motkov M.M., Timofeev V.N., Konstantinov I.L., Dovzhenko N.N., Lopatina E.S., Bepalov V.M., Sokolov R.E., Mansurov Yu.N., Voroshilova M.V. Investigation structure and properties of wire from the alloy of Al-REM system obtained with the application of casting in the

- electromagnetic mold, combined rolling-extruding, and drawing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, no. 114, pp. 2633-2649. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07054-x>
23. Sidelnikov S., Voroshilov D., Motkov M., Bepalov V., Voroshilova M. Experimental and analytical assessment of the power parameters of the combined rolling-extruding process using a round billet from alloy 01417 obtained using an electromagnetic mold. *Key Engineering Materials*, 2021, no. 887, pp. 300-305. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.300>
 24. Sidelnikov S., Voroshilov D., Motkov M., Voroshilova M., Bepalov V. Development of Combined Machining Modes, Investigation of Mechanical Properties and Structure of Deformed Semi-Finished Products from Alloy 01417. *Materials Science Forum*, 2020, no. 992, pp. 498-503. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.498>
 25. Sidelnikov S., Sokolov R., Voroshilov D., Motkov M., Bepalov V., Voroshilova M., Sokolova S., Rudnitskiy E., Lebedeva O., Borisyuk V. Modeling the Process of Obtaining Bars from Aluminum Alloy 01417 by Combined Rolling-Extruding Method with Application of the Deform-3D Complex. *Key Engineering Materials*, 2020, no. 861, pp. 540-546. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.861.540>
 26. Разработка и исследование технологии получения проволоки из сплава Al-PЗМ с применением совмещенной обработки / Сидельников С.Б., Ворошилов Д.С., Первухин М.В. и др. // Цветные металлы. 2019. №9. С. 63-68. <https://www.rudmet.ru/journal/1853/article/31547/>
- ### References
1. Czerwinski F. Cerium in aluminum alloys. *Journal of Materials Science*. 2020;55(1):24-72. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03892-z>
 2. Tukker A. Rare earth elements supply restrictions: Market failures, not scarcity, hamper their current use in high-tech applications. *Environ. Sci. Technol.* 2014;(48):9973-9974. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es503548f>
 3. Chernavina D.A., Chernavin E.A., Faller A.V. et al. The global aluminum market: development trends, prospects and key problems. *Molodoy ucheny* [Young Scientist]. 2018;(17):206-210. <https://moluch.ru/archive/203/49838/> (In Russ.)
 4. Belyi D.I. Aluminum alloys for current-carrying conductors of cable products. *Kabeli i provoda* [Cables and Wires]. 2012;(1):8-15. (In Russ.)
 5. Czerwinski F., Amirkhiz B.S. On the Al-Al₁₁Ce₃ eutectic transformation in aluminum-cerium binary alloys. *Materials*. 2020;13(20):4549. <https://doi.org/10.3390/ma13204549>
 6. Czerwinski F. Critical Assessment 36: Assessing differences between the use of cerium and scandium in aluminium alloying. *Materials Science and Technology* (United Kingdom). 2020;36(3):255-263. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02670836.2019.1702775>
 7. Belov N.A., Korotkova N.O., Akopyan T.K., Timofeev V.N. Structure and properties of Al-0.6%Zr-0.4%Fe-0.4%Si (wt.%) wire alloy manufactured by electromagnetic casting. *JOM*. 2020;72(4):1561-1570. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03875-0>
 8. Liao H., Liu Y., Lü C., Wang Q. Mechanisms for Ce-induced remarkable improvement of conductivity in Al alloys. *Journal of Materials Research*. 2017;32(3):566-574. <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-materials-research/article/abs/mechanisms-for-ceinduced-remarkable-improvement-of-conductivity-in-al-alloys/9DD686C179F53B383C0A1E17B2527FB4#>
 9. Shi Z.M., Gao K., Shi Y.T., Wang Y. Microstructure and mechanical properties of rare-earth-modified Al-1Fe binary alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;(632):62-71. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509315001963>
 10. Zhang Meng, Wang Haoyu, Han Wei, Zhang Milin, Li Yunna, Wang Yanli, Xue Yun, Ma Fuqiu, Zhang Xingmei. Electrochemical extraction of cerium and formation of Al-Ce alloy from CeO₂ assisted by AlCl₃ in LiCl-KCl melts. *Sci. China Chem*. 2014;57(11):1477-1482. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11426-014-5214-8>
 11. Mogucheva A., Zyabkin D., Kaibyshev R. Effect of the thermomechanical processing on microstructure and properties of an Al-Ce alloy. *Materials Science Forum*. 2012;(706-709):361-366. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.361>
 12. Belov N.A., Alabin A.N., Teleuova A.R. Comparative analysis of alloying additives as applied to the production of heat-resistant aluminum-base wires. *Metal Science and Heat Treatment*. 2012;53(9-10):455-459. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11041-012-9415-5>
 13. Zhang Yu., Wei F., Mao J., Niu G. The difference of La and Ce as additives of electrical conductivity aluminum alloys. *Materials Characterization*. 2019;(158):109963. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1044580319312847?via%3Dihub>
 14. Zhu R., Su Y., Qin X., Hu N., Lu L. Effect of rare earth elements on the microstructure and properties of a die-cast aluminum alloy. *Materialprüfung / Materials Testing*. 2019;61(2):159-163. <https://doi.org/10.3139/120.111299>
 15. He Ya., Liu J., Qiu Sh., Deng Zh., Zhang J., Shen Ya. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-La alloys with varying La contents. *Mater. Sci. Eng. A*. 2017;(701):134-142. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509317307876>
 16. Yang Q., Bu F.Q., Meng F.C., Qiu X., Zhang D.P., Zheng T., Liu X.J., Meng J. The improved effects by the combinative addition of lanthanum and samarium on the microstructures and the tensile properties of high-pressure die-cast Mg-4Al-based alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2015;(628):319-326. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509315000660>

17. Jiang W., Fan Z., Dai Y., Li C. Effects of rare earth elements addition on microstructures, tensile properties and fractography of A357 alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2014;(597):237-244. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509314000264>
18. Huang X., Yan H. Effect of trace La addition on the microstructure and mechanical property of as-cast ADC12 Al-Alloy. *J. Wuhan Univ. Technol.-Materials Sci. Ed.* 2013;(28):202-205.
19. Ye W., Yan X., Zhang X., Liu E., Liu C., Di C., Miao Y. Effects of trace cerium on as-cast microstructure and electrical conductivity of industrial pure aluminum. *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Nonferrous Alloys*. 2019;39(10):1149-1151. DOI: 10.15980/j.tzzz.2019.10.027.
20. Sidelnikov S.B., Galiev R.I., Bersenev A.S., Voroshilov D.S. Application and research twin roll casting-extruding process for production longish deformed semi-finished products from aluminum alloys. *Materials Science Forum*. 2018;(918):13-20. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.918.13>
21. Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Zagirov N.N. *Kombinirovannye i sovmeshchennye metody obrabotki tsvetnykh metallov i splavov: monografiya* [Combined and integrated methods of processing non-ferrous metals and alloys: monograph]. Moscow: MAKSS Press, 2005, 344 p. (In Russ.)
22. Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Motkov M.M., Timofeev V.N., Konstantinov I.L., Dovzhenko N.N., Lopatina E.S., Bespalov V.M., Sokolov R.E., Mansurov Yu.N., Voroshilova M.V. Investigation structure and properties of wire from the alloy of Al-REM system obtained with the application of casting in the electromagnetic mold, combined rolling-extruding, and drawing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;(114):2633-2649. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07054-x>
23. Sidelnikov S., Voroshilov D., Motkov M., Bespalov V., Voroshilova M. Experimental and analytical assessment of the power parameters of the combined rolling-extruding process using a round billet from alloy 01417 obtained using an electromagnetic mold. *Key Engineering Materials*. 2021;(887):300-305. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.300>
24. Sidelnikov S., Voroshilov D., Motkov M., Voroshilova M., Bespalov V. Development of combined machining modes, investigation of mechanical properties and structure of deformed semi-finished products from alloy 01417. *Materials Science Forum*. 2020;(992):498-503. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.498>
25. Sidelnikov S., Sokolov R., Voroshilov D., Motkov M., Bespalov V., Voroshilova M., Sokolova S., Rudnitskiy E., Lebedeva O., Borisyuk V. Modeling the process of obtaining bars from aluminum alloy 01417 by combined rolling-extruding method with application of the Deform-3D complex. *Key Engineering Materials*. 2020;(861):540-546. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.861.540>
26. Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Pervukhin M.V. et al. Development and research of technology for producing electrotechnical wire from alloys of the Al – REM system, obtained with the application of combined machining methods. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 2019;(9):63-68. <https://www.rudmet.ru/journal/1853/article/31547/> (In Russ.)

Поступила 09.06.2023; принята к публикации 05.07.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 09/06/2023; revised 05/07/2023; published 25/09/2023

Ворошилов Денис Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой ОМД, старший научный сотрудник лаборатории физикохимии металлургических процессов и материалов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: d.s.voroshilov@gmail.com. ORCID 0000-0002-1406-3665

Лебедева Ольга Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры ОМД, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: lebedewa-olya@mail.ru.

Беспалова Диана Дмитриевна – инженер-исследователь лаборатории низкоуглеродной металлургии и энергетики, магистрант кафедры ОМД, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: dianarechkunova@mail.ru.

Дурнопыанова Анастасия Сергеевна – магистрант кафедры ОМД, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: a.durnopyanov@yandex.ru.

Бернгардт Виктор Александрович – аспирант кафедры ОМД, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; инженер-исследователь ООО «РУСАЛ ИТЦ», Красноярск, Россия.
Email: berngardt19@mail.ru. ORCID 0009-0005-9747-5241

Ворошилова Марина Владимировна – старший преподаватель кафедры ОМД, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: aniram1988@yandex.ru. ORCID 0000-0001-9411-0662

Denis S. Voroshilov – PhD (Eng.), Head of the Metal Forming Department, Senior Researcher of the Laboratory of Physical Chemistry of Metallurgical Processes and Materials, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: d.s.voroshilov@gmail.com. ORCID 0000-0002-1406-3665

Olga S. Lebedeva – PhD (Eng.), Associate Professor of the Metal Forming Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: lebedewa-olya@mail.ru.

Diana D. Bespalova – Research Engineer of the Laboratory of Low-Carbon Metallurgy and Power Industry, master's student of the Metal Forming Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: dianarechkunova@mail.ru.

Anastasiya S. Durnopyanova – master's student of the Metal Forming Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: a.durnopyanov@yandex.ru.

Viktor A. Berngardt – postgraduate student of the Metal Forming Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Research Engineer of LLC RUSAL ETC, Krasnoyarsk, Russia.
Email: berngardt19@mail.ru. ORCID 0009-0005-9747-5241

Marina V. Voroshilova – Senior Lecturer of the Metal Forming Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: aniram1988@yandex.ru. ORCID 0000-0001-9411-0662

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

УДК 620.186

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-78-88



ПОЛУЧЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА RS-356 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ДЕФОРМАЦИИ

Во Фан Тхань Дат, Петров П.А., Бурлаков И.А.,
Фам Ван Нгок, Нгуен Хань Тоан, Гневашев А.А.

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Аннотация. В статье приведены результаты сравнительного анализа применения реологических моделей с 5-ю и 9-ю коэффициентами, основанных на эмпирической формуле Хензеля-Шпиттеля. Исследуемый материал – новый алюминиевый сплав RS-356 (Al – 92,58; Si – 6,83; Mg – 0,29; Mn – 0,002; Fe – 0,14; Ti – 0,15; Cu – 0,002; Zn – 0,003), заготовки из которого формируются методом селективного лазерного сплавления. Значения неизвестных коэффициентов определены за счет проведения натурного и вычислительного экспериментов – реализован метод решения обратной задачи, а также применения оригинальной методики обработки результатов натурного эксперимента. Натурный эксперимент проведен методом испытания цилиндрических образцов исследуемого сплава RS-356 на сжатие в диапазоне температур от 20 до 450°C при постоянных скоростях деформации 0,001, 0,01 и 0,4 с⁻¹. Образцы диаметром 10 мм и высотой 10 мм получены методом электроэрозии из заготовок сплава RS-356. Вычислительный эксперимент выполнен с применением программного комплекса QFORM, значения неизвестных коэффициентов в реологических моделях – программы Matlab. Точность определения значений коэффициентов в каждой из полученных моделей оценивается по коэффициенту детерминации R^2 . Так, для модели с 9-ю коэффициентами $R^2 = (0,95-0,97)$ в зависимости от температурного интервала. Установленные зависимости с 9-ю коэффициентами для описания реологических свойств сплава RS-356 обеспечивают точность прогнозирования силовых параметров при моделировании процесса пластической деформации в пределах 5% и могут быть применены при компьютерном моделировании операций обработки давлением для температурного интервала 20-450°C и скоростей деформации 0,001, 0,01 и 0,4 с⁻¹.

Ключевые слова: алюминиевый сплав RS-356, испытание на сжатие, реологическая модель Хензеля-Шпиттеля, кривая текучести, модель сопротивления деформации

© Во Фан Тхань Дат, Петров П.А., Бурлаков И.А., Фам Ван Нгок, Нгуен Хань Тоан, Гневашев А.А., 2023

Для цитирования

Получение реологических моделей алюминиевого сплава RS-356 при различных режимах деформации / Во Фан Тхань Дат, Петров П.А., Бурлаков И.А., Фам Ван Нгок, Нгуен Хань Тоан, Гневашев А.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 78-88. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-78-88>



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

OBTAINING RHEOLOGICAL MODELS OF ALUMINUM ALLOY RS-356 UNDER VARIOUS DEFORMATION MODES

Vo Phan Thanh Dat, Petrov P.A., Burlakov I.A.,
Pham Van Ngoc, Nguyen Khanh Toan, Gnevashev A.A.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents a comparative analysis of the use of rheological models with 5 and 9 coefficients based on the Hensel-Spittel empirical formula. The material under study is a new aluminum alloy, RS-356 (Al – 92.58; Si – 6.83; Mg – 0.29; Mn – 0.002; Fe – 0.14; Ti – 0.15; Cu – 0.002; Zn – 0.003), workpieces from which are formed by selective laser melting. The values of the unknown coefficients were determined by carrying out full-scale and computational experiments, namely a method for solving the inverse problem, as well as using an original method for processing the results of the full-scale experiment. The full-scale experiment was carried out by testing cylindrical specimens of alloy RS-356 under study for compression in the temperature range from 20 to 450 °C at constant strain rates of 0.001, 0.01 and 0.4 s⁻¹. The specimens with a diameter of 10 mm and a height of 10 mm were produced by electroerosion from workpieces of the RS-356 alloy. The computational experiment was carried out using the QFORM software package; values of unknown coefficients in rheological models – applying Matlab software. Accuracy of the values of the coefficients in each of the obtained models is estimated by coefficient of determination R^2 . So, regarding a model with 9 coefficients, $R^2 = (0.95-0.97)$ depending on the temperature interval. The established dependencies with 9 coefficients for describing the rheological properties of RS-356 provide accuracy of predicting force parameters, when modeling the plastic deformation process within 5% and can be used in computer modeling of metal forming operations for a temperature range of 20-450 °C and strain rates of 0.001, 0.01 and 0.4 s⁻¹.

Keywords: RS-356 aluminum alloy, compression test, Hensel-Spittel rheological model, yield curve, deformation stress model

For citation

Vo Phan Thanh Dat, Petrov P.A., Burlakov I.A., Pham Van Ngoc, Nguyen Khanh Toan, Gnevashev A.A. Obtaining Rheological Models of Aluminum Alloy RS-356 under Various Deformation Modes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 78-88. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-78-88>

Введение

Обработка алюминиевых сплавов под давлением может быть сложной операцией из-за ряда факторов. Высоколегированные алюминиевые сплавы склонны при деформации к трещинообразованию вследствие низкой пластичности. Образованию дефектов в виде трещин способствует наличие таких примесей, как кислород, водород, железо, кремний [1]. Кроме того, температурные условия и давление, используемые при обработке алюминиевых сплавов, должны быть тщательно контролируемыми, чтобы обеспечить желаемую микроструктуру и механические свойства. С целью преодоления этих проблем используются различные технические приемы, такие как использование добавок, предварительные подготовительные процессы и точный контроль параметров обработки [2]. Также может использоваться охлаждение во время обработки для уменьшения температуры металла и замедления реакций, которые могут вызывать повреждения. В зависимости от применяемых технологий и условий ре-

зультаты обработки могут значительно различаться. Поэтому важно выбирать технологические параметры, обеспечивающие получение желаемых свойств и качества продукта. Обеспечение таких параметров возможно только при наличии реологических зависимостей материалов, позволяющих максимально точно моделировать процесс формообразования заготовок [3-5].

Целью настоящей статьи является получение реологических моделей алюминиевого сплава RS-356 (AlSi7Mg) с 5-ю и 9-ю неизвестными коэффициентами и определение рациональной области их использования.

Материалы и методы исследования

В качестве исследуемого материала рассматривается порошковый алюминиевый сплав RS-356. (химический состав, % (вес): Al – 92,58; Si – 6,83; Mg – 0,29; Mn – 0,002; Fe – 0,14; Ti – 0,15; Cu – 0,002; Zn – 0,003 [6]), обладающий хорошими литейными свойствами и высокой производительностью при селективном лазерном сплавлении; является аналогом литейных алю-

миниевых сплавов системы Al-Si.

Сплав RS-356, разработанный компанией ОК «РУСАЛ», производится в соответствии с ТУ 24.42.00-002-44669951-2019; исходное состояние поставки – порошок, предназначенный для аддитивного производства по технологии аддитивного лазерного сплавления (SLM).

Для получения реологической модели были применены цилиндрические образцы диаметром и высотой 10 мм, изготовленные методом электроэрозии из заготовок сплава RS-356, полученных по технологии SLM.

Испытания на сжатие провели с помощью универсальных испытательных машин моделей LFM250 (при температуре 20°C) и LFM50 (при температурах 300, 400 и 450°C). При проведении испытаний технологическая смазка не используется; фактор трения, в случае применения при компьютерном моделировании модели трения А.Н. Леванова, принимается равным 0,8-1,0. Допущение о максимальном трении на контактной поверхности принимается для сохранения граничных температурных условий в каждом испытании; добавление при температуре выше 20°C на контактную поверхность смазки приводит к нарушению граничных температурных условий. На этапе обработки результатов испытаний учитывается влияние контактного трения на сопротивление деформации в соответствии с рекомендациями, представленными в работах [7, 8]. Деформация осуществлялась со скоростями 0,001, 0,01 и 0,4 с⁻¹. Постоянство скорости деформации обеспечивалось путем управления скоростью перемещения траверсы испытательной машины в соответствии с формулой [9]:

$$S_i = h_0 - \exp(-\dot{\epsilon}_i \cdot t) \cdot h_0, \quad (1)$$

где S_i – перемещение траверсы испытательной машины, мм; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, с⁻¹; t – время, с; h_0 – исходная высота образца исследуемого материала, мм.

Более подробные сведения о методике обработки экспериментальных данных об испытаниях на сжатие представлены в работе [9].

Полученные результаты и их обсуждение

Полученные испытанием на сжатие зависимости напряжения текучести от величины и скорости деформации при различных температурах показаны на рис. 1 [9].

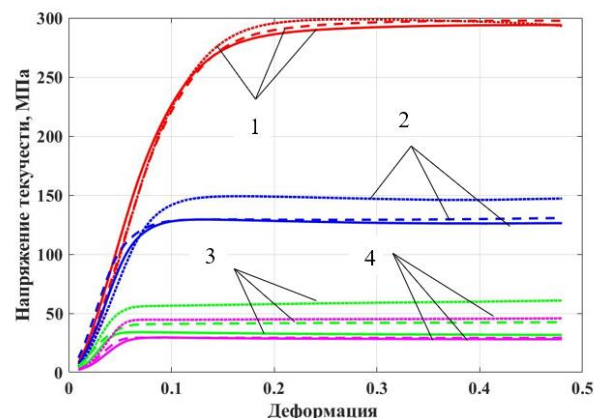


Рис. 1. Экспериментальные зависимости напряжения текучести сплава RS-356 от деформации при различных температурно-скоростных режимах деформации: 1 – 20°C; 2 – 300°C; 3 – 400°C; 4 – 450°C

Fig. 1. Experimental dependences between yield stress of RS-356 and deformation at various temperatures and rates of strain: 1 is 20°C; 2 is 300°C; 3 is 400°C; 4 is 450°C

— — 0,001 с⁻¹; — — — 0,01 с⁻¹; ······ — 0,4 с⁻¹

При температуре испытания 20°C наблюдалось образование трещин на поверхности сжимаемых образцов при достижении накопленной (логарифмической) деформации $\epsilon = 0,45 - 0,48$ (табл. 1). В диапазоне температур от 300 до 450°C деформация ϵ образцов сжатием на величину 0,31-0,62 не приводит к появлению трещин. Учитывая особенности пластического деформирования сплава RS-356, необходимость создания реологической модели материала в широком диапазоне значений температуры, а также ярко выраженный горизонтальный участок на кривых текучести (см. рис. 1), кривые текучести строили до $\epsilon = 0,48$. Для некоторых образцов (см. табл. 1) применяли экстраполяцию до большего значения деформации.

В табл. 1 показан внешний вид (форма боковой поверхности) образцов порошкового алюминиевого сплава RS-356 после сжатия в различных температурно-скоростных режимах.

В практике построения математической модели сопротивления деформации для аппроксимации экспериментальных кривых «напряжение текучести – деформация», отражающих зависимость напряжения текучести от термомеханических параметров – температуры, деформации и скорости деформации, применяют одну из математических зависимостей, например, в виде степенной или экспоненциальной функции либо в виде зависимости, основанной на методе термомеханических коэффициентов [10].

Таблица 1. Внешний вид образцов порошкового алюминиевого сплава RS-356 после сжатия
Table 1. Appearance of RS-356 powder aluminum alloy specimens after compression

Номер образца	Фото образца после испытания на сжатие	Температура образца, °C	Величина деформации ϵ	Скорость деформации $\dot{\epsilon}$, с ⁻¹
1		20	0,48	0,001
2		20	0,45	0,01
3		20	0,48	0,4
4		300	0,56	0,001
5		300	0,46	0,01
6		300	0,31	0,4
7		400	0,46	0,001
8		400	0,34	0,01
9		400	0,48	0,4
10		450	0,63	0,001
11		450	0,62	0,01
12		450	0,54	0,4

В первую очередь рассмотрена эмпирическая модель Хензеля-Шпиттеля с 9-ю неизвестными коэффициентами, определяющая зависимость напряжения текучести от термомеханических параметров. Математическое представление данной модели может быть выражено формулой (2) [11]. Неизвестные коэффициенты определяются из решения задачи регрессии с применением результатов проведенных экспериментальных испытаний (см. **рис. 1** и **табл. 1**):

$$\sigma_i = A \exp(m_1 T) T^{m_2} \epsilon_i^{m_3} \exp(m_4 / \epsilon_i) (1 + \epsilon_i)^{m_5 T} \times \exp(m_7 \epsilon_i) \dot{\epsilon}_i^{m_3} \dot{\epsilon}_i^{m_6 T}, \quad (2)$$

где A , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 , m_5 , m_7 , m_8 , m_9 – неизвестные коэффициенты.

Для решения задачи регрессии составлена программа в среде Matlab, в которой использована функция «lsqcurvefit» из библиотеки Matlab, реализующая метод Левенберга-Маркардта [12]. Данный метод обеспечивает поиск значений коэффициентов, которые представлены в **табл. 2**.

Таблица 2. Значения коэффициентов в формуле (2) для алюминиевого сплава RS-356 [12]
 Table 2. Coefficients in formula (2) for aluminum alloy RS-356 [12]

Тип деформации	A	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_7	m_8	m_9
20-300°C	214,042	-0,0021	-0,3945	0,003	-0,0994	-0,0028	0,3474	$6,77 \cdot 10^{-5}$	0,0501
400-450°C	10,597	-0,0086	-0,082	0,3438	-0,0204	-0,0026	0,8587	-0,0006	0,8813

Сравнение результатов расчета напряжений текучести по формуле (2) с экспериментальными данными показано на **рис. 2**. В качестве критерия оценки точности модели выбрана величина:

- средней абсолютной ошибки S :

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\sigma_i - \bar{\sigma}_i|}{|\sigma_i|} \cdot 100\%; \quad (3)$$

- коэффициента детерминации R^2 :

$$SE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma}_i)^2;$$

$$SE_{\text{сред}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{\text{сред}})^2; \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SE}{SE_{\text{сред}}},$$

где n – объем выборки; σ_i – k -е экспериментальное значение напряжения текучести, полученное в эксперименте при деформации ε_{ik} и фиксированном значении скорости деформации $\dot{\varepsilon}_i$ и температуры T_i ; $\bar{\sigma}_i$ – k -е расчетное значение напряжения текучести, полученное по формуле (2) с учетом значений коэффициентов (см. **табл. 2**); $\sigma_{\text{сред}}$ – среднее арифметическое значение напряжения текучести по полученным в эксперименте данным.

Второй показатель для оценки качества математической модели представлен формулой (4) и позволяет оценить, какая доля дисперсии может быть предсказана моделью в известных экспериментальных данных. Считается, что при R^2 , принимающем значение от 0,8 до 1,0, математическая модель хорошего качества.

Сравнительный анализ результатов расчета и эксперимента позволил оценить значения ошибки S для моделей с 9-ю неизвестными коэффициентами (см. **рис. 2**). В среднем ошибка S в

диапазоне температур 20-300°C не превышает 6,9%, в диапазоне температур 400-450°C – 9,7%. Значения коэффициента детерминации R^2 в диапазоне температур 20-300°C – 0,97, в диапазоне температур 400-450°C – 0,95. Полученная модель позволяет достаточно точно прогнозировать возникающие напряжения в зависимости от скорости и величины деформации (см. **рис. 2**).

В качестве второй математической модели была выбрана модель Хензеля-Шпиттеля с 5-ю неизвестными коэффициентами, которая может быть выражена формулой [11]

$$\sigma_i = A \varepsilon_i^{m_2} \exp(-m_4 \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^{m_3} \exp(-m_1 T), \quad (5)$$

где A , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 – неизвестные коэффициенты.

Формула (5) решается аналогично формуле (2). Найденные коэффициенты приведены в **табл. 3**.

Результаты эксперимента и расчета моделей с 5-ю неизвестными коэффициентами показаны на **рис. 3**. В среднем ошибка S в диапазоне температур 20-300°C не превышает 14,2%, в диапазоне температур 400-450°C – 11,7%. Значения коэффициента детерминации R^2 в диапазоне температур 20-300°C – 0,96, в диапазоне температур 400-450°C – 0,92. Эти результаты показывают, что полученная модель обеспечивает достаточно хорошую точность прогнозирования силовых параметров.

Сравнение кривых текучести, построенных по результатам расчетов напряжения текучести по формулам (2) и (5), с учетом значений коэффициентов (см. **табл. 2** и **3**), представлено на **рис. 4**.

В диапазоне температур 20-450°C формулы (2) и (5) позволяют получать достаточно точные значения коэффициента детерминации R^2 расчетных напряжений текучести, который достигает 0,92-0,97. Однако результаты моделирования с использованием формулы (5) имеют более высокие значения средней абсолютной ошибки S (11,7-14,2%).

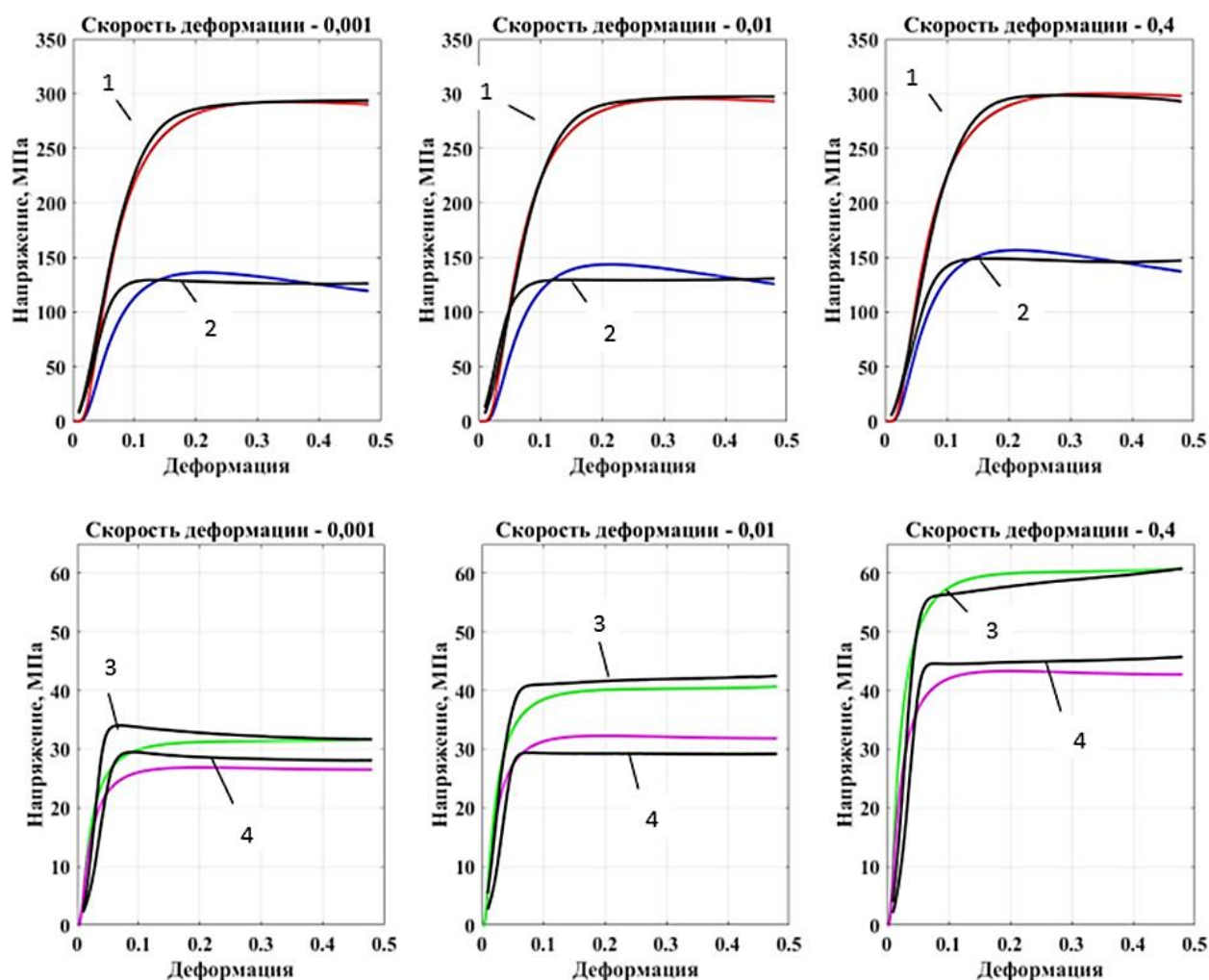


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных значений напряжения текучести при сжатии образцов с различными скоростями деформации:

- данные эксперимента (1 – при 20°C; 2 – при 300°C; 3 – при 400°C; 4 – при 450°C)
- результаты расчета по формуле (2) при 20°C
- результаты расчета по формуле (2) при 300°C
- результаты расчета по формуле (2) при 400°C
- результаты расчета по формуле (2) при 450°C

Fig. 2. Comparison of experimental and calculated values of yield stress during compression of the specimens at various strain rates:

- experimental data (1 is at 20°C; 2 is at 300°C; 3 is at 400°C; 4 is at 450°C)
- calculation results according to formula (2) at 20°C
- calculation results according to formula (2) at 300°C
- calculation results according to formula (2) at 400°C
- calculation results according to formula (2) at 450°C

Таблица 3. Значения коэффициентов в формуле (5) для алюминиевого сплава RS-356

Table 3. Coefficients in formula (5) for aluminum alloy RS-356

Тип деформации	A	m_1	m_2	m_3	m_4
20-300°C	3021,0675	0,0025	0,9756	0,0086	3,3721
400-450°C	1832,3114	0,0056	0,4317	0,0966	1,7197

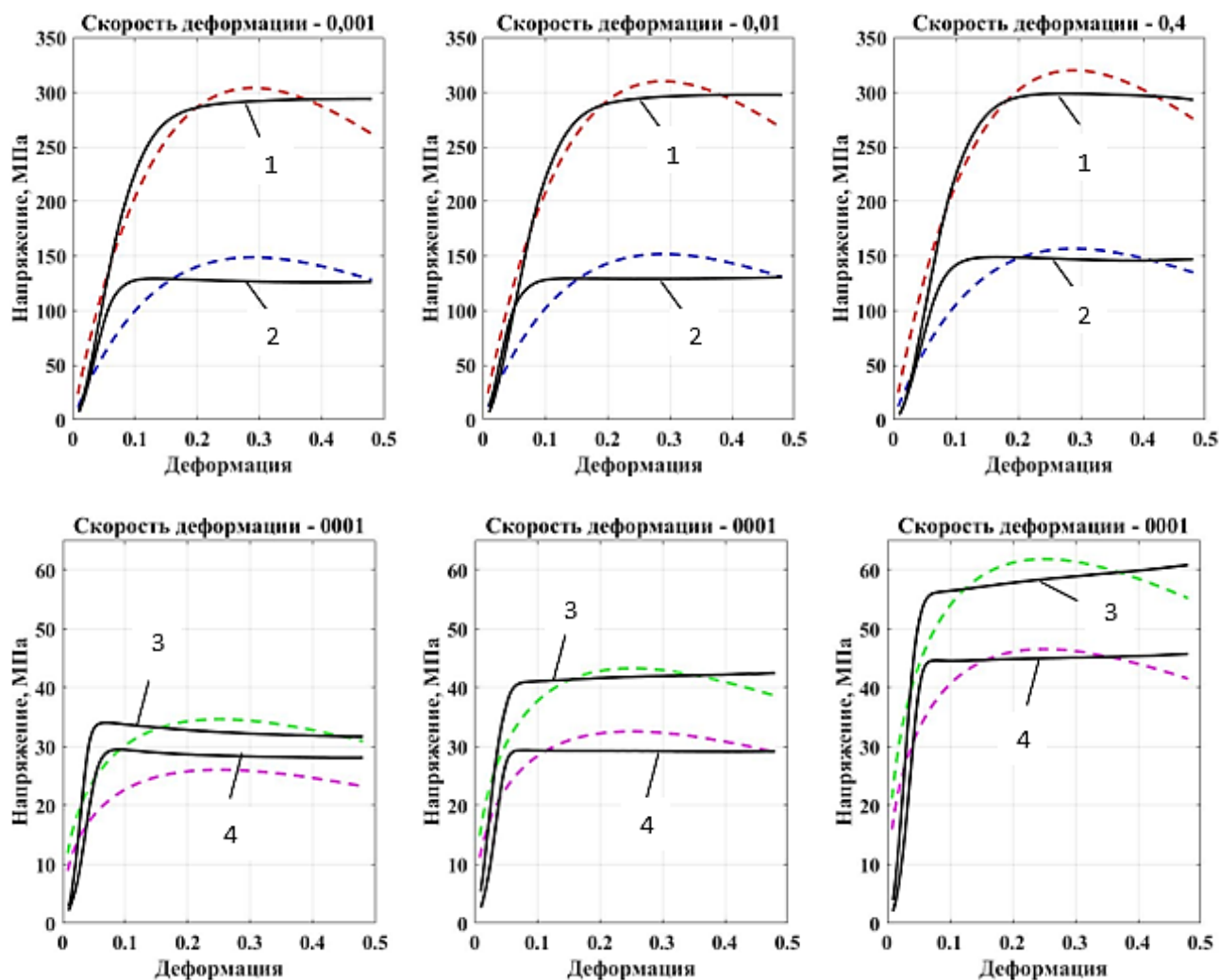


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных значений напряжения текучести при сжатии образцов с различными скоростями деформации:

- данные эксперимента (1 – при 20°C; 2 – при 300°C; 3 – при 400°C; 4 – при 450°C)
- результаты расчета по формуле (2) при 20°C
- результаты расчета по формуле (2) при 300°C
- результаты расчета по формуле (2) при 400°C
- результаты расчета по формуле (2) при 450°C

Fig. 3. Comparison of experimental and calculated values of yield stress during compression of the specimens at various strain rates:

- experimental data (1 is at 20°C; 2 is at 300°C; 3 is at 400°C; 4 is at 450°C)
- calculation results according to formula (2) at 20°C
- calculation results according to formula (2) at 300°C
- calculation results according to formula (2) at 400°C
- calculation results according to formula (2) at 450°C

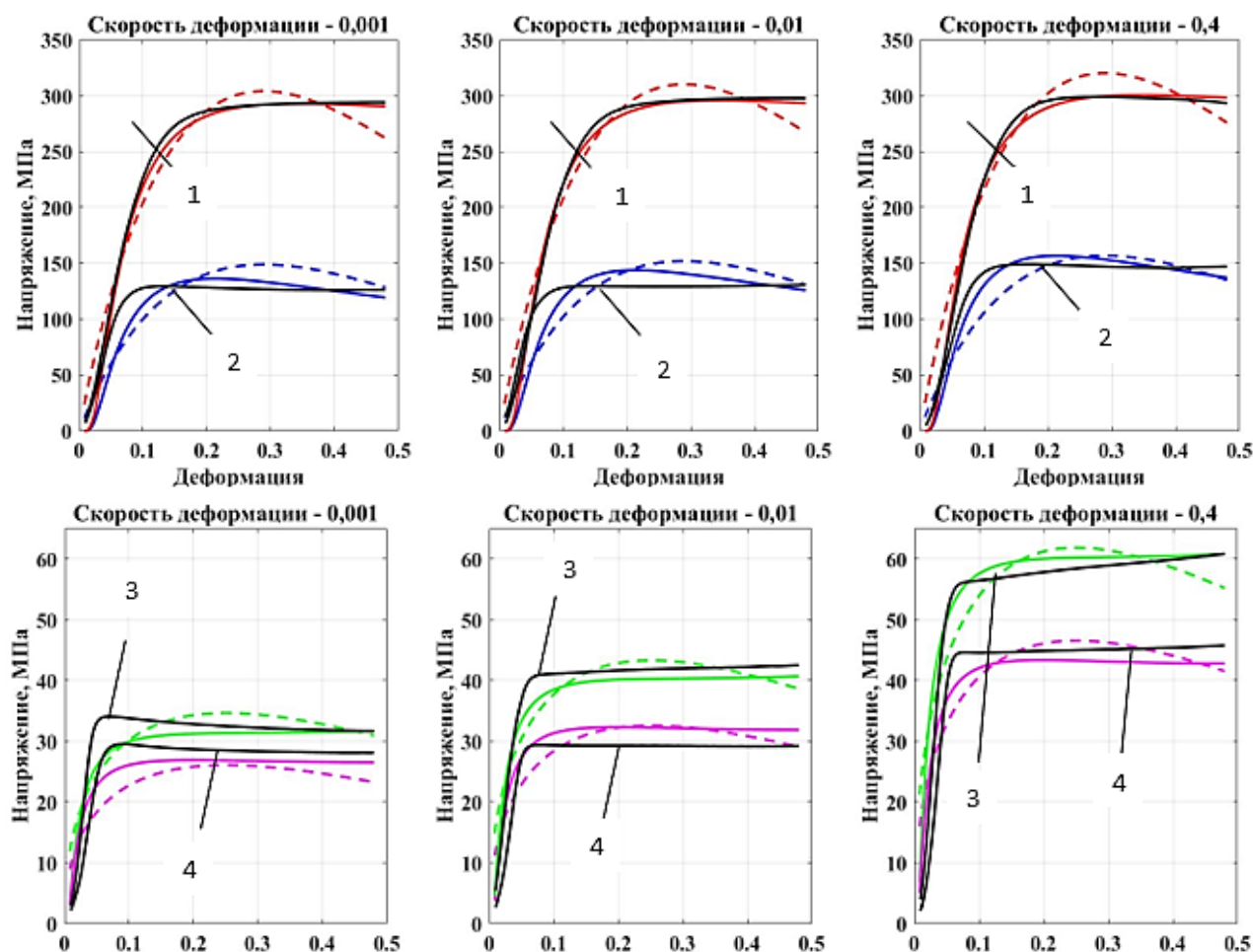


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных значений напряжения текучести при сжатии образцов с различными скоростями деформации:

— данные эксперимента (1 – при 20°C; 2 – при 300°C; 3 – при 400°C; 4 – при 450°C);

--- расчетная кривая по формуле (2);

--- расчетная кривая по формуле (5) (— при 20°C; — при 300°C; — при 400°C; — при 450°C)

Fig. 4. Comparison of experimental and calculated values of yield stress during compression of the specimens at various strain rates:

— experimental data (1 is at 20°C; 2 is at 300°C; 3 is at 400°C; 4 is at 450°C);

--- calculated curve according to formula (2);

--- calculated curve according to formula (5) (— at 20°C; — at 300°C; — at 400°C; — at 450°C)

Таким образом, при моделировании процессов формообразования заготовок из порошкового алюминиевого сплава RS-356 в равной степени возможно применение математической модели напряжения текучести с 9-ю и 5-ю неизвестными коэффициентами (формулы (2) и (5)). Применение модели с 9-ю неизвестными коэффициентами позволяет повысить точность аппроксимации экспериментальных данных – ошибка не превышает 9,7%.

Подробнее методика постановки виртуального эксперимента, направленного на верификацию математической модели деформируемого материала, представлена в работе [9]. В качестве крите-

рия точности определения математической модели материала выбрана формула оценки средней абсолютной ошибки, записанная в виде [12]

$$\delta = \left| \frac{P_{FEM} - P_{ЭКСП}}{P_{ЭКСП}} \cdot 100\% \right| \leq 5,0\%, \quad (6)$$

где δ – средняя абсолютная ошибка; P_{FEM} – сила деформирования по результатам расчета в программе QForm; $P_{ЭКСП}$ – сила деформирования, измеренная в эксперименте.

На рис. 5 представлены результаты виртуального и натурного экспериментов при температуре 20 и 450°C. В представленном примере

видно, что применение реологической модели с 9-ю коэффициентами обеспечивает более высокую точность расчета сил деформирования.

Анализ значений сил деформирования при сжатии заготовки из сплава RS-356 при температуре 20 и 450°C (рис. 6) показал, что применение

реологической модели материала, основанной на формуле (2), обеспечивает погрешность расчета не более 4,0% (при 20°C) и не более 5,0% (при 450°C), что соответствует условию формулы (7). При использовании модели по формуле (5) погрешность расчета превышает 10%.

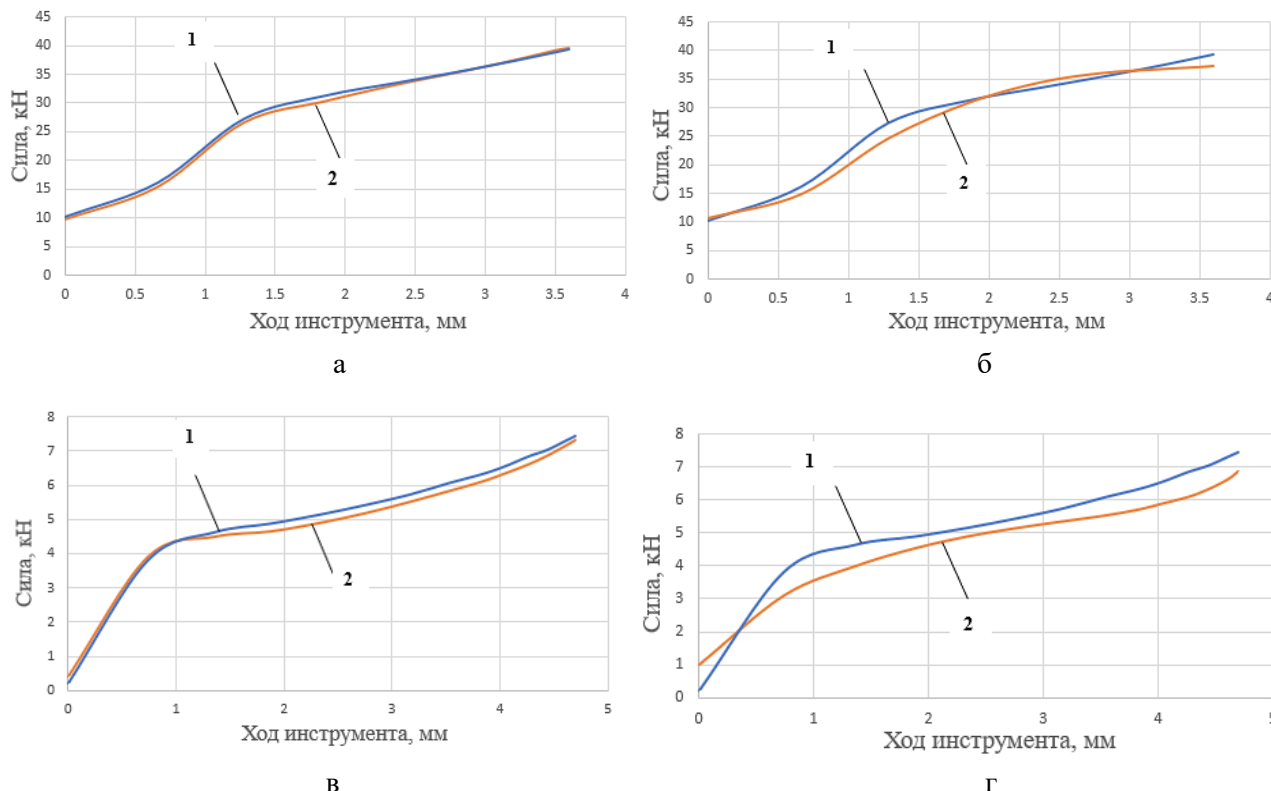


Рис. 5. Сравнение графиков «сила деформирования – ход инструмента» при моделировании сжатия образцов сплава RS-356 при температурах 20°C (а, б) и 450°C (в, г) с применением модели материала:

а, в – формула (2); б, г – формула (5); 1 – данные эксперимента; 2 – расчетные данные

Fig. 5. Comparison of the diagrams of “deformation force – tool stroke”, when modeling compression of the RS356 alloy specimens at temperatures of 20°C (а, б) and 450°C (в, г) using the material model: (а, в) is formula (2); (б, г) is formula (5); 1 is experimental data; 2 is calculated data

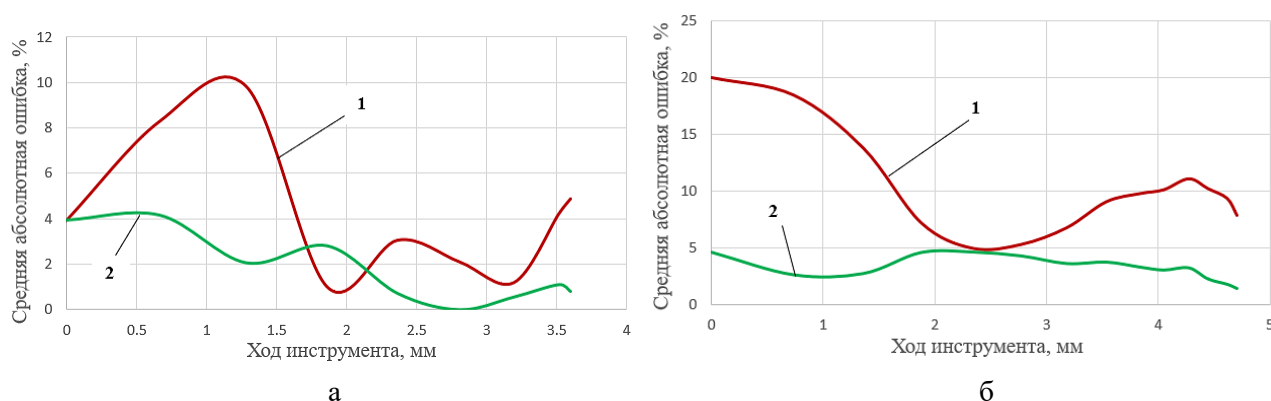


Рис. 6. Величины средних абсолютных ошибок (δ) сил сжатия образцов при температурах 20°C (а) и 450°C (б): 1 – модель – формула (5) с 5-ю коэффициентами; 2 – модель – формула (2) с 9-ю коэффициентами

Fig. 6. Mean absolute errors (δ) of compression forces of the specimens at temperatures of 20°C (а) and 450°C (б): 1 is a model – formula (5) with 5 coefficients; 2 is a model – formula (2) with 9 coefficients

Заключение

1. Найдены реологические модели порошкового алюминиевого сплава RS-356 на основе эмпирической модели, предложенной Хензелем и Шпиттелем с 5-ю и 9-ю неизвестными коэффициентами для температурного интервала 20-450°C и скоростей деформации 0,001, 0,01 и 0,4 с⁻¹.

2. Установлено, что найденная реологическая модель с 9-ю неизвестными коэффициентами обеспечивает точность прогнозирования силовых параметров при моделировании процесса пластической деформации в пределах 5%, а реологическая модель с 5-ю неизвестными коэффициентами – до 14,2%.

3. Результаты исследования позволяют применить найденные реологические модели для моделирования процессов пластического формообразования порошкового алюминиевого сплава RS-356 в широком диапазоне температурно-скоростных режимов.

Список источников

1. Металловедение алюминия и его сплавов: Справ. изд. / Беляев А.И., Бочвар О.С., Буйнов Н.Н. и др. М.: Металлургия, 1983. 280 с.
2. Tusar R.S., Ramanuj K., Isham P., Ashok K.S., Amlana P., Rabin K.D. Machinability behavior of Aluminium Alloys: A Brief Study // *Materialstoday: Proceedings*. 2019, vol. 18, part 7, pp. 5069-5075.
3. Управление процессами формообразования заготовок из титановых сплавов (на примере сплава OT4-1) с использованием моделирования реологии и режимов деформирования / Петров П.А., Хань Тоан Нгуен, Бурлаков И.А., Сухоруков Р.Ю. // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2021. №6. С. 88-95. DOI: 10.31857/S0235711921060134
4. Szeliga D., Gaward E., Pietrzyk M. Inverse analysis for identification of rheological and friction models in metal forming // *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 2006, vol. 195, pp. 6778-6798.
5. Смирнов А.С. Разработка методики идентификации определяющих соотношений для металлов при больших высокотемпературных пластических деформациях: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04. Екатеринбург, 2008. 243 с.
6. Liye Liang, Xuexin Pan, Guilan Wang, Haiou Zhang, Hao Zhang. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted AlSi7Mg // *Journal of Physics: Conference Series*. 1939 012041, 2021, pp. 1-6.
7. Charpentier P.L. Characterization and Modelling of High Temperature Flow Behavior of Aluminum Alloy 2024 / P.L. Charpentier, B.C. Stone, S.C. Ernst, J.R. Thomas // *Met. Trans. A*. 1986, vol. 17, pp. 2227.
8. Петров П.А. Методика исследования сопротивления деформации при двухэтапном монотонном

нагружении // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2019. №5. С. 157-174.

9. Построение кривых текучести алюминиевого сплава RS-356 на основе натурного и вычислительного эксперимента / Петров П.А., Фам Ван Нгок, Бурлаков И.А., Матвеев А.Г., Сапрыкин Б.Ю., Петров М.А., Во Фан Тхань Дат // *Технология легких сплавов*. 2023. №1. С. 63-69.
10. Зюзин В.И., Бровман М.Я., Мельников А.Ф. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. М.: Металлургия, 1964. 270 с.
11. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки давлением: справочник. М.: Металлургия, 1982. 360 с.
12. Marquardt D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters // *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1963, vol. 11, no. 2, p. 431.

References

1. Belyaev A.I., Bochvar O.S., Buinov N.N. et al. *Metallovedenie alyuminiya i ego splavov: Sprav. izd.* [Metal science of aluminum and its alloys: Reference book]. Moscow: Metallurgy, 1983, 280 p. (In Russ.)
2. Tusar R.S., Ramanuj K., Isham P., Ashok K.S., Amlana P., Rabin K.D. Machinability behavior of Aluminium Alloys: A Brief Study. *Materials of Today: Conference Proceedings*. 2019;18:5069-5075.
3. Petrov P.A., Khanh Nguyen Toan, Burlakov I.A., Sukhorukov R.Yu. Control of forming processes of titanium alloy blanks (using OT4-1 alloy as an example) using rheology modeling and deformation modes. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of Mechanical Engineering and Reliability of Machines]. 2021;(6):88-95. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0235711921060134
4. Szeliga D., Gaward E., Pietrzyk M. Inverse analysis for identification of rheological and friction models in metal forming. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2006;195:6778-6798.
5. Smirnov A.S. *Razrabotka metodiki identifikatsii opredelyayushchikh sootnosheniy dlya metallov pri bolshikh vysokotemperaturnykh plasticheskikh deformatsiyakh: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a technique for identifying constitutive relations for metals at high high-temperature plastic deformations. PhD thesis]. Yekaterinburg, 2008. 243 p.
6. Liye Liang, Xuexin Pan, Guilan Wang, Haiou Zhang, Hao Zhang. Microstructure and mechanical properties of the molten AlSi7Mg selective laser. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1939;012041.
7. Charpentier P.L., Stone B.C., Ernst S.C., Thomas J.R. Characterization and modelling of high temperature flow behavior of aluminum alloy 2024. *Met.Trans. A*. 1986;17:2227.
8. Petrov P.A. A method for evaluation of the flow stress under two-stage monotonic loading. *Izvestiya*

- Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya of Tula State University. Engineering Sciences]. 2019;(5):157-174. (In Russ.)
9. Petrov P.A., Pham Ngoc Van, Burlakov I.A., Matveev A.G., Saprykin B.Yu., Petrov M.A., Vo Phan Thanh Dat. Building yield curves of aluminum alloy RS-356 based on a full-scale and computational experiment. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2023;(1):63-69. (In Russ.)
 10. Zyuzin V.I., Brovman M.Ya., Melnikov A.F. *Soprotivlenie deformatsii staley pri goryachey prokatke* [Deformation stress of steels during hot rolling]. Moscow: Metallurgy, 1964, 270 p. (In Russ.)
 11. Hensel A., Shpittel T. *Raschet energosilovykh parametrov v protsessakh obrabotki davleniem: spravochnik* [Calculation of force parameters in metal forming processes: Handbook]. Moscow: Metallurgy, 1982, 360 p. (In Russ.)
 12. Marquardt D.V. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics*. 1963;11(2): 431-441.

Поступила 24.05.2023; принята к публикации 03.07.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 24/05/2023; revised 03/07/2023; published 25/09/2023

Во Фан Тхань Дат – аспирант кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: vodat2996@gmail.com.

Петров Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: petrov_p@mail.ru.

Бурлаков Игорь Андреевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: iaburlakov@gmail.com.

Фам Ван Нгок – аспирант кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: nguyennngoc15101994@gmail.com.

Нгуен Хань Тоан – аспирант кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: tolya.vn229@gmail.com.

Гневашев Андрей Александрович – аспирант кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии», Московский политехнический университет, Москва, Россия, Email: gneandrej@mail.ru.

Vo Phan Thanh Dat – postgraduate student of the Department of Materials Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. Email: vodat2996@gmail.com.

Pavel A. Petrov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. Email: petrov_p@mail.ru.

Igor A. Burlakov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Materials Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. Email: iaburlakov@gmail.com.

Pham Van Ngoc – postgraduate student of the Department of Materials Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. Email: nguyennngoc15101994@gmail.com.

Nguyen Khanh Toan – postgraduate student of the Department of Materials Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia. Email: tolya.vn229@gmail.com.

Andrey A. Gnevashev – postgraduate student of the Department of Materials Forming and Additive Technologies, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, Email: gneandrej@mail.ru.

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

УДК 621.771

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-89-96



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИСТОПРОКАТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ НА ОСНОВЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ НЕГАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Шопин И.И.

Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

Аннотация. Совершенствование процессов и улучшение операционной эффективности – важная задача для современного металлургического предприятия. Особенно важно это в наметившихся тенденциях ближайшего десятилетия: рост цен на сырье, материалы и энергоносители, совместно с падением мирового спроса на рядовые марки металлопроката. Значимый вклад в ухудшение операционной эффективности прокатных производств вносят негативные технологические события. Негативные технологические события – это нецелевой результат технологического процесса, который приводит к временным или ресурсным потерям. Наиболее типичными негативными технологическими событиями в прокатных производствах являются обрывы полосы, уводы в накопителях непрерывных агрегатов, дефекты поверхности или потеря рулонами устойчивости (проседание рулона или образование дефекта внутренней образующей рулона – «птичка»). Ключевой сложностью в работе с негативными технологическими событиями является их относительная редкость, так как типичная доля дефектного металла, полос с обрывами или уводами в накопителях менее одного процента. Эта особенность негативных технологических событий в прокатных производствах приводит к необходимости тщательной подготовки исходных данных для последующего анализа. Поэтому также важно рассматривать не только усредненные данные по длине обрабатываемых полос, но и временные тренды технологических параметров с привязкой негативных технологических событий к конкретной и точной координате по длине полосы. В статье представлен обзор применения методики работы с наиболее типичными негативными технологическими событиями прокатных производств в условиях прокатных производств ПАО «НЛМК». Ключевым элементом в методике анализа негативных технологических событий является применение бинарной логистической регрессии для выявления влияющих факторов и оценки их степени влияния. Целью статьи является описание роли негативных технологических событий в операционной эффективности прокатных производств. Научная новизна работы состоит в методике анализа и поиска путей снижения потерь от негативных технологических событий.

Ключевые слова: прокатное производство, операционная эффективность, негативные технологические события, обрывы, уводы, дефекты поверхности, потеря устойчивости

© Шопин И.И., 2023

Для цитирования

Шопин И.И. Повышение эффективности листопрокатных производств на основе предупреждения негативных технологических событий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 89-96. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-89-96>



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

INCREASING THE EFFICIENCY OF SHEET ROLLING MILLS BY PREVENTING NEGATIVE TECHNOLOGICAL EVENTS

Shopin I.I.

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract. Improving processes and increasing the operating efficiency are an important task for a modern metallurgical enterprise. This is especially important in the emerging trends of the next decade: rising prices for raw materials, materials and utilities, accompanied by a drop in a global demand for ordinary grades of rolled products. A significant contribution to the lower operating efficiency of rolling mills is made by negative technological events. Negative technological events are an untargeted result of a technological process that leads to losses of time or resources. The most typical negative technological events on rolling mills are strip breaks, deviations in loopers of continuous units, surface defects or collapsed coils (coil slumping or a defect in the inner generatrix of coils, namely crumpled coils). The key difficulty in dealing with negative technological events is their relative rarity, since a typical share of defective metal, strips with breaks or deviations in loopers is less than one percent. This feature of negative technological events on rolling mills leads to the need for a careful preparation of initial data for a subsequent analysis. Therefore, it is also important to factor into not only averaged data on length of treated strips, but also time trends of technological parameters with the assignment of negative technological events to a specific and exact coordinate along the strip length. The paper presents an overview of the application of the methodology for dealing with the most typical negative technological events on rolling mills at PJSC NLMK. A key element in the methodology for analyzing negative technological events is the use of binary logistic regression to identify influencing factors and assess their degree of influence. The paper is aimed at describing the role of negative technological events in the operating efficiency of rolling mills. The scientific novelty of the research lies in the methodology for analyzing and finding ways to reduce losses from negative technological events.

Keywords: rolling mills, operating efficiency, negative technological events, breaks, deviations, surface defects, collapsed coils

For citation

Shopin I.I. Increasing the Efficiency of Sheet Rolling Mills by Preventing Negative Technological Events. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik Of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 89-96. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-89-96>

Введение

Перспективы ближайшего десятилетия в металлургической промышленности – это высочайший уровень конкуренции при падающем спросе и росте цен на энергоносители. Это обстоятельство порождает высокую потребность во внедрении современных методов повышения эффективности (6σ, бережливое производство (LEAN), всеобщее обслуживание оборудования (TPM) и пр.), [1-12] которые внедряются долго, медленно и болезненно. У отцов-основателей данных методов (Toyota, Motorola и др.) внедрение заняло десятки лет. При современных тенденциях решающим фактором для выживания металлургической компании является скорость внедрения инноваций.

Основным достоинством данных методов является их универсальность. Они могут применяться в любых производственных или офисных процессах. Недостатком универсальности дан-

ных методов является то, что в некоторых отдельных случаях более эффективными методами совершенствования процессов будут являться узкоспециализированные методики. В случае прокатных производств наиболее типичной потерей являются негативные технологические события. Научная проблематика статьи состоит в исследовании негативных технологических событий (НТС) в прокатном производстве. Исследуемая проблема актуальна для всех металлургических предприятий со станами холодной и горячей прокатки полос.

В анализе негативных технологических событий прокатного производства важное место занимает качество горячекатаного проката, особенно параметры профиля поперечного сечения, неплоскостность и качество поверхности. Большинство НТС, особенно в цехах холодной прокатки, в той или иной степени связаны с данными параметрами подката. Помимо этого, ужесточение требований потребителей плоского ме-

таллопроката к таким показателям качества, как точность геометрических размеров и плоскостность, а также стремление производителя к снижению затрат на изготовление продукции приводит к необходимости повышения эффективности производства. Это особенно актуально в сегодняшней ситуации на рынке металлопроката, характеризующейся снижением цен из-за избытка производственных мощностей в мире.

Методика работы с негативными технологическими событиями

Операционная эффективность – это способность компании к эффективному использованию своих ресурсов (людских, временных, финансовых, технологических и др.) для достижения поставленных целей или выполнения задач. Высокая операционная эффективность означает, что компания работает без избыточных затрат и максимально оптимально использует свои ресурсы, что в итоге позволяет снизить издержки, повысить прибыль и в целом улучшить экономические показатели.

Улучшение операционной эффективности компании приводит к следующему:

1. Снижению издержек. Основная причина повышения операционной эффективности – это сокращение издержек и увеличение прибыли. Компания, которая работает более эффективно, может снизить свои затраты на производство, персонал, материалы и другие расходы. Это позволяет ей увеличить свою прибыль даже без увеличения выручки.

2. Увеличение производительности. Повышение операционной эффективности также позволяет увеличить производительность. Это означает, что компания или организация может производить больше товаров или услуг за то же количество времени или ресурсов, что повышает ее конкурентоспособность.

3. Улучшение качества. Путем повышения операционной эффективности можно улучшить качество продукции или услуг. Улучшение процессов и оптимизация бизнес-процессов способствуют повышению точности и эффективности выполнения задач, что ведет к улучшению качества продукции или услуг.

4. Улучшение репутации. Компании и организации с высоким уровнем операционной эффективности имеют хорошую репутацию на рынке. Это позволяет им привлекать новых клиентов, удерживать существующих и увеличивать свою долю на рынке.

5. Создание основы быстрой и эффективной разработки новых продуктов и технологий. Отсутствие сбоев и отклонений (то есть особых причин) в технологических и производственных процессах минимизирует разброс получаемых результатов. В свою очередь, высокая стабильность результатов процесса позволяет проводить эксперименты с меньшим объемом экспериментального металла, разрабатывать и реализовывать более сложные экспериментальные планы, различать в экспериментальных данных эффекты от взаимодействия.

В целом повышение операционной эффективности является важным аспектом развития любой компании или организации и способствует ее успешной работе и процветанию.

Онтологически производственный процесс – это совокупность действий персонала, направленная на обеспечение технологического процесса с целью получения качественной готовой продукции. Высокая операционная эффективность производственных процессов не может быть достигнута локально за счет спорадических улучшений и требует целостного рассмотрения производственного процесса как в горизонтальном разрезе – движение заготовки по переделам, так и в вертикальном – высокая надежность оборудования, обеспечение качественными материалами и сырьем, квалифицированным персоналом, должной и своевременной информацией (**рис. 1**).

Технологический процесс – более узкое понятие, чем производственный процесс и включает в себя только те события, которые напрямую направлены на создание требуемых потребительских свойств готовой продукции. Отсюда вытекает определение негативного технологического события (НТС) – неожиданное ухудшение результатов технологического процесса. Это может быть простой, снижение производительности, увеличение расхода сырья или материалов, возникновение дефектов и снижение качества.

Типичными негативными технологическими событиями в прокатном производстве являются: потеря рулоном устойчивости (проседание рулона или дефект «птичка» [13]), обрывы полос в линии агрегатов [14-18], уводы полосы в накопителях непрерывных агрегатов, возникновение дефектов поверхности полосы, вынужденное снижение скорости для пропуска дефекта полосы через агрегат, отслоения и выкрошки рабочих валков прокатного стана, забуривания полосы, сваривание витков рулона при обработке в копаковых печах и т.д. и т.п.

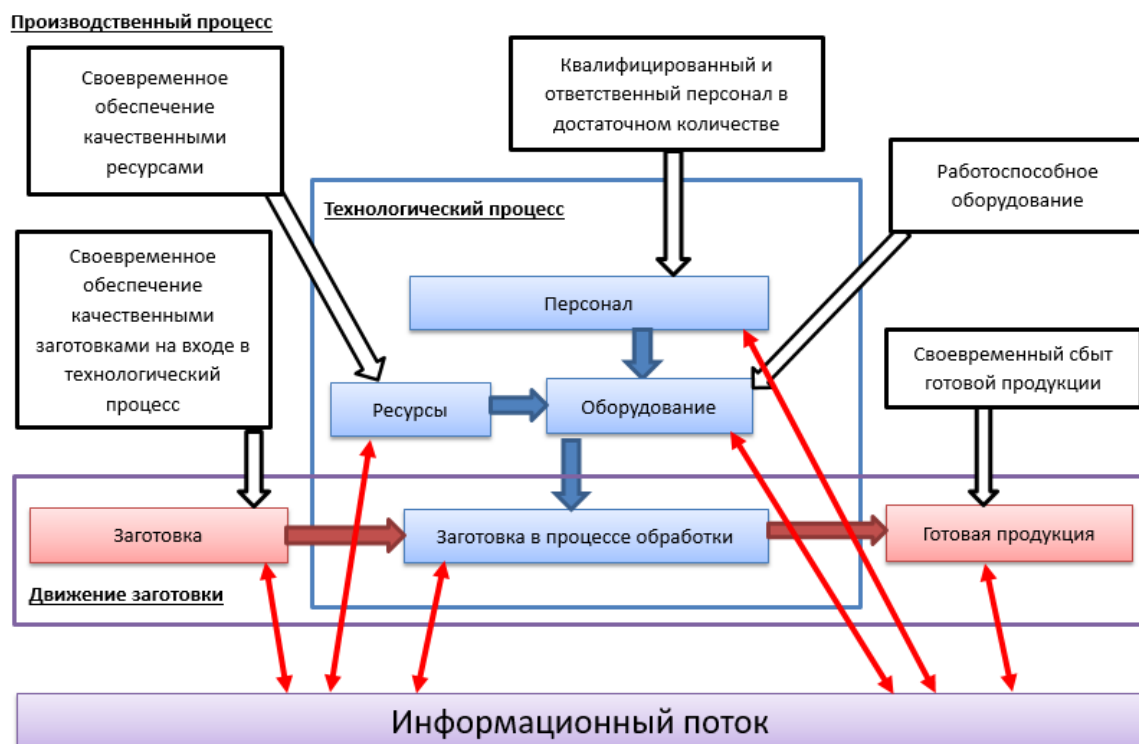


Рис. 1. Производственный процесс
Fig. 1. A manufacturing process

Негативные технологические события имеют более широкое воздействие, чем технологический процесс. Например, увеличение количества обрывов полос в линии стана холодной прокатки приводит:

- к накоплению маловесных рулонов и, как следствие, снижению производительности последующих агрегатов отжига;
- к увеличению расхода рабочих и опорных валков и, как следствие, дополнительной нагрузке на вальцешлифовальную мастерскую;
- дополнительным ударным нагрузкам на оборудование прокатного стана и, как следствие, увеличению количества отказов и сбоев в его работе.

Кумулятивный эффект негативных технологических событий может приводить к существенному снижению операционной эффективности прокатного производства. Однако оценка кумулятивного эффекта негативного технологического события на производственный процесс, как правило, является непростой задачей и требует применения специальных методов математического моделирования.

Важно не только оценивать последствия от НТС, но и искать пути снижения или полного их устранения. С этой целью можно выделить три ключевых направления работ:

- Снижение вероятности возникновения НТС за счет поиска и устранения первопричин. В рамках данного направления НТС может быть полностью устранено или радикально снижена частота его возникновения. Однако поиск первопричин (или нескольких первопричин) сам по себе является сложной задачей, а их устранение может быть очень дорогим (то есть требовать замены или модернизации оборудования) или вообще невозможно из-за особенностей технологии или оборудования.

- Создание гибкой технологии на основе прогнозной модели НТС. Если первопричина НТС связана с подкатом (например, причиной обрыва полосы на стане холодной прокатки может быть плохой профиль подката) или с сочетанием нескольких влияющих факторов (например, причиной дефекта «излом» после отжига в колпаковых печах может быть одновременное снижение шероховатости полосы и высокая скорость нагрева рулонов), можно создать технологический советчик на основе прогнозной модели и, в случае высокой вероятности образования НТС в конкретном случае, менять технологию. Например, в случае плохого профиля подката с целью снижения вероятности обрыва при холодной прокатке изменять профилировку рабочих валков или настраивать клетки на волнистость, а для снижения дефекта «излом» после отжига в

колпаковых печах на металле с низкой шероховатостью снижать скорость нагрева.

– Исключение или радикальное снижение последствий от НТС. Данное направление работ максимально эффективно, когда практически нет возможности уменьшить вероятность наступления НТС. Например, к обрывам полосы на стане холодной прокатки склонны только отдельные типоразмеры и марки стали. Тогда становится возможным прокатывать сортамент, склонный к обрывам, на рабочих валках с минимальными диаметрами (то есть уже получившими большую наработку) и, в случае порыва полосы, воздействие на удельный расход валков будет минимальным.

Если негативное технологическое событие оказывает существенное влияние на производственные процессы, есть смысл начинать работы сразу в трех обозначенных направлениях.

В анализе негативных технологических событий прокатного производства важное место занимает качество горячекатаного проката, особенно параметры профиля поперечного сечения, неплоскостность и качество поверхности. Большинство НТС, особенно в цехах холодной прокатки, в той или иной степени связаны с данными параметрами подката. Помимо этого, ужесточение требований потребителей плоского металлопроката к таким показателям качества, как точность геометрических размеров и плоскост-

ность, а также стремление производителя к снижению затрат на изготовление продукции приводит к необходимости повышения эффективности производства. Это особенно актуально в сегодняшней ситуации на рынке металлопроката, характеризующейся снижением цен из-за избытка производственных мощностей в мире.

Негативные технологические события в прокатных производствах обладают своей спецификой, поэтому наиболее эффективно их анализировать по приведенной ниже методике, состоящей из 4-х шагов.

Шаг 1. Локализация негативных технологических событий по длине полосы и подготовка данных для анализа.

Параметры обработки на агрегатах (особенно в цехе горячей прокатки) по длине полосы изменяются значительно, и поэтому НТС необходимо идентифицировать в привязке к длине полосы с точностью не более 10 м. Это наиболее важно предпринять для таких НТС, как дефекты поверхности, обрывы и уводы полос.

Например, распределение обрывов полос в процессе холодной прокатки по длине распределено неравномерно. Обрывы чаще происходят на концевых участках полос (**рис. 2**). Этот этап методики наиболее важен при анализе негативных технологических событий именно в прокатных производствах.

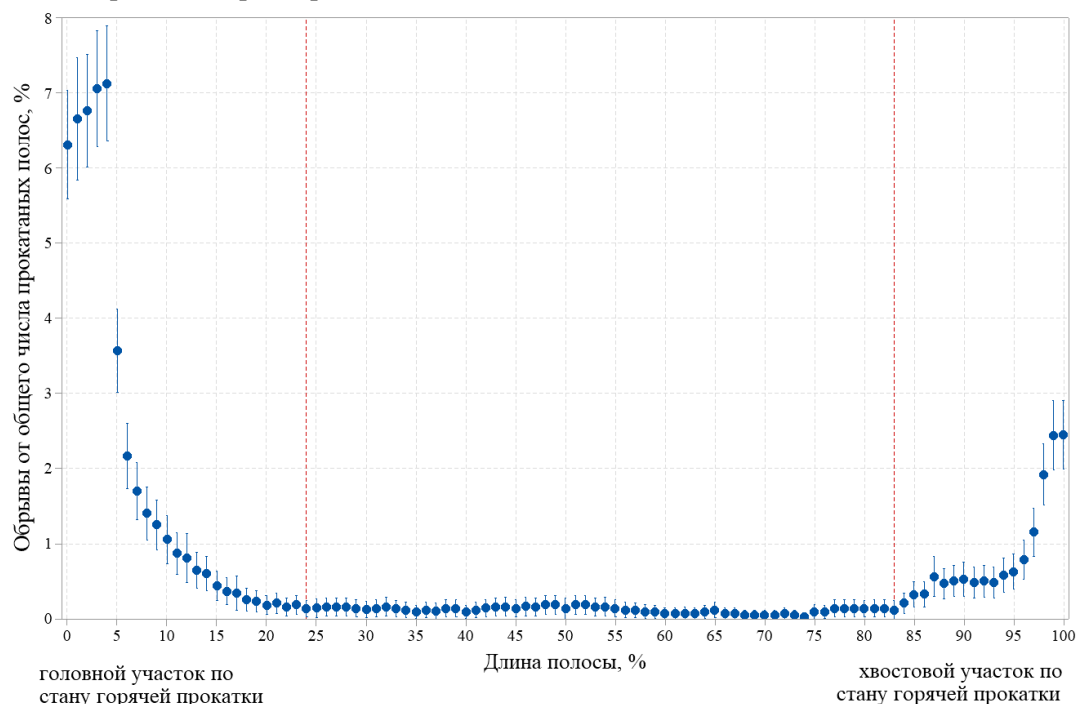


Рис. 2. Распределение обрывов в сортаменте Э3А по длине горячекатаных полос с указанием 95% доверительного интервала

Fig. 2. Distribution of breaks in the E3A product mix by the length of hot rolled strips, indicating a 95% confidence interval

Шаг 2. Идентификация всех потенциально влияющих факторов.

Для идентификации потенциально влияющих факторов используется матрица причинно-следственных связей [11]. Для этого составляется перечень всех факторов вдоль технологической цепочки и производится экспертная приоритизация факторов для дальнейшего статистического анализа. Для оценки степени влияния также может быть использован графический и статистический анализ [11, 12]. Данный этап не является особенным для прокатных производств и реализуется так же, как и в большинстве универсальных подходов к улучшению процессов.

Шаг 3. Построение модели процесса.

Для проведения качественного причинно-следственного анализа строится модель процесса на основе бинарной логистической регрессии. Именно данный вид регрессии позволяет работать с дихотомическими переменными, то есть с некоторыми событиями, которые могут произойти или не произойти. Бинарная логистическая регрессия в таком случае рассчитывает вероятность наступления события в зависимости от фактических значений влияющих факторов, чем и отличается от обычной регрессии.

Ключевым отличием применения бинарной логистической регрессии от обычной является разница в оценке адекватности полученной математической модели. В обычной регрессии адекватность модели оценивается по коэффициенту детерминации (R^2). Для бинарной логистической регрессии коэффициент детерминации тоже применяется, но полностью охарактеризовать адекватность математической модели не может. Прежде всего это связано с тем, что при работе с негативными технологическими событиями с помощью бинарной логистической регрессии решается задача классификации, и в дополнение к коэффициенту детерминации должны рассчитываться характеристики: доля правильно классифицированных объектов (accuracy – A), точность (precision – P), полнота (recall – R) и F-мера (F1).

Адекватность и практическая ценность полученной математической модели во многом определяется, насколько достоверно и качественно подготовлены данные на этапе 1.

Шаг 4. Использование модели для улучшения процесса.

Данный шаг имеет две альтернативы. Либо мы анализируем влияющие факторы и определяем оптимальные диапазоны для работы, умень-

шая вероятность НТС, либо мы прогнозируем вероятность НТС и создаем систему превентивного реагирования (например, изменение маршрута обработки, снижение скорости и т.д. и т.п.).

Полученные результаты и их обсуждение

Последовательное и системное применение методики работы с негативными технологическими событиями позволило в разное время получить следующие практические результаты в условиях ПАО «НЛМК»:

1. Снизить количество рулонов с дефектом «птичка» с 156 до 37 шт./мес. При этом расходный коэффициент на АПх/кР-1,2 цеха динамных сталей (ЦДС) снизился примерно на 1,5 кг/т.

2. Практически исключить проседания рулонов на АПП-3 и, как следствие, снизить расходный коэффициент с 1,0013 до 1,0003 т/т, выход брака с 0,0411 до 0,0047% и выход несоответствующей продукции с 0,3168 до 0,2860%.

3. Снизить обрывность на стане холодной прокатки 1400 ЦДС при обработке трансформаторной стали с 205 до 48 случаев в год.

4. Снизить количество внеплановых перевалов рабочих валков по причине образования дефекта поверхности «пробуксовка» с 48 до 2 случаев в месяц.

5. Увеличить долю рулонов, обрабатываемых без АПг/кР ЦДС, с 44 до 66%, без увеличения производственных потерь на НТА ЦДС.

6. Значительно снизить количество уводов полосы во входном накопителе НТА ЦДС и, как следствие, улучшить расходный коэффициент с 7,5 до 6,8 кг/т.

Заключение

Улучшение операционной эффективности прокатных производств может осуществляться за счет системной работы по предупреждению негативных технологических событий. Наиболее эффективным инструментом в таком случае будет методика работы с негативными технологическими событиями. Эффективность методики подтверждают полученные результаты её применения в условиях ПАО «НЛМК».

Список источников

1. Круглов М.Г. Инновационный проект: управление качеством и эффективностью: учеб. пособие. М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2011. 336 с.
2. Марр Б. Ключевые инструменты бизнес-аналитики. 67 инструментов, которые должен знать каждый менеджер. М.: Лаборатория знаний, 2018. 339 с.

3. Бизнес-процессы промышленного предприятия: учеб. пособие / Кельчевская Н.Р., Сироткин С.А., Пельмская И.С., Исмагилова Г.В. Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2016. 339 с.
4. Путилов А.В., Черняховская Ю.В. Коммерциализация технологий и промышленные инновации: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2018. 324 с.
5. Ключев А.В. Концепция бережливого производства: учеб. пособие. Екатеринбург: УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2013. 88 с.
6. Лайкер Д., Трахилис Й. Лидерство на всех уровнях бережливого производства: Практическое руководство. М.: Изд-во «Альпина Паблишер», 2018. 336 с.
7. ГОСТ Р 56907-2016. Бережливое производство. Визуализация. М.: Стандартинформ, 2017. 6 с.
8. ГОСТ Р 56908-2016. Бережливое производство. Стандартизация работы. М.: Стандартинформ, 2016. 10 с.
9. ГОСТ Р 56906-2016. Бережливое производство. Организация рабочего пространства (5S). М.: Стандартинформ, 2016. 9 с.
10. ГОСТ Р 57524-2017. Бережливое производство. Поток создания ценности. М.: Стандартинформ, 2015. 13 с.
11. ГОСТ Р ИСО 13053-1-2015. Статистические методы. Количественные методы улучшения процессов Шесть сигм. Ч. 1. Методология DMAIC. М.: Стандартинформ, 2016. 26 с.
12. ГОСТ Р ИСО 13053-2-2015. Статистические методы. Количественные методы улучшения процессов Шесть сигм. Ч. 2. Методы. М.: Стандартинформ, 2016. 42 с.
13. Бельский С.М., Щедрин И.Н., Шопин И.И. Решение проблемы потери устойчивости рулонами из стальной полосы с полимерным покрытием // Производство проката. 2018. №7. С. 5-8.
14. Бельский С.М., Шопин И.И. Применение коэффициента седловидности для оценки качества горячекатаной полосы // Черные металлы. 2019. №9. С. 9-13.
15. Бельский С.М., Шопин И.И. Математическая модель вероятности обрыва полосы при холодной прокатке // Черные металлы. 2020. №3. С. 18-23.
16. Belskiy S.M., Shopin I.I. Statistical Regression Analysis of Breakages in Cold Rolling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Russian Conference on Materials Science and Metallurgical Technology (RusMetalCon 2020), Chelyabinsk, Russian Federation, 22-24 September 2020, vol. 969, p. 012074.
17. Belskiy S.M., Shopin I.I. On Issue of Strip's Break during Cold Rolling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Russian Conference on Materials Science and Metallurgical Technology (RusMetalCon 2020), Chelyabinsk, Russian Federation, 22-24 September 2020, vol. 969, p. 012072.
18. Belskiy S.M., Shopin I.I., Safronov A.A. Improving Efficiency of Rolling Production by Predicting Negative Technological Events // Defect and Diffusion Forum, 2021, vol. 410, pp. 96-101.

References

1. Kruglov M.G. *Innovatsionny proekt: upravlenie kachestvom i effektivnostyu: ucheb. posobie* [An innovative project: quality and efficiency management: study guide]. Moscow: Delo Publishing House of Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, 2011, 336 p. (In Russ.)
2. Marr B. *Klyuchevye instrumenty biznes-analitiki. 67 instrumentov, kotorye dolzhen znat kazhdy menedzher* [Key tools of business analytics. 67 tools that every manager should know]. Moscow: Laboratory of Knowledge, 2018, 339 p. (In Russ.)
3. Kelchevskaya N.R., Sirotkin S.A., Pelymskaya I.S., Ismagilova G.V. *Biznes-protsessy promyshlennogo predpriyatiya: ucheb. posobie* [Business processes of an industrial enterprise: study guide]. Yekaterinburg: Ural Federal University, 2016, 339 p. (In Russ.)
4. Putilov A.V., Chernyakhovskaya Yu.V. *Kommertsializatsiya tekhnologiy i promyshlennyye innovatsii: ucheb. posobie* [Commercialization of technologies and industrial innovations: study guide]. Saint Petersburg: Lan Publishing House, 2018, 324 p. (In Russ.)
5. Klyuev A.V. *Kontseptsiya berezhlivogo proizvodstva: ucheb. posobie* [The concept of lean production: study guide]. Yekaterinburg: Ural Federal University, 2013, 88 p. (In Russ.)
6. Liker J., Trachilis G. *Liderstvo na vseh urovnyakh berezhlivogo proizvodstva: Prakticheskoe rukovodstvo* [Developing lean leaders at all levels: A practical guide]. Moscow: Alpina Publisher, 2018, 336 p. (In Russ.)
7. GOST R 56907-2016. *Berezhlivoe proizvodstvo. Vizualizatsiya* [Lean production. Visualization]. Moscow: Standartinform, 2017, 6 p. (In Russ.)
8. GOST R 56908-2016. *Berezhlivoe proizvodstvo. Standartizatsiya raboty* [Lean production. Work standardization]. Moscow: Standartinform, 2016, 10 p. (In Russ.)
9. GOST R 56906-2016. *Berezhlivoe proizvodstvo. Organizatsiya rabochego prostranstva (5S)* [Lean production. Workspace organization method (5S)]. Moscow: Standartinform, 2016, 9 p. (In Russ.)
10. GOST R 57524-2017. *Berezhlivoe proizvodstvo. Potok sozdaniya tsennosti* [Lean production. Value stream]. Moscow: Standartinform, 2015, 13 p. (In Russ.)
11. GOST R ISO 13053-1-2015. *Statisticheskie metody. Kolichestvennyye metody uluchsheniya protsessov Shest' sigm. Ch. 1. Metodologiya DMAIC* [Statistical methods. Quantitative methods for improving the Six Sigma processes. Part 1. DMAIC methodology]. Moscow: Standartinform, 2016, 26 p. (In Russ.)
12. GOST R ISO 13053-2-2015. *Statisticheskie metody. Kolichestvennyye metody uluchsheniya protsessov Shest' sigm. Ch. 2. Metody* [Statistical methods. Quantitative methods for improving the Six Sigma processes. Part 2. Methods]. Moscow: Standartinform, 2016, 42 p. (In Russ.)

- titative methods for improving the Six Sigma processes. Part 2. Methods]. Moscow: Standartinform, 2016, 42 p. (In Russ.)
13. Belsky S.M., Shchedrin I.N., Shopin I.I. Solution to the problem of collapsed coils from color coated steel strips. *Proizvodstvo prokata* [Manufacturing Rolled Products]. 2018;(7):5-8. (In Russ.)
 14. Belsky S.M., Shopin I.I. Application of the saddle coefficient to assess the quality of hot rolled strips. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2019;(9):9-13. (In Russ.)
 15. Belsky S.M., Shopin I.I. A mathematical model of the probability of strip breaks during cold rolling. *Chernye metally* [Ferrous Metals]. 2020;(3):18-23. (In Russ.)
 16. Belskiy S.M., Shopin I.I. Statistical regression analysis of breakages in cold rolling. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Russian Conference on Materials Science and Metallurgical Technology (RusMetalCon 2020), Chelyabinsk, Russian Federation, 22-24 September 2020, vol. 969, p. 012074.
 17. Belskiy S.M., Shopin I.I. On issue of strip's break during cold rolling. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, International Russian Conference on Materials Science and Metallurgical Technology (RusMetalCon 2020), Chelyabinsk, Russian Federation, 22-24 September 2020, vol. 969, 012072.
 18. Belskiy S.M., Shopin I.I., Safronov A.A. Improving efficiency of rolling production by predicting negative technological events. Defect and Diffusion Forum. 2021, vol. 410, pp. 96-101.

Поступила 24.08.2023; принята к публикации 11.09.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 24/08/2023; revised 11/09/2023; published 25/09/2023

Шопин Иван Иванович – кандидат технических наук, доцент,
Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.
Email: ShopinII@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0092-9026

Ivan I. Shopin – PhD (Eng.), Associate Professor,
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
Email: ShopinII@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0092-9026

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.771.014-415
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-97-113



МЕТОДОЛОГИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВАЛКОВ КЛЕТЕЙ КВАРТО НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПОЛОСКОЙ

Анцупов А.В.(мл.)¹, Анцупов А.В.², Анцупов В.П.¹, Рыскина Е.С.¹

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

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. В данной статье сформулирована методология решения актуальной согласно паспорту специальности 2.6.4 «Обработка металлов давлением» проблемы оценки и повышения долговечности и надежности эксплуатации валков широкополосных станов (ШС) на основе моделирования их контактного взаимодействия с пластически деформируемой полосой. Обосновывая причины непригодности известных моделей отказов валков для корректной оценки долговечности и тем более эксплуатационной надежности валков, в статье рассмотрен методологический подход к решению этих задач с использованием нового математического аппарата. Для аналитической оценки долговечности валков разработана совокупность взаимосвязанных замкнутых систем уравнений, моделирующих не только процессы их контактного взаимодействия, но и физические процессы формирования их постепенных ресурсных отказов по критериям прочности и износостойкости материалов. Решение систем алгебраических уравнений позволяет сформулировать методику расчета среднего ресурса каждого валка по наиболее опасному критерию отказа в процессе прокатки полос известного сортамента. Для аналитической оценки надежности эксплуатации валков дополнительно сформулированы системы уравнений, описывающие процесс преобразования рабочего фонда времени ШС в годовой объем выпускаемой им продукции и модели процессов формирования отказов тех низконадежных деталей и узлов, потери работоспособности которых вызывают простои стана. В этом случае алгоритмизация моделей позволяет сформулировать последовательность расчета главного показателя эксплуатационной надежности валков – годовой производительности ШС, функции среднего ресурса каждого, включая валки, низконадежного элемента и длительности простоев стана по причине его отказа по наиболее опасному критерию. Собственно стратегия (методология) решения обеих задач заключается в проведении на модели теоретических исследований контактного взаимодействия рабочих и опорных валков с полосой, а также безотказности низконадежных ресурсных элементов для анализа и выбора технически и экономически целесообразных решений по повышению долговечности валков и надежности их эксплуатации – эффективности функционирования исследуемого ШС.

Ключевые слова: методология, долговечность, надежность эксплуатации, валки, ресурс, основной технологический комплекс, эффективность функционирования, производительность

© Анцупов А.В.(мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П., Рыскина Е.С., 2023

Для цитирования

Методология теоретической оценки долговечности и надежности эксплуатации валков клетей кварто на основе моделирования их контактного взаимодействия с полосой / Анцупов А.В.(мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П., Рыскина Е.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 97-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-97-113>



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

METHODOLOGY OF THEORETICAL ASSESSMENT OF DURABILITY AND RELIABILITY OF OPERATION OF ROLLS OF FOUR-HIGH STANDS BY MODELING THEIR CONTACT INTERACTION WITH STRIPS

Antsupov A.V., Jr.¹, Antsupov A.V.², Antsupov V.P.¹, Ryskina E.S.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. This paper formulates a methodology for solving the problem of assessing and improving durability and reliability of the operation of rolls of hot strip mills based on modeling their contact interaction with a plastically deformable strip. This is relevant according to the description of major 2.6.4 “Metal forming”. By justifying the reasons for unsuitability of the known models of roll failures for the correct assessment of durability and, moreover, operational reliability of the rolls, the paper describes a methodological approach to solving these problems using a new mathematical apparatus. To carry out the analytical evaluation of durability of rolls, the authors have developed a set of interconnected closed systems of equations that model not only the processes of their contact interaction, but also the physical processes of the formation of their gradual resource failures according to the criteria of strength and wear resistance of materials. The solution of systems of algebraic equations allows us to formulate a methodology for calculating the mean life of every roll according to the most dangerous failure criterion in the process of rolling strips of a known product range. To carry out the analytical assessment of reliability of the operation of the rolls, systems of equations have been additionally formulated describing the process of converting the operational hours of hot strip mills into the annual volume of its products and models of the processes of failure formation of those low reliable parts and assemblies, whose loss of operation causes downtime of the mill. In this case, the algorithmization of the models allows us to formulate the sequence used to calculate a main indicator of operational reliability of rolls, annual output of hot strip mills, as a function of the mean life of every low reliable element, including rolls, and the duration of mill downtime due to its failure according to the most dangerous criterion. The actual strategy (methodology) of solving both problems consists in conducting theoretical studies on the model of the contact interaction between work and back-up rolls and the strip, as well as failure-free performance of low reliable resource elements, to analyze and select technically and economically feasible solutions to improve durability and reliability of rolls, efficiency of the operation of the hot strip mill under study.

Keywords: methodology, durability, operational reliability, rolls, life, main technological complex, efficiency, performance

For citation

Antsupov A.V., Jr., Antsupov A.V., Antsupov V.P., Ryskina E.S. Methodology of Theoretical Assessment of Durability and Reliability of Operation of Rolls of Four-High Stands by Modeling Their Contact Interaction with Strips. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 97-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-97-113>

Описание проблемы

Одну из актуальных научных проблем теории листовой прокатки в соответствии с паспортом специальности 2.6.4 «Обработка металлов давлением» можно сформулировать как исследование контактного взаимодействия упругодеформируемых рабочих и опорных валков с прокатываемой полосой с целью повышения их долговечности и надежности эксплуатации. Стратегия теоретического решения этой проблемы, разрабатываемая далее в этой статье, реализуется «...путем построения, применения и изучения математических компьютерных аналитических моделей...» для описания динамических процессов не только кон-

тактного взаимодействия рабочих и опорных валков с полосой, но и процессов формирования их деградационных отказов [1-3]. Результатом решения комплексных краевых задач математической физики (моделей физической теории надежности) [4] являются алгоритмы (программы), позволяющие рассчитывать основные показатели долговечности валков и надежности их эксплуатации в функции параметров контактного взаимодействия (усилия прокатки $P_{пр}$, погонных нагрузок в очаге деформации $p(y)$ и межвалковых зонах $q_{1(2)}(y)$, а также соответствующих контактных напряжений $p(x, y)$, $\tau(x, y)$ и $\sigma_k(x, y)$, $\tau_k(x, y)$).

Стандартным показателем долговечности валков является их средний ресурс t_p [3], а в качестве основного стандартного показателя их эксплуатационной надежности можно принять один из параметров продукции – годовую производительность Q широкополосного стана [5, 6]. Согласно [5] этот параметр характеризует надежность (эффективность) процесса прокатки, но, как и другие параметры продукции по ГОСТ 27.204 [6], его обычно используют для количественной оценки эффективности функционирования оборудования, на котором этот процесс реализуется, – главных приводах клетей кварто или основных технологических комплексах широкополосного стана (ОТК ШС). Однако при определении параметра Q следует учитывать, что его величина зависит не только от среднего ресурса валков t_p , но и от ресурса t_{pi} других недолговечных i -х элементов (деталей и узлов) ОТК ШС, которые приводят к его простоям.

Анализ известных моделей отказов валков клетей кварто показывает, что они представляют строгие неравенства, моделирующие причины выхода их из строя. В частности, в нормальных условиях эксплуатации рабочие и опорные валки подвержены постепенным прочностным или износным ресурсным отказам [3], причинами которых соответственно являются:

- поломки по шейкам, трещинам или бочке, возникновение крупных, средних или мелких сколов контактного слоя, а также усталостное выкрашивание рабочих поверхностей;

- достижение максимальным текущим износом $\Delta R(0, t)$ или профилем износа $\Delta_{и}(t)$ валка предельных значений соответственно $\Delta R_{пр}$ и $\Delta_{и пр}$.

Для описания первой группы причин широко применяют классические модели *прочностных отказов* рабочих и опорных валков, которые формулируются обычно в виде статических условий нарушения прочности с использованием коэффициентов запаса [7, 8]:

$$n = \frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{макс}} < [n], \quad (1)$$

где n и $[n]$ – расчетный запас прочности и его допустимое значение; $\sigma_{пр}$ – предельное напряжение, в качестве которого используют предел прочности σ_B или предел текучести σ_T матери-

ала валка; $\sigma_{макс}$ – максимальное расчетное напряжение, в качестве которого выступают максимальное напряжение изгиба $\sigma_{и}$, кручения τ или эквивалентное напряжение $\sigma_{эkv} = \sqrt{\sigma_{и}^2 + 3 \cdot \tau^2}$.

В случаях сложного сопротивления для моделирования возможных поломок валков, например при изгибе с кручением, модели отказа записывают также в виде условия нарушения объемной усталости:

$$n = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} < [n], \quad (2)$$

где запасы прочности на изгиб и кручение определяют выражениями

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1} \cdot \frac{\beta \cdot \varepsilon_{\sigma}}{k_{\sigma}}}{\sigma_{и}} \quad \text{и} \quad n_{\tau} = \frac{\tau_0}{\left[\frac{\tau}{2} \cdot \left(\psi_{\tau} + \frac{k_{\tau}}{\beta \cdot \varepsilon_{\tau}} \right) \right]}.$$

В этих уравнениях:

$\sigma_{-1} = (0,45 - 0,55) \cdot \sigma_B$ – предел выносливости гладких образцов из материала валков с симметричным циклом изменения нормальных напряжений;

$\tau_0 = (0,46 - 0,56) \cdot \sigma_B$ – предел выносливости гладких образцов из материала валков с отнулевым циклом изменения касательных напряжений;

$k_{\sigma(\tau)}$, β , $\varepsilon_{\sigma(\tau)}$, $\psi_{\sigma(\tau)}$ – эффективный коэффициент концентрации напряжений, коэффициент качества поверхности, масштабный фактор и коэффициент чувствительности материала валка к асимметрии цикла соответственно.

Модели отказов рабочих и опорных валков для описания контактной усталости записывают также в виде статических неравенств [7, 8] вида

$$\sigma_k = \frac{2 \cdot q}{\pi \cdot a} \geq [\sigma_k] \quad \text{или} \quad \tau_{ck}^{\max} \approx 0,6 \cdot \sigma_k \geq \frac{[\sigma_k]}{2}, \quad (3)$$

где σ_k , $\tau_{ck}^{\max}$ и $[\sigma_k]$ – максимальное контактное и приконтактное скалывающее напряжения в зоне взаимодействия валков, а также их допустимые значения; a – полуширина площадки контакта валков, определяемая по формуле Герца; q – погонная нагрузка в межвалковом контакте.

$$q = \frac{P_{пр}}{L},$$

где $P_{пр}$ – усилие прокатки самой тонкой полосы максимальной ширины $2b_{\max}$ из наиболее труднодеформируемой марки стали; L – длина контакта валков [8].

В 1984 году в работе [9] опубликована контактно-усталостная статистическая модель отказов опорных валков из марки стали 9ХФ в виде уравнения кривой усталости для расчета наработки их до отказа:

$$N_i = P_i^{-m} \cdot \exp(2,3 \cdot \alpha), \quad (4)$$

где N_i – предельное число циклов до разрушения валка, которое определяли на основе статистики отказов 55-ти валков 4-х ШСП СССР в функции количества металла Q_i , прокатанного валком в i -й клетки; α и m – параметры кривых усталости, рассчитанные для каждого стана.

Расчетная эквивалентная нагрузка, заменяющая действительный спектр нагружения при прокатке реального монтажа партий полос, определяемая согласно РТМ ВНИИметмаш [10]:

$$P_i = \sqrt[m]{\frac{\sum_{j=1}^l P_{ji}^m \cdot Q_{ji}}{\sum_{j=1}^l Q_{ji}}},$$

где P_{ji} – межвалковое контактное усилие при прокатке j -го типоразмера полосы в i -й клетки; Q_{ji} – масса прокатанной в i -й клетки полосы j -го типоразмера; l – число клеток, в которых работал валок.

Статистические модели типа (4) позволяют оценивать долговечность и рассчитывать ресурс валков, измеряемый числом циклов N_i , если заранее на основе корректной, репрезентативной статистики отказов определены значения параметров α и m кривых усталости.

Многочисленные модели износосовых отказов рабочих и опорных валков ОТК ШС, созданные в период с 60-х годов прошлого столетия по настоящее время на основе анализа статистических данных, можно представить в единой форме широко распространенных в трибологии стохастических уравнений для определения их среднего ресурса t_p [11, 12]:

$$t_p = \frac{\Delta R_{пр} - \Delta R_0}{I_H} \quad \text{или} \quad t_p = \frac{\Delta_{и пр} - \Delta_0}{I_H}, \quad (5)$$

где $\Delta R_{пр}$ или $\Delta_{и пр}$ – заданные предельные значения радиального износа исследуемого валка обычно в сечении на середине длины его бочки или профиля износа этого валка, имеющего смысл разности радиусов валка в сечениях на середине и на краю бочки; ΔR_0 и Δ_0 – приработочный (пренебрежимо малый) износ валка и соответствующий ему профиль, сформированные в относительно короткий период приработки;

$I_H \approx \bar{I}_H = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta R_i}{H_{пр i}}$ – интенсивность изнашивания (коэффициент износа) валка, соответствующий единицам измерения ресурса валка и определяемый по рекомендациям [12] как среднее в выборке из числа N отработавших валков значение отношения измеренных величин износа ΔR_i i -х валков к i -й наработке $H_{пр i}$ их до отказа.

$H_{пр i}$ – наработка исследуемых валков до отказа, измеряемая различными физическими величинами и принимаемая за воздействие, вызвавшее предельный износ. В качестве такой наработки до отказа обычно используют массу $G_{пр}$ в тоннах или длину $L_{пр}$ в километрах прокатанной полосы, расход энергии при прокатке $\mathcal{E}_{пр}$ в мегаДжоулях на тонну проката, удельный путь трения $S_{тр пр}$ в метрах или удельную работу трения $A_{тр пр}$ в ньютонметрах, совершенные единицей поверхности валка или удельной касательной силой трения в очаге деформации или межвалковой зоне за время его эксплуатации до отказа.

Все известные статистические модели типа (5) позволяют оценивать долговечность и рассчитывать ресурс валков t_p в соответствующих I_H единицах измерения (тоннах, километрах, мегаджоулях, метрах, ньютонметрах), если заранее на основе корректной, репрезентативной статистики отказов определены значения массового I_G , геометрического I_L , кинематического I_k или энергетического $I_{\mathcal{E}}$ ($I_{\text{эн}}$) коэффициента износа.

Все известные статистические модели типа (5) позволяют оценивать долговечность и рассчитывать ресурс валков t_p в соответствующих

I_H единицах измерения (тоннах, километрах, мегаджоулях, метрах, ньютонметрах), если заранее на основе корректной, репрезентативной статистики отказов определены значения массового I_G , геометрического I_L , кинематического I_k или энергетического $I_{\mathcal{E}}$ ($I_{\text{эн}}$) коэффициента износа.

Таким образом, анализ известных прочностных и износочных моделей отказов валков клетей кварто показывает, что они непригодны для аналитической оценки их долговечности и тем более их эксплуатационной надежности.

Прочностные статические модели типа (1)-(3) непригодны по причине отсутствия в их структуре времени t , как аргумента, и позволяют устанавливать «на сколь угодно долго» только вид технического состояния валков – работоспособное (неработоспособное) [3]. Стохастические прочностные и износочные модели типа (4) и (5) хотя и позволяют оценивать долговечность валков клетей кварто, но корректная оценка их ресурса возможна только в условиях эксплуатации, подобных тем, для которых были определены входящие в формулы статистические коэффициенты: α и m – в модели (4), I_H – в уравнениях (5). Однако создать «подобные» условия и, следовательно, корректные статистические модели отказов валков невозможно даже в одной клетке стана. Причиной этому является уникальность (неповторимость) не только физико-механических свойств материалов сменяемых валков, но, главным образом, неповторимость сортамента прокатываемых полос. Это, в свою очередь, приводит к отсутствию подобия исходных профилировок, геометрических и кинематических параметров очага деформации и межвалковых зон, силовых и тепловых условий их нагружения, приводящих к различной степени деградации валков к моменту их перевалки.

В таких условиях, на наш взгляд, методологию теоретического решения проблемы прогнозирования долговечности и эксплуатационной надежности валков клетей кварто в функции параметров контактного взаимодействия можно построить на основе базовых положений физической теории параметрической надежности технических объектов [13] и современных достижений эргодинамической теории деформирования, повреждаемости и разрушения конструкционных материалов [14]. Такой подход разрабатывается в следующих разделах статьи.

Структура методологического подхода к оценке и повышению долговечности и эксплуатационной надежности валков клетей кварто

Методологический подход к теоретической оценке и повышению долговечности и эксплуатационной надежности валков ОТК ШС пред-

ставляет постановку и решение ряда взаимосвязанных краевых задач математической физики: теории пластичности, теории упругости, эргодинамики и физической теории надежности с последующим поиском эффективных способов повышения показателей этих свойств. Поэтому согласно [1, 2] он включает три последовательно выполняемые стадии:

1. Разработку математического аппарата в виде совокупностей систем уравнений для многопараметрического моделирования прочностных и износочных ресурсных отказов рабочих и опорных валков клетей кварто.

2. Верификацию теоретических разработок – подтверждение корректности решения базовых блоков моделей опытным путем.

3. Проведение теоретических исследований контактного взаимодействия рабочих и опорных валков с пластически деформируемой полосой на созданной многопараметрической модели для анализа и выбора технически и экономически целесообразных решений по повышению долговечности валков и надежности их эксплуатации (эффективности функционирования исследуемого ОТК ШС).

Очевидно, что основой разрабатываемого метода и главным предметом исследований данной статьи является построение математического аппарата в виде комплекса взаимосвязанных математических моделей, описывающих процессы формирования деградационных ресурсных отказов рабочих и опорных валков по упомянутым выше причинам.

На наш взгляд, в соответствии с формулировкой научной проблемы процедура построения требуемого комплекса аналитических моделей должна включать четыре взаимосвязанных этапа, каждый из которых подробно рассматривается в следующих разделах статьи.

Построение модели контактного взаимодействия рабочего и опорного валков с прокатываемой полосой

На первом этапе моделирования необходимо построить систему уравнений для описания процессов контактного взаимодействия i -х валков клетей кварто с прокатываемой полосой в упругопластическом очаге деформации при стационарной прокатке k -й партии полос одного типоразмера. Опуская индексы « i » и « k » для упрощения записи, комплексную модель с учетом [15-19] можно представить в виде следующей системы уравнений для последовательного определения:

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned}
 & (6.1) - \text{усилия прокатки, при постоянстве погонных сил } p(y) \text{ по ширине полосы } 2b \text{ [15]:} \\
 & P_{\text{пр}} = (\bar{p}_{1 \text{ упр}} \cdot x_{1 \text{ упр}} + \bar{p}_{\text{отс}} \cdot x_{\text{пл. отст}} + \bar{p}_{\text{пр}} \cdot l_{\text{прил}} + \bar{p}_{\text{опер}} \cdot x_{\text{пл. опер}} + \bar{p}_2 \cdot x_2) \cdot 2b; \\
 & (6.2) - \text{истинных распределений погонных сил в очаге деформации } p(y) \text{ и межвалковых} \\
 & \text{зонах } q_{1,2}(y) \text{ [16]:} \\
 & p(y) = P_{\text{пр}} / b + a_p \cdot (1 - y^2 / l^2) \quad \text{и} \quad q_{1,2}(y) = (P_{\text{пр}} + F) / l + a_{q1,2} \cdot (1 - y^2 / l^2). \\
 & (6.3) - \text{распределения нормальных и касательных контактных напряжений на упругих} \\
 & \text{и пластических участках очага деформации [15]:} \\
 & p_{\text{упр}}(x, y) = f(p(y), E_{\text{п}}, h_x(y), f_{\text{упр}}(y)); \quad \tau_{\text{упр}}(x, y) = f_{\text{упр}}(x, y) \cdot p_{\text{упр}}(x, y); \\
 & p_{\text{пл}}(x, y) = f(p(y), \sigma_{\text{ф.пл}}, h_x(y), f_{\text{пл}}(y)); \quad \tau_{\text{пл}}(x, y) = f_{\text{пл}}(x, y) \cdot p_{\text{пл}}(x, y). \\
 & \text{Максимального напряжения в очаге деформации: } p_{\text{max}} = p_{\text{пл}}(x = x_{\gamma}, y = 0) \\
 & (6.4) - \text{распределения контактных напряжений в межвалковых зонах [17]:} \\
 & \sigma_{ik1,2}(x, y) = \frac{3 \cdot q_{1,2}(y)}{4 \cdot a_{1,2}(y)} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{(a_{1,2}(y))^2} \right), \quad \tau_{k1,2}(x, y) = f_{\text{ск1,2}}(x, y) \cdot \sigma_{k1,2}(x, y). \\
 & \text{Максимальных напряжений на контакте валков:} \\
 & \sigma_{\text{max ik1,2}} = \sigma_{k1,2}(0, 0).
 \end{aligned} \right\} \quad (6)
 \end{aligned}$$

В уравнения системы (6) входят следующие параметры, характеризующие условия однозначности и граничные условия задачи:

x и y – оси системы координат, принятые согласно [15, 16];

$x_{1 \text{ упр}}$, $x_{\text{пл. отст}}$, $l_{\text{прил}}$, $x_{\text{пл. опер}}$, x_2 – длины зон (участков), на которые разделена расчетная длина l_c очага деформации в направлении прокатки соответственно: упругого сжатия, опережения, прилипания, отставания, упругого восстановления, определяемые по методике [15];

$\bar{p}_{1 \text{ упр}}$, $\bar{p}_{\text{отс}}$, $\bar{p}_{\text{пр}}$, $\bar{p}_{\text{опер}}$, $\bar{p}_2$ – средние значения нормальных контактных напряжений на перечисленных участках упругопластического очага деформации, определяемые согласно [15];

F – усилие противоизгиба;

a_p , a_{q1} , a_{q2} – параметры неравномерности распределения погонных нагрузок $p(y)$, $q_1(y)$, определяемые по методике [16] в функции текущих профилей Δ_{ik} износа валков;

$E_{\text{п}}$ и $\sigma_{\text{ф.пл}}$ – модуль упругости и сопротивление деформации материала полосы в очаге деформации [15];

$h_x(y)$ – распределение толщины полосы в сечении y по длине бочки в функции $p(y)$ [15];

$f_{\text{упр}}(y)$ и $f_{\text{пл}}(y)$ – распределения коэффициентов трения на упругих и пластических участках очага деформации, определяемых по методике [20] и [15] соответственно;

$a_{1,2}(y)$ – полуширина площадки контакта валков в сечении y по длине бочки, определяемая по методике [17];

$f_{\text{ск1,2}}(x, y)$ – распределения коэффициентов трения на участках скольжения поверхностей в межвалковых зонах, определяемые по методике [20].

Поскольку на практике ресурс рабочих ($i = 1, 2$) и опорных ($i = 3, 4$) валков определяется одной из трех основных причин – потерей контактной и объемной прочности ($j = 1, 2$) или износостойкости ($j = 3$), построим отдельно модели их прочностных и износостойких отказов.

Разработка прочностных моделей отказов валков клетей кварто

На втором этапе моделирования сформулируем систему уравнений для описания физических процессов повреждаемости и разрушения наиболее нагруженных локальных объемов материалов i -х валков, сопровождающих их контактное взаимодействие с полосой до момента $t_{pij} = t_{pkij}^*$ возникновения отказа из-за потери контактной ($j = 1$) или объемной ($j = 2$) прочности, то есть до момента разрушения соответствующих наиболее напряженных объемов и предполагаемого появления выкрашивания, скола или поломки какого-либо валка.

В постановку задачи должны войти системы уравнений для последовательного определения:

$$\left\{ \begin{array}{l} (7.1) - \text{скорости повреждаемости } i\text{-го валка по } j\text{-му критерию} \\ \text{прочности при прокатке } k\text{-й партии полос для } k = 1, 2, 3, \dots : \\ \dot{u}_{eijk} = 2 \cdot k_{yi} \cdot \frac{k_B \cdot T_i}{h} \cdot \frac{U_0(\sigma_{\text{ш}ij}, T_i)}{V_a} \cdot \exp\left(-\frac{U_0'(\sigma_{\text{ш}ij}, T_i)}{k_B \cdot T_i}\right) \cdot \text{sh}\left(\frac{A_f^0(\sigma_{\text{д}ij})}{2 \cdot k_B \cdot T_i}\right). \\ (7.2) - \text{текущей плотности энергии дефектов в локальных, повреждаемых} \\ \text{по } j\text{-му критерию объемах материала } i\text{-го валка,} \\ \text{после прокатки } k\text{-й партии полос :} \\ u_{eijk} = u_{e0i} + \sum_k \dot{u}_{eijk} \cdot t_k. \\ (7.3) - \text{среднего ресурса } i\text{-го валка по } j\text{-му критерию прочности :} \\ t_{pkij}^* = t_{ijk-1} \text{ и } k_{ij}^* = k - 1, \\ \text{если в условии : } t_{ijk} = \left[\sum_{k-1} t_k + \frac{(u_{eijk} - u_{eijk-1})}{\dot{u}_{eijk}} \right], \quad u_{eijk} \geq u_{eij}^*. \end{array} \right. \quad (7)$$

При оценке скорости повреждаемости i -х валков по j -м критериям с использованием уравнения (7.1) необходимо учесть индивидуальные особенности схемы их нагружения. В частности, при определении скорости $\dot{u}_{eijk}$ повреждаемости локальных приповерхностных объемов рабочих ($i = 1, 2$) валков по критерию контактной усталости ($j = 1$) следует учесть их «двойное» нагружение. А именно, нагруженные объемы рабочих валков подвергаются действию максимального контактного напряжения $p_{\max ik}$ в очаге деформации и максимального напряжения $\sigma_{\max ik}$ в контакте со «своим» опорным валком. Поэтому скорость $\dot{u}_{ei1k}$ повреждаемости их локальных объемов при прокатке k -й партии полос в очаге деформации и в межвалковой зоне определяется по уравнению (7.1) в виде

$$\dot{u}_{ei1k} = \dot{u}'_{ei1k}(\sigma'_{\text{ш}1k}, \sigma'_{\text{д}1k}) \quad \text{и} \quad \dot{u}_{ei1k} = \dot{u}''_{ei1k}(\sigma''_{\text{ш}1k}, \sigma''_{\text{д}1k}),$$

где $\dot{u}'_{ei1k}(\sigma'_{\text{ш}1k}, \sigma'_{\text{д}1k})$ – скорость повреждаемости контактных объемов рабочих валков от действия шаровой $\sigma'_{\text{ш}1k} = \frac{p_{\max}}{3}$ и девиаторной $\sigma'_{\text{д}1k} = p_{\max ik}$ составляющих максимального контактного напряжения $p_{\max ik}$ в очаге деформации (см. уравнение (6.3)); $\dot{u}''_{ei1k}(\sigma''_{\text{ш}1k}, \sigma''_{\text{д}1k})$ – скорость по-

вреждаемости контактных объемов рабочих валков от действия шаровой $\sigma_{\text{шilk}}^{\text{шilk}} = \frac{\sigma_{\text{max ik}}}{3}$ и девиаторной $\sigma_{\text{дилk}}^{\text{дилk}} = \sigma_{\text{max ik}}$ составляющих максимального контактного напряжения $\sigma_{\text{max ik1,2}}$ в верхнем (1) или нижнем (2) межвалковом контакте (см. уравнение (6.4)).

В то же время скорость повреждаемости контактных объемов i -х опорных валков определяется по (7.1) в функции шаровой и девиаторной составляющих максимальных контактных напряжений $\sigma_{\text{max ik1,2}}$ (см. (6.4)).

Скорости повреждаемости рабочих и опорных валков по критериям объемной усталости определяются также по уравнению (7.1) в функции шаровых и девиаторных составляющих максимальных эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{эkv}}$ изгиба с кручением для рабочих валков и напряжений изгиба $\sigma_{\text{и}}$ – для опорных (см. (1)).

Остальные параметры, входящие в уравнения системы (7), характеризуют краевые условия задачи и определяются по методикам работ [14, 19]:

k_{yi} – коэффициент упрочнения структуры материала i -го валка [21],

$$k_{yi} = \frac{2 \cdot (u_{ei*} - u_{e0i})}{3 \cdot u_{ei*} - u_{e0i}}, \quad (7.1a)$$

где u_{e0i} и u_{ei*} – начальное и критическое значение плотности энергии дефектов структуры материала в локальных объемах i -го валка [14],

$$u_{e0i} = (0,071 \cdot HV_i)^{2,4} \cdot k_{\sigma i}^2 / (6 \cdot G_i) \quad \text{и} \quad u_{ei*} = \Delta H_{TBi} - u_{Ti}, \quad (7.1b)$$

здесь HV_i и $G_i = \frac{E_i}{2 \cdot (1 + \mu_i)}$, E_i и μ_i – исходная твердость по Виккерсу, модуль сдвига, линейный модуль упругости и коэффициент Пуассона материала i -го валка, $k_{\sigma i} = (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV_i + 0,12 \cdot 10^{-2})^{-1}$ –

комплексный структурный параметр [14];
 ΔH_{TBi} – энтальпия плавления материала i -го валка в твердом состоянии при температуре плавления T_{Si} ;

$u_{Ti} = \rho_i(T_i) \cdot c_i(T_i) \cdot T_i$ – плотность тепловой энергии в поверхностном слое материала i -го валка при температуре T_i , здесь $c_{ik}(T_i)$ и $\rho_i(T_i)$ – теплоемкость и плотность материала;

T_i – стационарная температура поверхностных слоев опорного и рабочего валков, определяемая по методикам [22];

k_B , h – постоянная Больцмана и постоянная Планка.

$U_0(\sigma_{\text{шij}}, T_i)$ – начальная энергия активации процесса повреждаемости (образования дефектов) в единице объема материала i -го валка при гидростатическом напряжении $\sigma_{\text{шij}}$ и температуре T_i в уравнении (7.1):

$$U_0(\sigma_{\text{шij}}, T_i) = U_{P_{T0}} - \Delta U_T(T_i) \pm \Delta U_{\sigma_{\text{шij}}}, \quad (7.1b)$$

где $U_{P_{T0}} = (-2,415 \cdot 10^{-28} T_{0i}^3 + 5,955 \cdot 10^{-25} T_{0i}^2 + 0,0121 \cdot 10^{-20} T_{0i} + 12,286 \cdot 10^{-20}) / V_{\text{ати}}$ – начальная энергия активации с учетом теплового давления при T_{0i} , K и $\sigma_{\text{шij}} = 0$ ($V_{\text{ати}}$ – атомный объем матери-

ала i -го валка [14]);

$\Delta U_T(T_i) = 1,5 \cdot \alpha_{0i} \cdot K_i \cdot T_i$ – изменение энергии активации от повышения температуры от 0°C до T_i , $^\circ\text{C}$ (α_{0i} – коэффициент теплового расширения; $K_i = \frac{E_i}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu_i)}$ – модуль объемной упругости материала i -го валка);

$\Delta U_{\sigma_{\text{шij}}} = A_V^0(\sigma_{\text{шij}}) = \frac{\varphi_\sigma^2 \cdot M_{Ri}^2 \cdot \sigma_{\text{шij}}^2}{2 \cdot K_i}$ – изменение энергии активации от работы $A_V^0(\sigma_{\text{шij}})$ гидростатического напряжения $\sigma_{\text{шij}}$;

$\varphi_\sigma = k_{\sigma i} \cdot v_{0i}^{0,5}$ – коэффициент перенапряжений на межатомных связях реального кристалла (здесь $v_{0i} = \frac{\sigma_{Ti}}{65 + 0,46 \cdot HV_i}$ – безразмерный структурный коэффициент неравномерности распределения скрытой энергии по объему материала i -го валка в исходном состоянии; σ_{Ti} – предел текучести его материала);

$M_{Ri} = \frac{[\sigma_{Ti} \cdot (65 + 0,46 \cdot HV_i)]^{0,5}}{\sigma_{Ri}}$ – коэффициент эквивалентности циклического и статического напряженного состояния i -го валка (здесь σ_{Ri} – предел выносливости его материала).

$A_f^0(\sigma_{\text{дij}}) = \frac{\varphi_\sigma^2 \cdot M_{Ri}^2 \cdot \sigma_{\text{дij}}^2}{6 \cdot G_i}$ – удельная работа формоизменения единицы локального деформируемого объема материала в уравнении (7.1), G_i – модуль сдвига его материала.

$t_k = \frac{G_k}{\rho_k \cdot b_k \cdot h_k \cdot V_k}$ – длительность прокатки k -й партии полос массой G_k с поперечным сечением $b_k \times h_k$, плотностью материала ρ_k (см. уравнение (7.2)); V_k – скорость прокатки.

k_{ij}^* – номер критической партии полос, после прокатки которой возникнет отказ i -го валка по j -му критерию прочности.

Алгоритм решения задач (6)-(7) для расчета параметров контактного взаимодействия и ресурса валков по критериям прочности не может быть построен, пока не будет найдена зависимость параметров неравномерности распределения погонных нагрузок (a_p, a_{q1}, a_{q2} , см. уравнение (6.2)) от текущих профилей Δ_{ik} износа i -х валков после прокатки k -й партии. Эта задача решается при разработке моделей отказов рабочих и опорных валков по критериям их износостойкости ($j = 3$), которая рассматривается в следующем разделе статьи.

Создание износковых моделей отказов валков клетей кварто

На третьем этапе процедуры построения математического аппарата сформулируем систему уравнений для описания физических процессов формирования износковых отказов рабочих и опорных валков на основе энергомеханической концепции прогнозирования долговечности узлов трения [23] для оценки их долговечности по критериям износостойкости ($j = 3$) трибоэлементов. Для упрощения записи формул индекс $j = 3$ опущен.

В постановку задачи должны войти системы уравнений для последовательного определения:

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned}
 & (8.1) - \text{скорости радиального изнашивания } i\text{-го вала в любом сечении } y \\
 & \quad \text{по длине его бочки при прокатке } k\text{-й партии полос для } k = 1, 2, 3 \dots : \\
 & \quad \text{в очаге деформации:} \\
 & \quad \dot{R}_{ik}'(y) = \frac{\alpha_{ik}^*(y) \cdot v_{ik} \cdot f_{\text{мех}}(y) \cdot p_n(y) \cdot V_{\text{ск}}(y)}{\Delta u_{ei}^*}; \\
 & \quad \text{в верхнем (1) или нижнем (2) межвалковом контакте:} \\
 & \quad \dot{R}_{ik1,2}''(y) = \frac{\alpha_{ik}^*(y) \cdot v_{ik} \cdot f_{\text{мех}1,2}(y) \cdot q_{1,2}(y) \cdot V_{\text{ск}1,2}(y)}{\Delta u_{ei}^*}. \\
 & (8.2) - \text{скорости искажения профиля износа } i\text{-го вала:} \\
 & \quad \text{для рабочих } (i = 1, 2): \\
 & \quad \dot{\Delta}_{ik} = \left(\dot{R}_{ik}'(0) + \dot{R}_{ik1,2}''(0) \right) - \left(\dot{R}_{ik}'(b_k) + \dot{R}_{ik1,2}''(b_k) \right); \\
 & \quad \text{для опорных } (i = 3, 4): \\
 & \quad \dot{\Delta}_{ik} = \dot{R}_{ik1,2}''(0) - \dot{R}_{ik1,2}''(b_k). \\
 & (8.3) - \text{текущих профилей износа валков после прокатки } k\text{-й партии:} \\
 & \quad \Delta_{ik} = \Delta_{i0} - \Delta_{ik-1} - \dot{\Delta}_{ik} \cdot t_k. \\
 & (8.4) - \text{среднего ресурса } i\text{-го вала по критерию износостойкости } (j = 3): \\
 & \quad t_{pk_{ij=3}}^* = t_{ik-1} \text{ и } k_{ij=3}^* = k - 1, \\
 & \quad \text{если в условии: } t_{ik} = \left[\sum_{k=1} t_k + \frac{(\Delta_{ik} - \Delta_{ik-1})}{\dot{\Delta}_{eik}} \right], \quad \Delta_{iik} \geq \Delta_{ii}^*.
 \end{aligned} \right\} \quad (8)
 \end{aligned}$$

Параметры, входящие в уравнения системы (8), характеризуют начальные и граничные условия задачи и определяются по методикам работ [14, 21, 23]:

y – ось координат, направленная вдоль оси i -го вала, с началом на середине его бочки ($y = 0$);

$y = b_k$ – координата сечения i -го вала, соответствующая краю прокатываемой k -й полосы шириной $2b_k$;

$\alpha_{ik}^*(y) = \frac{A_{aik}(y)}{A_{\text{трик}}(y)}$ – коэффициенты перекрытия в парах трения «рабочий валок – полоса» и «рабочий валок – опорный валок» при прокатке k -й партии полос в сечении y . ($A_{aik}(y)$ – номинальные удельные площади рассматриваемого контакта в сечении y шириной dy в очаге деформации или в межвалковых зонах; $A_{\text{трик}}(y)$ – удельные площади трения i -х валков в сечении y шириной dy);

v_{ik} – коэффициенты преобразования внешней энергии в изменение внутренней энергии поверхностного слоя исследуемого i -го вала на рассматриваемом контакте в очаге деформации или в межвалковых зонах;

$f_{\text{мех}1,2}(y)$ – механическая составляющая коэффициента трения на рассматриваемом контакте;

$V_{\text{ск}1,2}(y)$ – скорости относительного скольжения трущихся поверхностей в поперечном сечении y на рассматриваемом контакте;

Δu_{ei}^* – критическая энергоёмкость (критический прирост плотности энергии дефектов) в единице объема поверхностного слоя i -го вала:

$$\Delta u_{ei}^* = \Delta H_{Si} - u_{e0i} - \Delta u_{Ti},$$

где ΔH_{Si} – энтальпия плавления материала i -го валка в жидком состоянии; (u_{e0i} и Δu_{Ti} по (7.1.б)); Δ_{i0} , Δ_{ik-1} и Δ_{ii*} – начальный, $(k - 1)$ -й и предельный профили износа i -х валков. (Здесь Δ_{ik-1} – значения профилей валка, которые входят в уравнения (6.2) при оценке погонных сил).

Подводя промежуточный итог, можно заключить следующее:

- комплексная математическая модель в виде замкнутой системы уравнений (6)-(8) описывает процессы формирования ресурсных отказов валков клетей кварто по критериям прочности и износостойкости их материалов;
- алгоритмизация предложенной алгебраической системы позволяет решить проблему оценки и повышения долговечности рабочих и опорных валков по указанным критериям, определяя их средний ресурс по уравнениям (7.3) и (8.4), а проводя теоретические исследования, выбрать технически и экономически целесообразные способы повышения их долговечности.

Однако решение задачи оценки и повышения долговечности валков клетей кварто по различным критериям не позволяет определить их эксплуатационную надежность, так как величина ее показателя Q зависит не только от определяемых по (7.3) и (8.4) ресурса валков, но также ресурса других i -х низконадежных элементов ОТК ШС. Поэтому в следующем разделе статьи рассматривается построение моделей надежности эксплуатации валков для оценки эффективности функционирования основных технологических комплексов исследуемого широкополосного стана по стандартному критерию их производительности Q .

Разработка комплексной модели эксплуатационной надежности валков

На четвертом этапе моделирования построим методику аналитической оценки годовой производительности Q основных технологических комплексов широкополосного стана (ОТК ШС) – главного показателя эксплуатационной надежности прокатных валков [5, 6], в функции ресурса и длительности простоев не только валков, но и других низконадежных элементов комплекса. С позиций технической кибернетики система «прокатный стан – полоса» в соответствии с уравнением для оценки практически возможной годовой производительности стана

$$Q = q \cdot t_p = q \cdot \left(t_{\text{ном}} - \sum_{i=1}^M t_{\pi i} \right), \quad (9)$$

преобразует годовое рабочее время $t_p = t_{\text{ном}} - t_{\pi ij}$ в количество Q выпускаемой продукции умножением его на технической характеристику основного оборудования ОТК ШС – часовую производительность q [24] (рис. 1, а). (Здесь $t_{\text{ном}}$ – номинальный годовой фонд времени предприятия; $t_{\pi i}$ – суммарное время простоев ОТК в течение года по причине отказа i -х низконадежных элементов по наиболее опасному критерию прочности или износостойкости материала; $i = 1, 2, \dots, M$, M – номер и число низконадежных элементов, отказ которых приводит к простою ОТК ШС; значения $i = 1, 2, 3, 4$, как отмечено выше, индексируют валки).

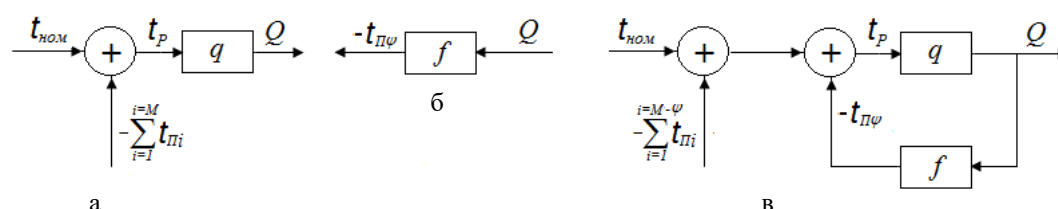


Рис. 1. Схемы параметрических преобразований при оценке производительности ОТК ШС: а – рабочего времени в выпуск продукции; б – количества продукции в длительность простоев ОТК по причине отказов ψ -х элементов; в – среднего ресурса ОТК в количестве продукции с учетом отказов ψ -х элементов
 Fig. 1. Diagrams of parametric transformations in assessing performance of main technological complexes of the hot strip mill: а is operational hours to output of products; б is the quantity of products to the duration of downtime of the main technological complexes due to failures of the ψ -th elements; в is mean life of the main technological complexes to the quantity of products taking into account failures of the ψ -th elements

Если из общего числа M известных из практики i -х низконадежных элементов выделить производственную ψ -ю группу деталей (узлов), отказ которых по наиболее опасному критерию приводит к простоям исследуемого ОТК, и проанализировать время годовых простоев комплекса $t_{\Pi\psi}$, возникших по причине их отказов, то по тому же кибернетическому принципу можно полагать, что количество выпущенной за год продукции Q может быть преобразовано в годовое время этих простоев $t_{\Pi\psi}$ в соответствии с уравнением [24]

$$t_{\Pi\psi} = f \cdot Q. \quad (10)$$

В этом выражении передаточный коэффициент f цепи отрицательной обратной связи (**рис. 1, б**) по физическому смыслу определяет долю времени годовых простоев ОТК по причине отказа ψ -х элементов на одну тонну выпускаемой продукции:

$$f = \frac{t_{\Pi\psi}}{Q} = \frac{[t_{\Pi}]_{\psi}}{[Q]_{\psi}}, \quad (11)$$

где $[t_{\Pi}]_{\psi}$ – длительность одного простоя на замену ψ -х элементов; $[Q]_{\psi}$ – нормируемое количество продукции, выпускаемое между простоями ψ -х элементов, которое согласно [3] определяет их среднюю наработку (ресурс) в тоннах выпускаемой продукции. Средний ресурс t_{ψ} этих элементов в единицах времени (например, в часах) можно оценить отношением

$$t_{p\psi} = \frac{[Q]_{\psi}}{q}. \quad (12)$$

Совместным решением уравнений (9) и (10) получаем зависимость:

$$Q = \frac{q}{1 + q \cdot f} \cdot \left(t_{\text{ном}} - \sum_{i=1}^{M-\psi} t_{\Pi i} \right), \quad (13)$$

которая отражается логической схемой параметрических преобразований на **рис. 1, в**. Эта зависимость описывает взаимодействие двух преобразователей (q и f), соединенных по схеме отрицательной обратной связи. Учитывая выражение (11) для определения f , зависимость (13) можно представить в виде уравнения, которое связывает годовую производительность Q (или ресурс $[Q]_{\psi}$) в тоннах с длительностью годовых $t_{\Pi\psi}$ (или единичного $[t_{\Pi}]_{\psi}$) простоев комплекса по причине отказа ψ -х элементов:

$$Q = \frac{Q}{Q + q \cdot t_{\Pi\psi}} \cdot q \cdot \left(t_{\text{ном}} - \sum_{i=1}^{M-\psi} t_{\Pi i} \right) = \frac{[Q]_{\psi}}{[Q]_{\psi} + q \cdot [t_{\Pi}]_{\psi}} \cdot q \cdot \left(t_{\text{ном}} - \sum_{i=1}^{M-\psi} t_{\Pi i} \right). \quad (14)$$

Подставляя согласно (12) ресурс в часах, окончательно получим искомое кибернетическое универсальное уравнение:

$$Q = \frac{t_{p\psi}}{t_{p\psi} + [t_{\Pi}]_{\psi}} \cdot q \cdot \left(t_{\text{ном}} - \sum_{i=1}^{M-\psi} t_{\Pi i} \right). \quad (15)$$

Универсальность полученной совокупности уравнений (15) при подстановке в нее требуемого значения индекса i вместо ψ заключается в том, что она отвечает поставленной цели и связывает производительность Q – выбранный показатель эксплуатационной надежности валков (или эффективности функционирования исследуемого технологического комплекса), одновременно с ресурсом $t_{p\psi}$

интересующих исследователя низконадежных элементов и длительностью $[t_{\Pi}]_{\Psi}$ единичного простоя комплекса для их замены, например, перевалки валков исследуемого ОТК ШС. Если величины простоев $[t_{\Pi}]_i$ (или $t_{\Pi i}$) в уравнениях (15) определяются продолжительностью операций ТОиР и считаются заданными, то для аналитической оценки долговечности и определения среднего ресурса t_{pi} каждого i -го низконадежного элемента можно использовать примененный выше эргодинамический подход. Поэтому сформулируем краевые задачи (подобные (7) и (8)) для описания их прочностных и износных отказов.

Для моделирования отказов i -х низконадежных элементов по j -м критериям прочности и оценки их среднего ресурса построим систему уравнений для последовательного определения:

$$\left\{ \begin{array}{l} (16.1) - \text{скорости повреждаемости } i\text{-го элемента по } j\text{-му критерию} \\ \text{прочности при прокатке } k\text{-й партии полос для } k = 1, 2, 3, \dots : \\ \dot{u}_{eijk} = 2 \cdot k_{yi} \cdot \frac{k_B \cdot T_i}{h} \cdot \frac{U_0(\sigma_{\Pi ij}, T_i)}{V_a} \cdot \exp\left(-\frac{U'_0(\sigma_{\Pi ij}, T_i)}{k_B \cdot T_i}\right) \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{A_f^0(\sigma_{\Pi ij})}{2 \cdot k_B \cdot T_i}\right). \\ (16.2) - \text{текущей плотности энергии дефектов в локальных,} \\ \text{повреждаемых по } j\text{-му критерию объемах материала} \\ i\text{-го элемента :} \\ u_{eijk} = u_{e0i} + \sum_k \dot{u}_{eijk} \cdot t_{\Pi k}. \\ (16.3) - \text{среднего ресурса } i\text{-го элемента по } j\text{-му критерию :} \\ t_{pkij}^* = t_{ijk-1} \text{ и } k_{ij}^* = k-1, \\ \text{если в условии : } t_{ijk} = \left[\sum_{k=1} t_k + \frac{(u_{eijk} - u_{eijk-1})}{\dot{u}_{eijk}} \right], u_{eijk} \geq u_{eij}^*. \end{array} \right. \quad (16)$$

Параметры, входящие в уравнения системы (16), характеризуют краевые условия задачи и определяются расчетной схемой стационарного силового и теплового нагружения i -го элемента при прокатке заданного сортамента полос. Поэтому для расчета скорости $\dot{u}_{eijk}$ повреждаемости локальных объемов каждого i -го низконадежного элемента, разрушаемых по каждому j -му критерию прочности при прокатке каждой k -й партии полос по (16.1), а затем определения ресурса t_{pkij}^* по уравнениям (16.2), (16.3), в первую очередь необходимо:

- по известным методикам сопротивления материалов определить максимальные напряжения $\sigma_{\max ijk}$, действующие в локальных, соответствующих j -му критерию, объемах материала i -го элемента и найти их шаровую $\sigma_{\Pi ij}$ и девиаторную $\sigma_{\Pi ij}$ составляющие (см. параметры системы (7));

- по методике работ [14, 23] определить температуру T_i необходимых объемов материала i -го элемента.

Остальные параметры системы (16) и формулы для их определения показаны при постановке задачи (7).

Для описания износных отказов i -х низконадежных узлов трения (сопряжений) исследуемого ОТК ШС и оценки их среднего ресурса построим, опуская индекс $j=3$, систему определяющих уравнений для последовательного расчета:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 (17.1) - \text{скорости изнашивания } i\text{-го узла трения при прокатке } k\text{-й партии} \\
 \text{полос последовательно для } k = 1, 2, 3, \dots : \\
 \dot{x}_{ik} = \frac{\alpha_{ik}^* \cdot v_{ik} \cdot f_{\text{мех}ik} \cdot p_{nik} \cdot V_{\text{ски}}}{\Delta u_{ei}^*}; \\
 (17.2) - \text{текущего износа сопряжения (наиболее изнашиваемой детали)} \\
 \text{после прокатки } k\text{-й партии полос :} \\
 x_{ik} = x_{i0} - x_{ik-1} - \dot{x}_{ik} \cdot t_k; \\
 (17.3) - \text{среднего ресурса } i\text{-го сопряжения по критерию износостойкости :} \\
 t_{pk_{ij=3}}^* = t_{ik-1} \text{ и } k_{ij=3}^* = k - 1, \\
 \text{если в условии: } t_{ik} = \left[\sum_{k=1} t_k + \frac{(x_{ik} - x_{ik-1})}{\dot{x}_{ik}} \right], \quad x_{ik} \geq x_{ik}^*.
 \end{array} \right. \quad (17)$$

Параметры, входящие в уравнения системы (17), определяют краевые условия исследуемого сопряжения и рассчитываются по методикам работ [14, 23, 25]:

$\dot{x}_{ik}$ – скорость изнашивания исследуемого i -го сопряжения при прокатке k -й партии полос обычно определяется как скорость изнашивания трибоэлемента из менее износостойкого материала;

$\alpha_{ik}^* = \frac{A_{aik}}{A_{\text{трик}}}$ – коэффициент перекрытия площади трения $A_{\text{трик}}$ изнашиваемого трибоэлемента

номинальной площадью контакта A_{aik} ;

v_{ik} – коэффициент поглощения внешней энергии трения поверхностным слоем материала изнашиваемого элемента i -го сопряжения;

$f_{\text{мех}ik}$ – механическая составляющая коэффициента трения в исследуемом сопряжении;

$V_{\text{ски}}$ – скорость относительного скольжения трущихся поверхностей в рассматриваемом узле трения;

x_{i0} , x_{ik-1} и x_{ik}^* – начальный (прирабочный), $(k - 1)$ -й и предельный износ i -го сопряжения.

Остальные параметры системы (17) и формулы для их определения показаны при постановке задачи (8).

Алгоритмизация решения замкнутой системы алгебраических уравнений (16) и (17) определит методику аналитической оценки среднего ресурса любого (кроме валков) i -го наименее работоспособного элемента (детали или узла трения) исследуемого ОТК ШС, необходимых при оценке главного показателя эксплуатационной надежности валков – производительности ШС по уравнениям (15).

Заключение

Предложен новый методологический подход – теоретический метод исследования процессов формирования постепенных деградационных отказов рабочих и опорных валков ОТК ШС для прогнозирования их долговечности и надежности эксплуатации на основе математического моделирования физических процессов повреждаемости структуры их материалов при прокатке полос известного сортамента. Он основан на обобщении данных анализа базовых положений параметрической теории

надежности, эргодинамики деформируемых твердых тел, энергомеханической теории трения и усталостного изнашивания, а также технической кибернетики. Такой синтез позволил получить новый результат – возможность разрабатывать математический аппарат для прогнозирования показателей долговечности и эксплуатационной надежности валков ОТК ШС без использования статистики их отказов в самых разнообразных условиях прокатки. Новизна обусловлена тем фактом, что опубликованные в многочисленной литературе по теории ОМД и частью проанализированные в

статье методы опираются на заведомо некорректные статистические данные об отказах исследуемых валков или характеризуют только вид их состояния.

К значимым научным результатам следует также отнести разработанные в соответствии с предложенной методологией и представленные в статье:

- модели процессов контактного взаимодействия валков и полосы (6);
- прочностные и износые модели отказов валков (7) и (8), а также всех низконадежных элементов ОТК ШС (16) и (17);
- кибернетическое уравнение (15) для оценки эффективности функционирования комплекса в целом.

Главным отличием поставленных в статье комплексных взаимосвязанных краевых задач от всех известных моделей отказов валков являются новые кинетические уравнения для описания процессов повреждаемости структуры их материалов и термодинамический критерий разрушения. Такой аналитический подход применен впервые при оценке надежности и долговечности прокатных валков ОТК ШС.

Список источников

1. ГОСТ Р 57188-2016. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.
2. ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2018. 15 с.
3. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения (ИЕС 60050-192:2015, NEQ). М.: Российский институт стандартизации, 2021. 46 с.
4. ГОСТ 27.005-97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения / Межгосударственный стандарт ЕАСС. Минск: Госстандарт республики Беларусь, 2005. 43 с.
5. Надежность и эффективность в технике: справочник: В 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др.; под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
6. ГОСТ 27.204-83. Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности. М.: Изд-во стандартов, 1984. 41 с.
7. Машины и агрегаты металлургических заводов: учебник для вузов, В 3 т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1988. 680 с.
8. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки: (теория, оборудование, технология). М.: ОАО «Черметинформация»; Череповец: ГОУ ВПО «ЧГУ», 2004. 416 с.
9. Боровик Л.И., Добронравов А.И. Технология подготовки и эксплуатации валков тонколистовых станов. М.: Металлургия, 1984. 104 с.
10. РТМ 24.010.20-74. Расчет на долговечность (по усталости) узлов и деталей металлургического оборудования. Определение эквивалентной нагрузки. М.: ВНИИМЕТМАШ, 1974. 31 с.
11. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения. Самара: СГТУ, 2000. 268 с.
12. Р 50-95-88. Рекомендации. Обеспечение износостойкости изделий: основные положения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. 24 с.
13. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
14. Федоров В.В. Основы эргодинамики и синергетики деформируемых тел: монография. Ч. III. Основы эргодинамики деформируемых тел / под ред. С.В. Федорова. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. 222 с.
15. Кожевникова И.А., Гарбер Э.А. Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов: монография. Череповец: ГОУ ВПО «ЧГУ», 2010. 275 с.
16. Салганик В.М., Полецков П.П. Моделирование деформаций и нагрузок валковой системы кварто и повышение качества листового проката по профилю: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. 133 с.
17. Вирабов Р.В. Тяговые свойства фрикционных передач. М.: Машиностроение, 1982. 263 с.
18. Разработка профилировки валков двухклетового реверсивного стана ОАО «ММК» с учетом размерного, марочного сортамента и стойкости валков / В.М. Салганик, П.П. Полецков, И.В. Вьер и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2003. №3. С. 19-22.
19. Управление качеством горячекатаного проката по профилю и плоскостности на базе использования автоматизированной системы / В.М. Салганик, П.П. Полецков, Ю.Б. Кухта и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. №1. С. 59-62.
20. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: справочник. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
21. Модель параметрических отказов валковых систем кварто по различным критериям / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов и др. //

- Производство проката. 2015. №2. С. 35-42.
22. Гарбер Э.А., Хлопотин М.В. Моделирование и совершенствование теплового режима и профилировок валков широкополосных станов горячей прокатки: монография. Череповец: ЧГУ; М.: Теплотехник, 2013. 113 с.
 23. Энергомеханическая концепция прогнозирования долговечности узлов трения по критерию износостойкости элементов / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов и др. // Трение и износ. 2016. Т. 37. №5. С. 636-642. DOI: 10.3103 / S 1068366616050032
 24. Оценка и обеспечение эффективности функционирования основного оборудования широкополосных станов / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, П.В. Макарова, Ю.С. Ляшева // Механическое оборудование металлургических заводов. 2019. №1(12). С. 15-24.
 25. Анцупов А.В. (мл.) Аналитический метод проектной оценки ресурса элементов металлургических машин / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. №1. С. 30-35.
- ### References
1. State standard GOST R 57188-2016. *Chislennoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. Terminy i opredeleniya* [Numerical modeling of physical processes. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform, 2016, 12 p. (In Russ.)
 2. State standard GOST R 57412-2017. *Kompyuternye modeli v protsessakh razrabotki, proizvodstva i ekspluatatsii izdeliy. Obshchie polozheniya* [Computer models in design, manufacturing and maintenance. General]. Moscow: Standartinform, 2018, 15 p. (In Russ.)
 3. State standard GOST R 27.102-2021. *Nadezhnost v tekhnike. Nadezhnost obekta. Terminy i opredeleniya* [Dependability in technics. Dependability of an item. Terms and definitions]. (IEC 60050-192:2015, NEQ). Moscow: Russian Standardization Institute, 2021, 46 p. (In Russ.)
 4. State standard GOST 27.005-97. *Nadezhnost v tekhnike. Modeli otkazov. Osnovnye polozheniya* [Dependability in engineering. Failure models. Main provisions]. Interstate standard of EASC. Minsk: State Standards of the Republic of Belarus, 2005, 43 p. (In Russ.)
 5. Utkin V.F., Kryuchkov Yu.V. *Nadezhnost i effektivnost v tekhnike: spravochnik* [Dependability and efficiency in engineering: Handbook]: in 10 volumes. Vol. 3. *Effektivnost tekhnicheskikh sistem* [Efficiency of engineering systems]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1988, 328 p. (In Russ.)
 6. State standard GOST 27.204-83. *Nadezhnost v tekhnike. Tekhnologicheskie sistemy. Tekhnicheskie trebovaniya k metodam otsenki nadezhnosti po parametram proizvoditelnosti* [Industrial product dependability. Technological systems. Technical requirements for methods of reliability evaluation on productivity parameters]. Moscow: Publishing House of Standards, 1984, 41 p. (In Russ.)
 7. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebenik V.M. et al. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov* [Machines and facilities of metallurgical plants]. In 3 volumes. Vol. 3. *Mashiny i agregaty dlya proizvodstva i otdelki prokata. Uchebnik dlya vuzov* [Machines and facilities used for production and finishing of rolled products. Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 680 p. (In Russ.)
 8. Garber E.A. *Stany kholodnoy prokatki: (teoriya, oborudovanie, tekhnologiya)* [Cold rolling mills: (theory, equipment, technology)]. Moscow: OJSC Chernetinformatsiya; Cherepovets: Cherepovets State University, 2004, 416 p. (In Russ.)
 9. Borovik L.I., Dobronravov A.I. *Tekhnologiya podgotovki i ekspluatatsii valkov tonkolistovykh stanov* [Technology of preparation and operation of rolls of sheet rolling mills]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 104 p. (In Russ.)
 10. Technical directive RTM 24.010.20-74. *Raschet na dolgovechnost (po ustalosti) uzlov i detaley metallurgicheskogo oborudovaniya. Opredelenie ekvivalentnoy nagruzki* [Calculation of durability (fatigue) of components and parts of metallurgical equipment. Determination of equivalent load]. Moscow: All-Russian Research and Design Institute for Metallurgical Engineering, 1974, 31 p. (In Russ.)
 11. Berkovich I.I., Gromakovskiy D.G. *Tribologiya. Fizicheskie osnovy, mekhanika i tekhnicheskie prilozheniya* [Tribology. Physics, mechanics, and technical applications]. Samara: Samara State Technical University, 2000, 268 p. (In Russ.)
 12. Recommendations R 50-95-88. *Rekomendatsii. Obespechenie iznosostoikosti izdelii* [Recommendations. Ensuring wear resistance of products]. Moscow: State Committee of the USSR for Standards, 1989, 24 p.
 13. Pronikov A.S. *Parametricheskaya nadezhnost mashin* [Parametric reliability of machines]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2002, 560 p. (In Russ.)
 14. Fedorov V.V. *Osnovy ergodinamiki i sinergetiki deformiruemykh tel: monografiya* [Fundamentals of ergodynamics and synergetics of deformable bodies: Monograph]. Kaliningrad: Kaliningrad State Technical University, 2014, 222 p. (In Russ.)
 15. Kozhevnikova I.A., Garber E.A. *Razvitie teorii tonkolistovoy prokatki dlya povysheniya effektivnosti raboty shirokopolosnykh stanov: monografiya* [Development of the theory of sheet rolling to improve efficiency of hot strip mills: Monograph]. Cherepovets: Cherepovets State University, 2010, 275 p. (In Russ.)
 16. Salganik V.M., Poletskov P.P. *Modelirovanie deformatsii i nagruzok valkovoy sistemy kvarto i povysheenie kachestva listovogo prokata po profilyu:*

- Monografiya* [Modeling of deformations and loads of the four-high stand system and improving the quality of rolled sheets according to the profile: Monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2009, 133 p. (In Russ.)
17. Virabov R.V. *Tyagovye svoystva friktsionnykh peredach* [Hauling properties of friction gears]. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 263 p. (In Russ.)
 18. Salganik V.M., Poletskov P.P., Vier I.V. et al. Development of profiling of rolls for a double-stand reversing mill at OJSC MMK factoring into the size, grade range and durability of rolls]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2003;(3):19-22. (In Russ.)
 19. Salganik V.M., Poletskov P.P., Kukhta Yu.B. et al. Quality management of hot rolled products by their profile and flatness based on the automated system. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010;(1):59-62. (In Russ.)
 20. Kragelsky I.V., Mikhlin N.M. *Uzly treniya mashin: spravochnik* [Friction units of machines: Handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 280 p. (In Russ.)
 21. Antsupov A.V., Jr., Antsupov A.V., Antsupov V.P. et al. A model of parametric failures of four-high stand systems by various criteria. *Proizvodstvo prokata* [Production of Rolled Products]. 2015;(2):35-42. (In Russ.)
 22. Garber E.A., Khlopotin M.V. *Modelirovanie i sovershenstvovanie teplovogo rezhima i profilirovok valkov shirokopolosnykh stanov goryachey prokatki: Monografiya* [Modeling and improvement of thermal conditions and roll profiling of hot strip mills: Monograph]. Cherepovets: Cherepovets State university; Moscow: Teplotekhnika, 2013, 113 p. (In Russ.)
 23. Antsupov A.V., Jr., Antsupov A.V., Antsupov V.P. et al. An energy and mechanical concept of predicting durability of friction units by the criterion of wear resistance of elements. *Trenie i iznos* [Friction and Wear]. 2016;37(5):636-642. DOI: 10.3103 / S 1068366616050032 (In Russ.)
 24. Antsupov A.V., Jr., Antsupov A.V., Antsupov V.P., Makarova P.V., Lyasheva Yu.S. Evaluating and ensuring efficiency of main equipment of hot strip mills. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical Equipment of Metallurgical Plants]. 2019;(1(12)):15-24. (In Russ.)
 25. Antsupov A.V., Jr., Antsupov A.V., Antsupov V.P. An analytical method for design evaluation of life of elements of metallurgical machines. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of Universities. Ferrous Metallurgy]. 2017;60(1):30-35. (In Russ.)

Поступила 07.06.2023; принята к публикации 17.07.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 07/06/2023; revised 17/07/2023; published 25/09/2023

Анцупов Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: a.antcupov@gmail.com. ORCID 0000-0001-9432-9517

Анцупов Александр Викторович – доктор технических наук, профессор,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.
Email: antsupov.alexander@gmail.com. ORCID 0000-0002-9237-424X

Анцупов Виктор Петрович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: antsupov.vp@gmail.com. ORCID 0000-0002-8187-5479

Рыскина Елена Сергеевна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: elenresh74@gmail.com. ORCID 0000-0002-7209-8575

Aleksei V. Antsupov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: a.antcupov@gmail.com. ORCID 0000-0001-9432-9517

Aleksandr V. Antsupov – DrSc (Eng.), Professor,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
Email: antsupov.alexander@gmail.com. ORCID 0000-0002-9237-424X

Viktor P. Antsupov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: antsupov.vp@gmail.com. ORCID 0000-0002-8187-5479

Elena S. Ryskina – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: elenresh74@gmail.com. ORCID 0000-0002-7209-8575



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОСИ ОТВЕРСТИЙ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ТРЕХЛЕЗВИЙНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Дерябин И.П.¹, Гузеев В.И.¹, Токарев А.С.²¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия² Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ТТИ НИЯУ «МИФИ»), Трехгорный, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Для современного машиностроения характерно постоянное ужесточение требований к точности деталей. Одной из проблем получения высокой точности расположения оси отверстий в различных деталях является технологическое наследование погрешностей при многопереходной обработке. Обработка отверстий на современных станках с ЧПУ сверлением, зенкерованием и развертыванием выполняется при жестком закреплении инструмента и без направления по кондукторной втулке. При многопереходной обработке отверстий увод, возникший после сверления, необходимо исправить на следующих переходах. Однако рассверливание, зенкерование и т.д. нестабильно обеспечивает повышение точности расположения оси отверстия. Результаты этих переходов нестабильны, в ряде случаев увод не снижается, а возрастает. Во многом это связано с главной спецификой обработки отверстий концевыми мерными инструментами (сверлами, зенкерами, развертками) – крайне малой жесткостью, которую практически невозможно повысить на современном высокоточном оборудовании с ЧПУ. Поэтому необходимо найти другие способы снижения погрешностей обработки: выбор геометрических параметров заточки инструментов, учет амплитуды и фазы осевых колебаний инструмента и т.д. **Цель работы.** Экспериментально определить влияние различных технологических параметров обработки на наследование увода оси отверстия для переходов сверления и зенкерования трехлезвийным зенкером. **Используемые методы.** Разработана методика проведения экспериментов с варьированием углов заточки инструмента, амплитуды и фазы осевых колебаний инструмента, азимутального положения заготовки в станке. **Новизна.** Установлено, что при определенных сочетаниях управляемых параметров обработки диссимметрично заточенный инструмент по главному углу в плане снижает увод оси отверстия значительно больше, чем симметрично заточенный. **Результат.** Получена возможность управлять параметрами обработки отверстий концевыми мерными инструментами для существенного влияния на технологическое наследование погрешностей расположения оси. **Практическая значимость.** Применение результатов исследования позволит повысить точность обработки отверстий концевыми мерными инструментами на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: обработка отверстий, технологическое наследование, увод оси отверстий, концевые мерные инструменты, осевые колебания инструмента

© Дерябин И.П., Гузеев В.И., Токарев А.С., 2023

Для цитирования

Дерябин И.П., Гузеев В.И., Токарев А.С. Экспериментальные исследования технологического наследования погрешностей расположения оси отверстий при применении трехлезвийных инструментов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 114-122. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-114-122>



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

EXPERIMENTAL STUDIES ON TECHNOLOGICAL INHERITANCE OF ERRORS IN THE LOCATION OF THE AXIS OF HOLES WHEN USING THREE-BLADE TOOLS

Deryabin I.P.¹, Guzeev V.I.¹, Tokarev A.S.²

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Trekhgornyy Technological Institute – Branch of National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute, Trekhgornyy, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Modern mechanical engineering is characterized by a constant tightening of requirements for accuracy of parts. One of the problems of achieving high accuracy of the axis of the holes in various parts is technological inheritance of errors during multi-transition processing. Hole machining on modern CNC machines by drilling, countersinking and broaching is carried out with a rigid attachment of the tool and without direction along a jig bushing. When applying multi-pass hole machining, the deviation occurred after drilling is to be corrected at the following stages. However, drilling, countersinking, etc. unstably provides an increase in accuracy of the location of the axis of the hole. The results of these stages are unstable; in some cases the deviation is not decreased, but increased. This is largely due to the main specifics of hole machining with end measuring tools (drills, countersinks, reamers), namely extremely low rigidity, which is almost impossible to increase on modern high-precision CNC equipment. Therefore, it is necessary to find other ways to reduce machining errors: the choice of geometric parameters of sharpening tools, factoring into the amplitude and phase of axial vibrations of the tool, etc. **Objectives.** The study is aimed at determining experimentally the influence of various machining process parameters on inheritance of the deviation of the hole axis for drilling and countersinking with a three-blade countersink. **Methods Applied.** We developed a method of conducting experiments with varying the angles of tool sharpening, the amplitude and phase of the axial vibrations of the tool, the azimuthal position of the workpiece in the machine. **Originality.** Certain combinations of controlled machining parameters have been found to provide that a dissymmetrically sharpened tool along the entering angle reduces the deviation of the hole axis significantly more than a symmetrically sharpened one. **Result.** It is possible to control the parameters of hole machining with end measuring tools to achieve a significant impact on technological inheritance of axis location errors. **Practical Relevance.** The application of the research results will improve accuracy of hole machining with end measuring tools on CNC machines.

Keywords: hole machining, technological inheritance, removal of the axis of the holes, end measuring tools, axial vibrations of the tool

For citation

Deryabin I.P., Guzeev V.I., Tokarev A.S. Experimental Studies on Technological Inheritance of Errors in the Location of the Axis of Holes when Using Three-Blade Tools. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 114-122. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-114-122>

Введение

Явление технологической наследственности оказывает существенное влияние на точность обработки деталей машин [1, 3, 4, 9]. Существующая теория и практика технологии машиностроения базируется на положении об уточнении параметров точности по переходам: каждый последующий переход обработки данной поверхности должен уменьшать погрешности. Однако данное положение не всегда оказывается верным, например при многопереходной обработке отверстий концевыми мерными инструментами (КМИ). В ряде случаев наблюдается увеличение погрешности расположения оси (увода) на последующих операциях-переходах [2, 5, 6]. Возможность управления технологическими параметрами операций и переходов в процессе изго-

товления круглых и точных отверстий может значительно влиять на снижение погрешностей обработки. Проведенные исследования наследования погрешностей при обработке отверстий двухлезвийными инструментами на операциях сверления и рассверливания показали существенную неоднозначность изменения точности расположения оси (увода) отверстия. Основными технологическими параметрами, влияющими на увод оси отверстия при рассверливании, являются:

- погрешность расположения оси отверстия после сверления;
- разность значений главных углов в плане фрежущих лезвий сверла;
- величина осевого биения шпинделя станка, приводящая к колебаниям подачи S;
- фаза колебаний шпинделя станка.

В зависимости от вида сочетаний этих пара-

метров увода оси отверстия при рассверливании может либо уменьшаться, либо увеличиваться. Оказалось, что после сверления на следующем переходе рассверливания инструмент с более диссимметричной заточкой дает наибольшее снижение увода оси отверстия. Также установлено, что увод оси отверстия снижается больше, когда фаза осевого колебания шпинделя, приводящая к максимальной подаче, наступает при положении лезвия инструмента с большим главным углом в плане ϕ со стороны наибольшего припуска в заготовке.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим возможности применения в многопереходной обработке отверстий многолезвийных инструментов, например зенкеров [7, 8, 10]. Для решения этой задачи были проведены экспериментальные исследования. В ходе проведенных экспериментов: даны количественные характеристики механизма наследования увода оси отверстия при многопереходной обработке; определены закономерности изменения величины увода оси отверстия на операциях зенкерования на основе учёта фазы осевых колебаний шпинделя станка в сочетании с факторами диссимметрии заточки режущей части инструмента и положения оси отверстия в заготовке.

Эксперименты проводились на вертикально-сверлильном станке модели 2A125. Режимы резания: скорость резания – 40 м/мин; подача $S_0 = 0,2$ мм/об. В качестве смазывающей охлаждающей жидкости использовался Укринол 5%.

Для проведения экспериментов использовались заготовки, полученные из круглого сортового проката. Материал заготовок сталь 20, длина заготовки 40 мм, наружный диаметр 25 мм; заготовки отшлифованы по наружному диаметру и торцам, а также просверлено центральное отверстие диаметром 6 Н13. Шлифование заготовок по наружному диаметру проводилось с целью получения более точных замеров значений получаемого увода оси отверстия. На верхнем торце ось отверстия совпадает с осью заготовки. Отверстие было просверлено таким образом, что в результате был получен увод $1,3 \pm 1$ мм на 40 мм длины. В результате чего на нижнем торце имеет место разностенность (рис. 1).

На заготовках со стороны выхода сверла были определены положения наибольшей h_6 и наименьшей h_m толщины стенки, которые будут влиять на припуск при последующей операции зенкерования. Далее была рассчитана величина

увода оси отверстия по формуле $(h_6 - h_m)/2$. На каждом торце у всех заготовок со стороны наибольшей толщины стенки сделаны метки. Все заготовки нумеровались.

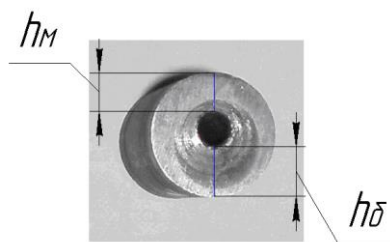


Рис. 1. Разметка положений наибольшей и наименьшей толщины стенок на торце детали со стороны выхода инструмента

Fig. 1. Marking of the positions of the highest and lowest wall thickness at the end of the part, on the side of the tool outlet

Все замеры производились на координатно-измерительной машине Global active фирмы Brown&Sharp. Для проведения замера деталь устанавливалась на столе координатно-измерительной машины в призму вертикально, как показано на фотографии (рис. 2).



Рис. 2. Процесс замера детали на координатно-измерительной машине Global active

Fig. 2. Measuring a part on the Global Active coordinate measuring machine

С целью проверки влияния периодических осевых колебаний инструмента на наследование погрешностей расположения оси отверстия применялась специальная сверлильная головка с регулированием амплитуды и фазы осевых колебаний (рис. 3). Это позволило выполнять подачу инструмента (рис. 4) по зависимости

$$S = S_0 + \Delta S \cdot \cos \psi,$$

где S_0 – номинальное значение подачи, установленное на станке, мм/об; ΔS – амплитуда осевых колебаний инструмента, мм; ψ – текущий угол поворота инструмента, град.



Рис. 3. Сверлильная головка с осевым перемещением
Fig. 3. A drilling head with axial displacement

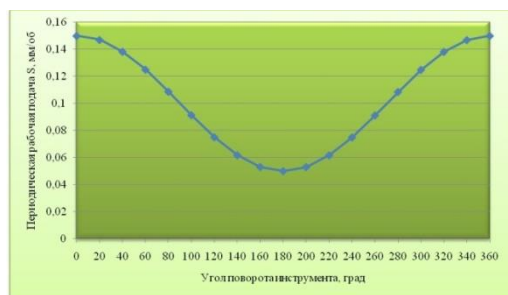


Рис. 4. Фактическая подача инструмента за один оборот
Fig. 4. Working tool feed in one turn

На рис. 5 показана конструкция подшипникового узла специальной сверлильной головки, позволяющего изменять амплитуду и фазу осевых колебаний инструмента. Для задания различных величин амплитуды осевых колебаний изготовлено несколько комплектов сменных колец 1 и втулок 2 с торцовыми биениями, обеспечивающими амплитуду осевых колебаний $\Delta S = 0,05-0,15$ мм. Таким образом, амплитуда колебаний ΔS инструмента приводит к изменению подачи в диапазоне от $S - \Delta S = 0,05$ мм/об до $S + \Delta S = 0,35$ мм/об за

один оборот инструмента. Фаза колебаний регулируется поворотом кольца 1.

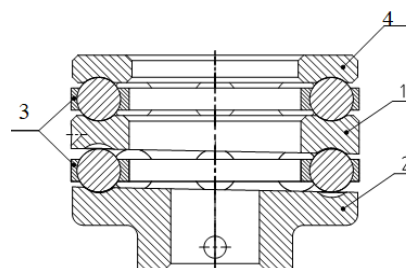


Рис. 5. Подшипниковый узел головки: 1 – сменное кольцо; 2 – нижняя неподвижная втулка; 3 – сепараторы; 4 – верхнее кольцо

Fig. 5. Bearing assembly of the head: 1 is a replaceable ring; 2 is a lower fixed sleeve; 3 are separators; 4 is an upper ring

Применяемый режущий инструмент:

- зенкер 1: $\varnothing 8$ мм, количество лезвий = 3, главные углы в плане режущих лезвий $\varphi 1 = 45^\circ$, $\varphi 2 = 40^\circ$, $\varphi 3 = 40^\circ$;
- зенкер 2: $\varnothing 8$ мм, количество лезвий = 3, главные углы в плане режущих лезвий $\varphi 1 = 40^\circ$, $\varphi 2 = 45^\circ$, $\varphi 3 = 45^\circ$;
- зенкер 3: $\varnothing 8$ мм, количество лезвий = 3, главные углы в плане режущих лезвий $\varphi 1 = 40^\circ$, $\varphi 2 = 45^\circ$, $\varphi 3 = 50^\circ$;
- зенкер 4: $\varnothing 8$ мм, количество лезвий = 3, главные углы в плане режущих лезвий $\varphi 1 = 45^\circ$, $\varphi 2 = 45^\circ$, $\varphi 3 = 45^\circ$.

На рис. 6 показаны зенкеры с разной заточкой углов в плане: зенкер 1: $\varphi 1 = 45^\circ$, $\varphi 2 = 40^\circ$, $\varphi 3 = 40^\circ$; зенкер 2: $\varphi 1 = 40^\circ$, $\varphi 2 = 45^\circ$, $\varphi 3 = 45^\circ$.

		$\varphi 1 = 45^\circ$, $\varphi 2 = 40^\circ$, $\varphi 3 = 40^\circ$.
		$\varphi 1 = 40^\circ$, $\varphi 2 = 45^\circ$, $\varphi 3 = 45^\circ$.

Рис. 6. Зенкеры с несимметричной заточкой главных углов в плане
Fig. 6. Countersinks with asymmetric sharpening of entering angles

В процессе проведения экспериментов варьировались такие параметры, как:

- 1) амплитуда осевых колебаний ΔS инструмента;
- 2) главные углы в плане ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 ;
- 3) положение наибольшего припуска в заготовке относительно режущих лезвий.

На станке 2A125 была установлена специальная сверлильная головка (рис. 7).



Рис. 7. Вертикально-сверлильный станок модели 2A125 с закрепленной на его шпинделе специальной сверлильной головкой
Fig. 7. Vertical drilling machine model 2A125 with a special drilling head fixed on its spindle

Определение фазы максимальной амплитуды производилось с помощью индикатора часового типа по конической оправке, вставляемой в сверлильную головку, как показано на рис. 8.

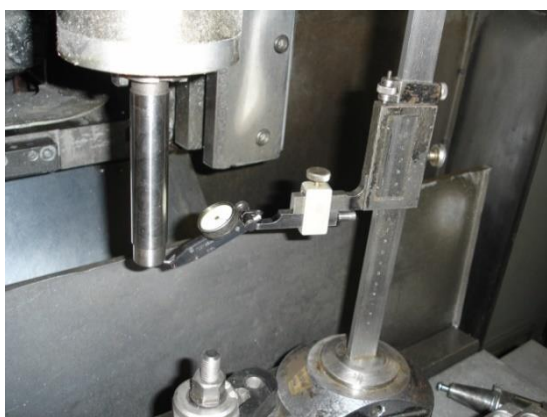


Рис. 8. Замер осевого биения, создаваемого сверлильной головкой
Fig. 8. Measurement of the axial runout generated by the drilling head

Затем на невращающейся части сверлильной головки, а именно на гильзе, была выполнена метка, которая обозначала положение максимальной подачи $S = S_0 + \Delta S$. Инструмент устанавливался в сверлильную головку так, чтобы лезвие, положение которого нужно задать, совпадало с положением метки на гильзе сверлильной головки. Фаза осевых колебаний определялась для того, чтобы определённым образом сориентировать заготовку относительно заданного лезвия инструмента в момент максимальной подачи $S = S_0 + \Delta S$.

Полученные результаты и их обсуждение

Эксперимент 1. Зенкерование проводим зенкером 1: $\varnothing 8$ мм, $\phi_1 = 45^\circ$, $\phi_2 = 40^\circ$, $\phi_3 = 40^\circ$. Заготовка и инструмент устанавливались так, чтобы сторона с наибольшим припуском по метке совпадала с лезвием 1 с главным углом в плане $\phi_1 = 45^\circ$ в момент максимальной подачи $S = S_0 + \Delta S$. Результаты эксперимента показаны на рис. 9. Здесь и далее синим цветом показаны значения увода оси отверстия после сверления, а коричневым – после зенкерования. Среднее значение уменьшения увода 43%.



Рис. 9. Результаты эксперимента 1
Fig. 9. Results of experiment 1

Эксперимент 2. Заготовка и инструмент устанавливались так, чтобы относительно наибольшего припуска лезвие 1 с главным углом в плане $\phi_1 = 45^\circ$ в момент максимальной подачи $S = S_0 + \Delta S$ было повернуто по часовой стрелке на 120° . Результаты эксперимента показаны на рис. 10. Среднее значение уменьшения увода 45%.



Рис. 10. Результаты эксперимента 2

Fig. 10. Results of experiment 2

Эксперимент 3. Заготовка и инструмент устанавливались так, чтобы относительно наибольшего припуска лезвие 1 с главным углом в плане $\phi 1 = 45^\circ$ в момент максимальной подачи $S = S_0 + \Delta S$ было повернуто по часовой стрелке на 240° . Результаты эксперимента показаны на **рис. 11**. Среднее значение уменьшения увода 51%.



Рис. 11. Результаты эксперимента 3

Fig. 11. Results of experiment 3

По результатам экспериментов 1-3 видно, что трехлезвийный инструмент с диссимметричной заточкой лезвий по схеме $\phi 1 = \text{maximum}$ и $\phi 2 = \phi 3$ дает наилучший результат 51% уменьшения увода оси отверстия при повороте лезвия с $\phi 1 = \text{maximum}$ на 240° относительно максимального припуска в момент максимальной фазы осевого колебания инструмента.

Эксперименты 4-6 проводились зенкером $\varnothing 8$ мм с углами лезвий $\phi 1 = 40^\circ$, $\phi 2 = 45^\circ$, $\phi 3 = 45^\circ$.

Эксперимент 4. Заготовка и инструмент устанавливались так, чтобы сторона с наибольшим припуском по метке совпадала с лезвием 1 с главным углом в плане $\phi 1 = 40^\circ$ в момент максимальной подачи $S = S_0 + \Delta S$. Результаты эксперимента показаны на **рис. 12**. Среднее значение уменьшения увода 68%.



Рис. 12. Результаты эксперимента 4

Fig. 12. Results of experiment 4

Эксперимент 5. Заготовка и инструмент устанавливались так, чтобы относительно наибольшего припуска лезвие 1 с главным углом в плане $\phi 1 = 40^\circ$ в момент максимальной подачи $S = S_0 + \Delta S$ было повернуто по часовой стрелке на 120° . Результаты эксперимента показаны на **рис. 13**. Среднее значение уменьшения увода 81%.



Рис. 13. Результаты эксперимента 5

Fig. 13. Results of experiment 5

Эксперимент 6. Заготовка и инструмент устанавливались так, чтобы относительно наибольшего припуска лезвие 1 с главным углом в плане $\phi 1 = 40^\circ$ в момент максимальной подачи $S = S_0 + \Delta S$ было повернуто по часовой стрелке на 240° . Результаты эксперимента показаны на **рис. 14**. Среднее значение уменьшения увода 26%.

По результатам экспериментов 4-6 видно, что трехлезвийный инструмент с диссимметричной заточкой главных углов в плане по схеме $\phi 1 = \text{minimum}$, $\phi 2 = \phi 3$ дает наилучший результат 81% уменьшения увода оси отверстия при повороте лезвия с $\phi 1 = \text{minimum}$ на 120° относительно максимального припуска в момент максимальной фазы осевого колебания инструмента.



Рис. 14. Результаты эксперимента 6

Fig. 14. Results of experiment 6

Эксперимент 7. Применялся режущий инструмент трехлезвийный зенкер: $\varnothing 8$ мм, главные углы в плане режущих лезвий $\varphi 1 = 45^\circ$, $\varphi 2 = 45^\circ$, $\varphi 3 = 45^\circ$. Результаты эксперимента показаны на рис. 15. Среднее значение уменьшения увода 28%.

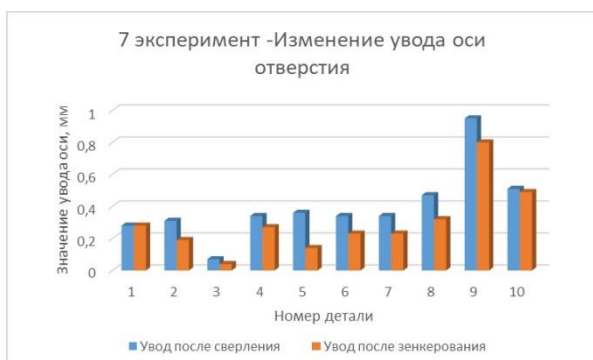


Рис. 15. Результаты эксперимента 7

Fig. 15. Results of experiment 7

Таблица. Результаты экспериментов

T a b l e. Experimental results

Вариант заточки инструмента	Значения главных углов инструмента в плане	Угол поворота режущего лезвия 1 с главным углом в плане $\varphi 1$ относительно наибольшего припуска в момент значения подачи $S = S_0 + \Delta S$	Достигнутое исправление увода, %
1	$\varphi 1 = \text{minimum } \varphi 2 = \varphi 3$	120°	81
2	$\varphi 1 < \varphi 2 < \varphi 3$	положение угла $\varphi 2 = 45^\circ$ напротив наибольшего припуска в момент максимального значения подачи $S = S_0 + \Delta S$	58
3	$\varphi 1 = \text{maximum } \varphi 2 = \varphi 3$	240°	51
4	$\varphi 1 = \varphi 2 = \varphi 3$	—	28

Аналогичные эксперименты были проведены с зенкером $\varnothing 8$ мм и главными углами в плане $\varphi 1 = 40^\circ$, $\varphi 2 = 45^\circ$, $\varphi 3 = 50^\circ$. Уменьшение увода оси отверстия достигалось от 28 до 58% (см. таблицу). При этом наибольшая величина уменьшения увода достигается при положении угла $\varphi 2 = 45^\circ$ напротив наибольшего припуска в момент максимального значения подачи $S = S_0 + \Delta S$.

Закключение

В результате анализа результатов экспериментальных исследований выявлены особенности применения трехлезвийного инструмента после сверления для уменьшения значения увода оси отверстия, полученного на предшествующем переходе. Наибольшее значение уменьшения увода дает применение инструментов с диссимметричной заточкой главного угла в плане. Для объяснения этой закономерности необходимо провести теоретические исследования, позволяющие разработать методику проектирования многопереходной обработки отверстий, которая позволит повысить точность и исключить необходимость применения дополнительных переходов и оборудования (операций координатного и алмазного растачивания).

Список источников

1. Аверченков В.И., Васильев А.С., Хейфец М.Л. Технологическая наследственность при формировании качества изготавливаемых деталей // Научно-технические технологии в машиностроении. 2018. №10. С. 27-32 с.
2. Баранов А.В., Карачев А.В. Определение технологической наследственности при обработке отверстий в деталях газотурбинных двигателей // Вестник машиностроения. 2021. №11. С. 37-42.
3. К вопросу об учете технологической наследственности при формировании свойств деталей / Гордеева Э.С., Богуцкий В.Б., Шрон Л.Б., Новоселов Ю.К. // Механика XXI века. 2018. №17. С. 248-254.
4. Дальский А.М., Базаров Б.М., Васильев А.С. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. М.: Изд-во МАИ, 2000. 344 с.
5. Дерябин И.П., Гузеев В.И., Кожарина О.А. Моделирование точности многопереходной обработки отверстий // Технология машиностроения. 2007. №11. С. 21-24.
6. Дерябин И.П., Гузеев В.И., Кожарина О.А. Исследования наследования погрешностей расположения осей отверстий при многопереходной обработке // Технология машиностроения. 2008. №6. С. 23-25.
7. Емельянов С.Г., Зубкова О.С., Мерзоева М.С. Эффективность использования сборных зенкоров со сменными многогранными пластинами // Вестник машиностроения. 2003. №12. С. 60-61.
8. Зайцев А.В., Колупаев Н.А. Методика расчета отклонений оси инструмента при обработке отверстий малого диаметра // Главный механик. 2020. №11. С. 24-30.
9. Расторгуев Г.А. Особенности технологического наследования в машиностроительном производстве // Инженерный журнал. 2013. №9(198). С. 8-17.
10. Токарев А.С., Дерябин И.П., Лопатин Б.А. Экспериментальное определение увода оси отверстий при обработке зенкером с МНП // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение» 2020. Т. 20. №1. С. 55-62.
11. manufactured parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2018;(10):27-32. (In Russ.)
12. Baranov A.V., Karachev A.V. Determination of technological heredity when machining holes in gas turbine engine parts. *Vestnik mashinostroyeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering]. 2021;(11):37-42. (In Russ.)
13. Gordeeva E.S., Bogutsky V.B., Shron L.B., Novoselov Yu.K. On the issue of factoring into technological heredity in the formation of properties of parts. *Mekhaniki XXI veka* [Mechanics of the 21st Century]. 2018;(17):248-254. (In Russ.)
14. Dalsky A.M., Bazarov B.M., Vasiliev A.S. *Tekhnologicheskaya nasledstvennost v mashinostroitel'nom proizvodstve* [Technological heredity in machine-building production]. Moscow: Publishing House of Moscow Aviation Institute, 2000, 344 p. (In Russ.)
15. Deryabin I.P., Guzeev V.I., Kozharina O.A. Modeling the accuracy of multi-pass hole machining. *Tekhnologiya mashinostroyeniya* [Technology of Mechanical Engineering]. 2007;(11):21-24. (In Russ.)
16. Deryabin I.P., Guzeev V.I., Kozharina O.A. Studies on inheritance of errors in the location of hole axes during multi-pass machining. *Tekhnologiya mashinostroyeniya* [Technology of Mechanical Engineering]. 2008;(6):23-25. (In Russ.)
17. Emelyanov S.G., Zubkova O.S., Merzhoeva M.S. Efficiency of using prefabricated countersinks with replaceable multi-faceted plates. *Vestnik mashinostroyeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering]. 2003;(12):60-61. (In Russ.)
18. Zaitsev A.V., Kolupaev N.A. Methodology for calculating tool axis deviations when machining small diameter holes. *Glavnyi mekhanik* [Chief Mechanic]. 2020;(11):24-30. (In Russ.)
19. Rastorguev G.A. Features of technological inheritance in machine-building production. *Inzhenernyi zhurnal* [Engineering Journal]. 2013;(9(198)):8-17. (In Russ.)
20. Tokarev A.S., Deryabin I.P., Lopatin B.A. Experimental calculation of the deviation of the hole axis when machining with countersinks with multi-faceted disposable plates. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroyenie»* [Bulletin of SUSU. Series: Mechanical Engineering]. 2020;20(1):55-62. (In Russ.)

References

1. Averchenkov V.I., Vasiliev A.S., Heifets M.L. Technological heredity in the formation of the quality of

Поступила 26.04.2023; принята к публикации 24.05.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 26/04/2023; revised 24/05/2023; published 25/09/2023

Дерябин Игорь Петрович – доктор технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: derigp@gmail.com.

Гузеев Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Технологии автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия. Email: guzeevvi@susu.ru.

Токарев Артем Сергеевич – кандидат технических наук, старший преподаватель,
Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ» (ТТИ НИЯУ «МИФИ»), Трехгорный, Россия.
Email: Tokarev_a_s91@mail.ru.

Igor P. Deryabin – DrSc (Eng.), Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: derigp@gmail.com.

Viktor I. Guzeev – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Mechanical Engineering Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. Email: guzeevvi@susu.ru.

Artem S. Tokarev – PhD (Eng.), Senior Lecturer, Trekhgorny Technological Institute – Branch of National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute, Trekhgorny, Russia.
Email: Tokarev_a_s91@mail.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.914
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-123-136



ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КОСОЗУБЫХ ЗУБЧАТЫХ ВЕНЦОВ ДИСКОВЫМИ И КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ НА ПЯТИКООРДИНАТНЫХ СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Кондрашов А.Г.¹, Сафаров Д.Т.¹, Фасхутдинов А.И.¹, Казаргельдинов Р.Р.²

¹ Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,
Набережные Челны, Россия

² ПАО «КамАЗ», Набережные Челны, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В конструкции современного большегрузного автомобиля сегодня присутствует очень широкая номенклатура зубчатых колес с нестандартным профилем. Изготовление опытных партий таких колес при традиционных подходах к подготовке производства требует больших временных и финансовых затрат на заказ, проектирование и изготовление специального зуборезного инструмента. Развитие многокоординатных станков с числовым программным управлением (ЧПУ) позволяет сегодня выполнить такую обработку универсальным инструментом. Выполнен обзор методов обработки зубчатых колес инструментом дискового типа – резцовыми головками и дисковыми фрезами при изготовлении зубчатых колес. Показаны недостатки рассмотренных методов при изготовлении опытных образцов венцов. Приведены алгоритмы расчета координат рабочих ходов инструмента. Приведены экспериментальные данные обработки зубчатого венца при поперечных и продольных рабочих ходах. Дана оценка погрешности профиля по данным измерений на зубоизмерительной координатно-измерительной машине. **Цель работы.** Снижение стоимости и сроков подготовки производства косозубых зубчатых венцов в условиях мелкосерийного и опытного производства с обеспечением производительности, сопоставимой с обработкой специализированным зуборезным инструментом. **Используемые методы.** Использованы математические методы матричных преобразований. **Новизна.** Впервые в отечественном автомобилестроении за счет возможностей современных пятикоординатных станков с ЧПУ реализована технология формообразования зубчатого венца универсальной дисковой фрезой, включающая обработку эвольвентных поверхностей, дна впадины, а также снятие фасок по кромкам зубьев. **Результат.** Разработанная технология обработки универсальна и обеспечивает высокую точность обработанного зубчатого венца, сравнимую с точностью обработки традиционными способами зубообработки – червячными фрезами или долбяками. **Практическая значимость.** Технология внедрена в процесс опытного производства косозубых зубчатых колес и позволяет сократить длительность подготовки производства новых зубчатых перетач с 2-3-х месяцев до 1-2-х часов за счет отсутствия затрат времени на изготовление специальных зажимных оправок и зуборезного инструмента.

Ключевые слова: цилиндрическая косозубая зубчатая передача, зубчатый венец, зуборезный инструмент, дисковая фреза, зубофрезерование, станок с ЧПУ

© Кондрашов А.Г., Сафаров Д.Т., Фасхутдинов А.И., Казаргельдинов Р.Р., 2023

Для цитирования

Технология формообразования косозубых зубчатых венцов дисковыми и концевыми фрезами на пятикоординатных станках с числовым программным управлением / Кондрашов А.Г., Сафаров Д.Т., Фасхутдинов А.И., Казаргельдинов Р.Р. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 123-136. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-123-136>



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

TECHNOLOGY OF FORMING OF HELICAL RING GEARS WITH DISK CUTTERS AND END MILLS ON FIVE-AXIS CNC MACHINES

Kondrashov A.G.¹, Safarov D.T.¹, Faskhutdinov A.I.¹, Kazargeldinov R.R.²

¹ Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

² PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The design of modern heavy-duty vehicles includes a very wide range of gears with a non-standard profile. The production of experimental batches of such gears, when applying conventional approaches to the preparation of production, requires much time and financial expenses for ordering, designing and manufacturing a special gear-cutting tool. The development of multi-axis machines with computer numerical control (CNC) provides for such machining with a universal tool. The paper presents a review of methods of machining gears with a disk-type tool, namely cutter heads and disk cutters, when manufacturing gears. It describes disadvantages of the methods under study, when manufacturing prototypes of ring gears. The authors present algorithms for calculating the axes of working strokes of the tool and experimental data on machining of ring gears with transverse and longitudinal working strokes. The paper contains an estimated error of the profile according to the measurement data on a tooth-measuring coordinate measuring machine. **Objectives.** The research is aimed at reducing the price and periods for preparing production of helical ring gears on small batch and pilot production, while ensuring performance compared with machining with special tooth cutting tools. **Methods Applied.** The authors applied mathematical methods of matrix transformations. **Originality.** For the first time, the domestic automotive industry used the technology of forming ring gears with a universal disk cutter due to the capabilities of modern five-axis CNC machines, including machining of evolverment surfaces and the tooth gullet, as well as chamfering along the edges of the teeth. **Result.** The developed technology of machining is universal, while ensuring high accuracy of machined ring gears compared with accuracy of machining with conventional methods of gear machining, namely with hobbing or gear-shaping cutters. **Practical Relevance.** The technology has been introduced into pilot production of helical ring gears to reduce the period of preparation for the production of new gears from 2-3 months to 1-2 hours as time is not spent on manufacturing special clamping mandrels and gear-cutting tools.

Keywords: cylindrical helical gear, ring gear, gear-cutting tools, disk cutter, gear milling, CNC machine

For citation

Kondrashov A.G., Safarov D.T., Faskhutdinov A.I., Kazargeldinov R.R. Technology of Forming of Helical Ring Gears with Disk Cutters and End Mills on Five-Axis CNC Machines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 123-136. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-123-136>

Введение

Разработка и выпуск новых узлов и агрегатов большегрузного автомобиля, в состав которых входят цилиндрические прямозубые и косозубые зубчатые передачи (редукторы, раздаточные коробки, коробки передач), представляет собой комплекс сложных инженерных задач. Конструкция автомобиля сегодня отличается от других видов техники очень широкой номенклатурой зубчатых колес с нестандартным профилем. Так, изготовление опытной партии коробки переключения передач сегодня потребует изготовления 30-40 партий уникальных зубчатых венцов с нестандартным модулем и исходным контуром (например, $m = 4,1$ мм, $\alpha = 17^\circ$). Традиционная подготовка производства потребует выполнить проектирование и изготовление специального зуборезного инструмента. Так, например, цена червячной зуборезной фрезы (для венцов с модулем 3,5-6 мм) может составлять в зависимости от

производителя 60-100 тыс. руб., а ожидание заказанного инструмента может продлиться от 6 до 12 месяцев, что в современных условиях совершенно недопустимо. Кроме этого, расходы на сам инструмент будут несоизмеримы с затратами на зубонарезание (обрабатывается партия 3-10 деталей), а возможность выработать полностью ресурс инструмента присутствует не всегда.

Современные возможности многокоординатных станков с ЧПУ позволяют выполнить обработку зубчатого венца стандартными дисковыми или концевыми фрезами. Конечно, в серийном производстве данные инструменты не могут конкурировать с инструментами червячного типа (как по производительности, так и по стойкости). В условиях обработки опытной партии применение стандартных дисковых фрез на станке с ЧПУ обеспечивает несомненные преимущества. Однако такой вид обработки требует от специалистов предприятия более высокой квалификации ввиду сложности задачи. В част-

ности, важно правильно построить 3D-модель зубчатого колеса, выбрать в САМ-системе инструмент и задать направление траекторий его перемещения, а в процессе обработки, обеспечить требуемую точность зуба. Методы и алгоритмы расчета координат точек траектории перемещения стандартного инструмента в отечественной и иностранной научной литературе раскрыты не в полной мере, что не позволяет обеспечить обработку опытных образцов венцов требуемой точности. Кроме этого, определенные трудности представляет компенсация погрешностей технологической оснастки при обработке зубчатого венца на станке с ЧПУ.

Распространенными методами зубообработки цилиндрических зубчатых колес на станках с ЧПУ общего назначения является обработка по методу копирования [1] однозубыми модульными или фасонными дисковыми фрезами [2-4], дуплексными и триплексными дисковыми фасонными фрезами [5]. Эти способы обработки могут применяться как для чистовой, так и для черновой обработки зубчатых венцов. В [5] рассматривается способ обработки фасонных профилей угловыми фрезами на примере винтовых канавок. По заданному профилю фрезы определяется профиль получаемой канавки при варьировании варметрами установки фрезы. Данный метод обработки может быть реализован на четырехкоординатном станке с ЧПУ для предварительного удаления материала из впадины зубчатого колеса при соответствующей его адаптации

и разработке специализированного инструмента.

При наличии специализированных зуборезных станков или специальных станков с ЧПУ с функцией обката возможен способ обработки зубчатых венцов цилиндрических колес двухрядными резцовыми головками [6, 7] (рис. 1). Этот метод обработки позволяет выполнить чистовую обработку зубьев. При высокой производительности требуется изготовление специальных резцовых головок.

Для обработки зубчатых колес вышеперечисленными методами необходимо выполнить проектирование, а затем изготовление специализированного инструмента с заданным профилем режущих кромок.

В [8-10] рассмотрен способ обработки и конструкция инструмента, обрабатывающего прямозубые цилиндрические крупномодульные зубчатые колеса обкатным методом на станках ЧПУ общего назначения. Этот метод является более универсальным, поскольку одним инструментом возможна обработка зубчатых колес с различным модулем и числом зубьев в заданных пределах (рис. 2, а). В [11] приведен пример черновой обработки впадин прямозубых цилиндрических зубчатых колес комплектом универсальных дисковых фрез, установленных на одной оправке (рис. 2, б). Этот метод применим как на станках с ЧПУ, так и на универсальных фрезерных станках, однако этим методом невозможно обработать косозубые цилиндрические колеса мелкого и среднего модуля.

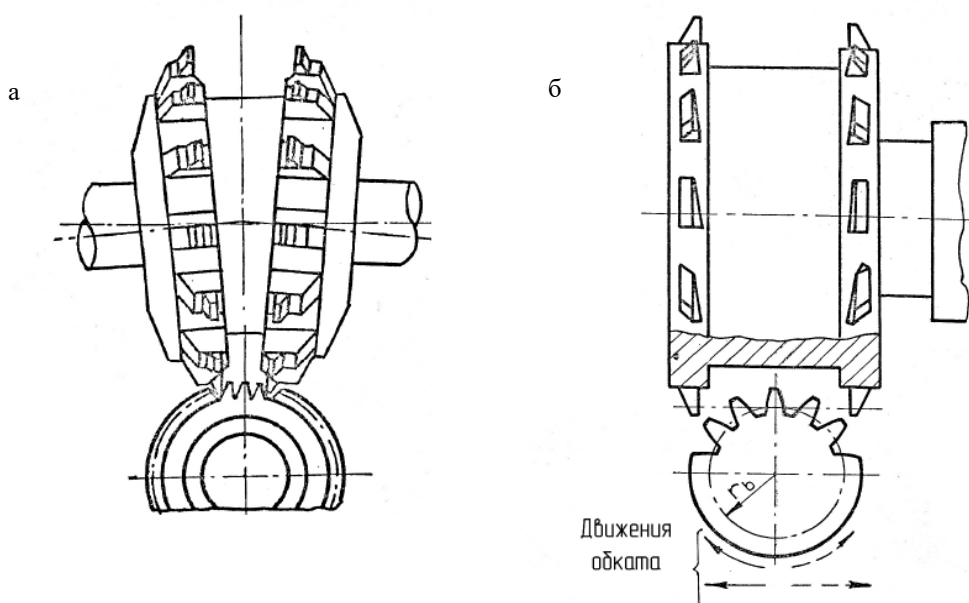


Рис. 1. Зубообработка резцовыми головками: а – с клиновой шайбой; б – с нулевым углом профиля [6]
Fig. 1. Tooth machining with cutter heads: a is with a beveled washer; б is with a zero angle of the profile [6]

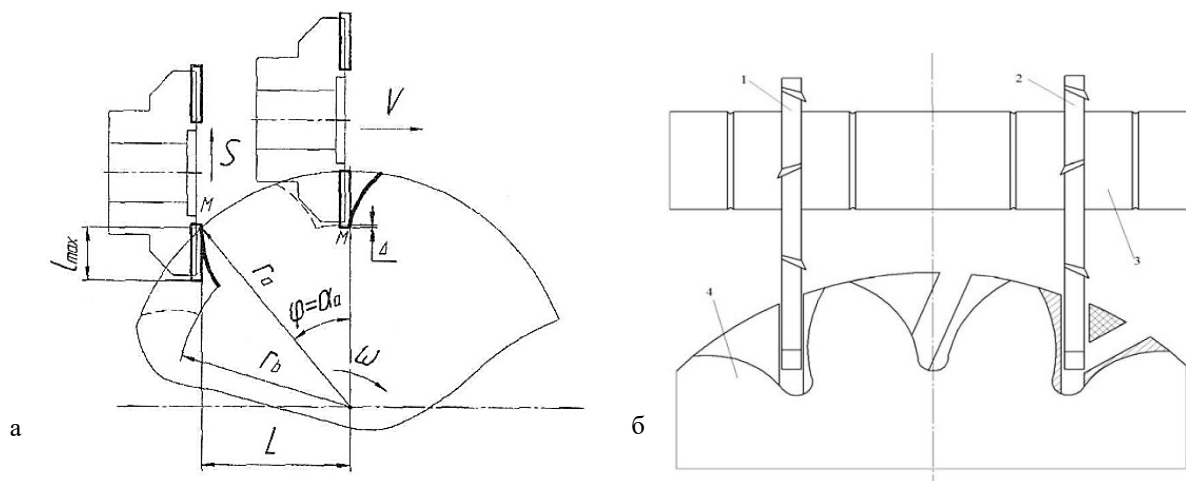


Рис. 2. Обработка впадин: а – специальной дисковой фрезой [10]; б – комплектом дисковых фрез [11]
 Fig. 2. Machining of gullets: a is with a special disk cutter [10]; б is with a set of disk cutters [11]

Следует отметить, что ни один из вышеприведенных методов не обеспечивает необходимой универсальности обработки цилиндрических косозубых колес различных конструктивных параметров без изготовления специализированного зуборезного инструмента.

В зарубежных изданиях тематика обработки зубчатых колес универсальным инструментом является актуальной и востребованной. В [13-19] отмечаются преимущества современных методов обработки на пятикоординатных станках с ЧПУ при обработке косозубых зубчатых колес. Наиболее известными методами подобной обработки, доведенной до промышленного применения, являются запатентованные фирмами-изготовителями режущего инструмента методы обработки gearMILL – обработка концевыми фрезами и InvoMilling – обработка преимущественно дисковыми фрезами.

Имеются отдельные публикации, рассматривающие только теоретические основы нахождения траекторий обработки, а также анализирующие геометрические параметры зубчатых колес от параметров процесса приведенными выше методами обработки зубчатых колес. Примером теоретических исследований обработки зубчатых колес на пятикоординатных станках является работа [16]. В работе приведены математические модели зубьев, но не приводятся экспериментальное подтверждение. Примером экспериментальных исследований являются работы [20, 21]. В них рассматриваются результаты измерений боковых поверхностей зубьев после обработки концевым инструментом, но не приводятся траектории перемещений инструмента. Опытные данные приведены для концевых фрез ограни-

ченной номенклатуры. По методу InvoMilling преобладают исследования анализа результатов обработки. Например, в [22] рассматриваются результаты обработки зубчатых венцов дисковым инструментом. В данной работе не исследован метод продольного срезания припуска при формировании впадин зубчатых колес. Встречаются исследования остаточных напряжений после обработки универсальными инструментами. Например, в [23] исследуются остаточные напряжения после обработки на 5-осевых обрабатывающих центрах крупногабаритных шестерен концевыми фрезами, авторами установлено влияние износа на остаточные напряжения на боковой поверхности зубьев зубчатых колес и влияние глубины резания по боковым сторонам на шероховатость поверхности. В статье не приводится схема рабочих перемещений инструмента, что не позволяет интерпретировать результаты исследования. Таким образом, имеющаяся в иностранной литературе информация свидетельствует о достаточной разработанности темы с отсутствием рассмотрения отдельных аспектов теоретических и экспериментальных исследований процесса. Обработка зубчатых венцов выполняется за счет реализации программного кода, запатентованных программных продуктов, например фирмы «Sandvik Coromant», рассчитывающих траектории перемещения инструментов для различных стоек ЧПУ.

Имеется ряд значительных недостатков использования таких программных продуктов производителями автокомпонентов, включающих зубчатые передачи. Траектории перемещений жестко привязаны к базам данных фирменного зарубежного инструмента, изменение парамет-

ров и координат перемещений задается шаблонами обработки и не может быть изменено. Режимы резания привязаны к геометрическим параметрам фирменного инструмента.

Таким образом, актуальность темы объясняется отсутствием комплексного подхода в обработке универсальным инструментом элементов зубчатого венца – эвольвентной поверхности, переходной кривой, впадины и фасок в соответствии с заданными конструктивными требованиями с максимально возможной производительностью обработки, отсутствием отечественного программного продукта, лишенного недостатков применения программных продуктов зарубежных производителей режущего инструмента.

Методы исследования

В случае обработки косозубых цилиндрических колес дисковых фрез необходим станок с ЧПУ с одновременно управляемыми пятью координатами – тремя поступательными и двумя вращательными. На нем необходимо обеспечить обработку не только эвольвентных боковых сторон, но и других элементов – переходной зоны, поверхности впадин, обеспечить обработку равномерной заходной фаски каждой впадины, то есть взаимосвязанную последовательность переходов, обрабатываемых универсальным инструментом с минимальным временем обработки. Разработанные переходы обработки можно отнести к дискретному способу обработки при непрерывном обкате [1] инструмента и заготовки. Обработка впадин зубчатого венца колеса выполняется по технологическому маршруту, приведенному в **табл. 1**, при этом обеспечивается минимальная длительность обработки и заданные параметры зубчатых венцов. Рабочие движения в переходах заданы из условия постоянства положения обрабатываемой впадины зубчатого колеса.

Основной объем материала удаляется прорезкой прямоугольной впадины зуба в нормальном сечении. Затем выполняется получистовой переход фрезерования боковых поверхностей впадин – правой и левой. В результате формируется ступенчатый равномерный припуск по боковым сторонам впадины под чистовое фрезерование. Далее следует чистовой переход фрезерования профиля зубчатого колеса, в результате которого формируется теоретический эвольвентный профиль впадин зубчатого колеса с припуском под чистовое шлифование, если оно предусмотрено после термообработки полуфабриката зубчатого колеса.

Этот переход может выполняться двумя различными способами – продольным перемещением цилиндрической фрезы вдоль линии направления зуба либо поперечным перемещением. Все вышеперечисленные переходы могут выполняться одной и той же прямоугольной цилиндрической фрезой.

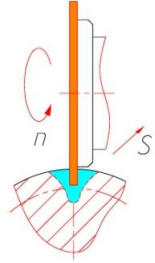
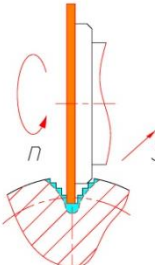
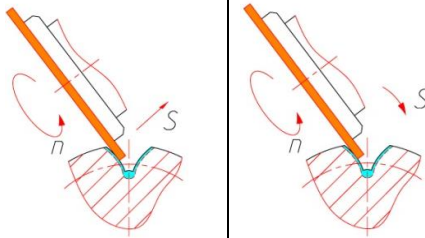
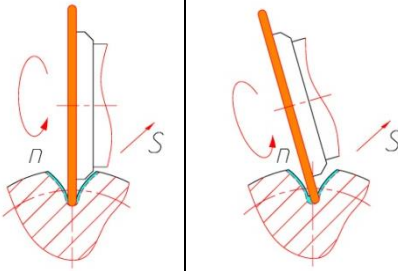
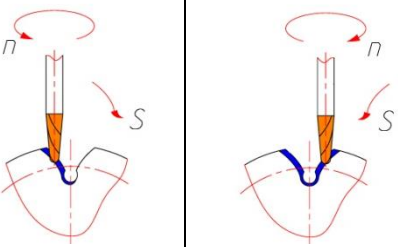
Переходная кривая впадины фрезеруется цилиндрической фрезой с радиусной режущей частью без поднутрения и с поднутрением для обеспечения возможности выхода круга в процессе следующей зубошлифовальной операции. На заключительном переходе по торцевым кромкам впадин зубьев с двух сторон фрезеруется фаска. Для расчета траекторий инструмента введена система координат, связанная с обрабатываемой впадиной P_H , P_E , P_B (**рис. 3**). Дополнительно к трем линейным координатам положение инструмента определяется двумя угловыми координатами – γ_B и γ_E , отражающими поворот относительно осей P_B и P_E соответственно. В зависимости от требований к точности обработки выбирается количество траекторий (слоев) – NT и количество точек одной траектории – NP . Вид перехода, тип применяемого инструмента и величина припуска определяют координаты точек траекторий в системе координат обрабатываемой впадины, пример точка $M11$ (**рис. 3, а**).

Как правило, пятикоординатная обработка выполняется в режиме «управления вершиной инструмента». В этом режиме поворот заготовки приводит к корректировке линейных координат. Для этой цели в блок-схеме на **рис. 4** предусмотрен поворот системы координат P_H , P_E , P_B с переходом в систему координат станка XYZ (**рис. 3, б**). Поэтому расчет координат точек траекторий обработки выполняется в несколько этапов (см. **рис. 4**):

- расчет координат точек торцевого профиля зуба и его отрисовка;
- выбор инструмента, схемы обработки и параметров режима резания из базы данных;
- расчет координат точки траектории в системе координат впадины;
- пересчет координат с учетом режима отслеживания вершины режущего инструмента при 5-координатной обработке.

Для автоматизации алгоритма расчета траекторий обработки зубьев универсальным инструментом и разработки управляющих программ станка с ЧПУ разработан программный модуль на языке программирования Delphi, основное окно ввода данных и визуализации координат рабочих ходов приведено на **рис. 5**.

Таблица 1. Технологический маршрут фрезерования впадины зубчатого колеса дисковыми и концевыми фрезами
Table 1. The process flow of milling gear gullets with disk cutters and end mills

№ п/п	Технологический переход	Назначение перехода	Рабочие движения	Инструмент/режим резания
1	Черновая прорезка впадины	Удаление максимально возможного припуска из впадины зуба		Coromill 162 $t = 3 \text{ мм}$ $S_z = 0,08 \text{ мм/зуб}$ $V = 190 \text{ м/мин}$
2	Получистое фрезерование боковых поверхностей зубьев	Ступенчатое удаление припуска во впадине с припуском под получистовое фрезерование		Coromill 161 $t = 1,5 \text{ мм}$ $S_z = 0,08 \text{ мм/зуб}$ $V = 150 \text{ м/мин}$
3	Чистовое фрезерование боковых поверхностей зуба	Формообразование теоретического профиля боковой поверхности зуба с припуском под зубошлифование		Coromill 161 $t = 1,5 \text{ мм}$ $S_z = 0,06 \text{ мм/зуб}$ $V = 180 \text{ м/мин}$
4	Фрезерование по дну впадины зуба	Формообразование радиусной поверхности по дну впадины		Coromill 161 $t = 0,5 \text{ мм}$ $S_z = 0,08 \text{ мм/зуб}$ $V = 180 \text{ м/мин}$
5	Фрезерование фаски по кромкам впадины	Формообразование фаски по боковой кромке впадин зубьев		Coromill Plura R216.42-04030-AC30G $t = 0,3 \text{ мм}$ $S_z = 0,04 \text{ мм/зуб}$ $V = 120 \text{ м/мин}$

Примечание. t , S_z , V – глубина резания, подача на зуб и скорость резания соответственно. Значения параметров режима резания выбраны по [12].

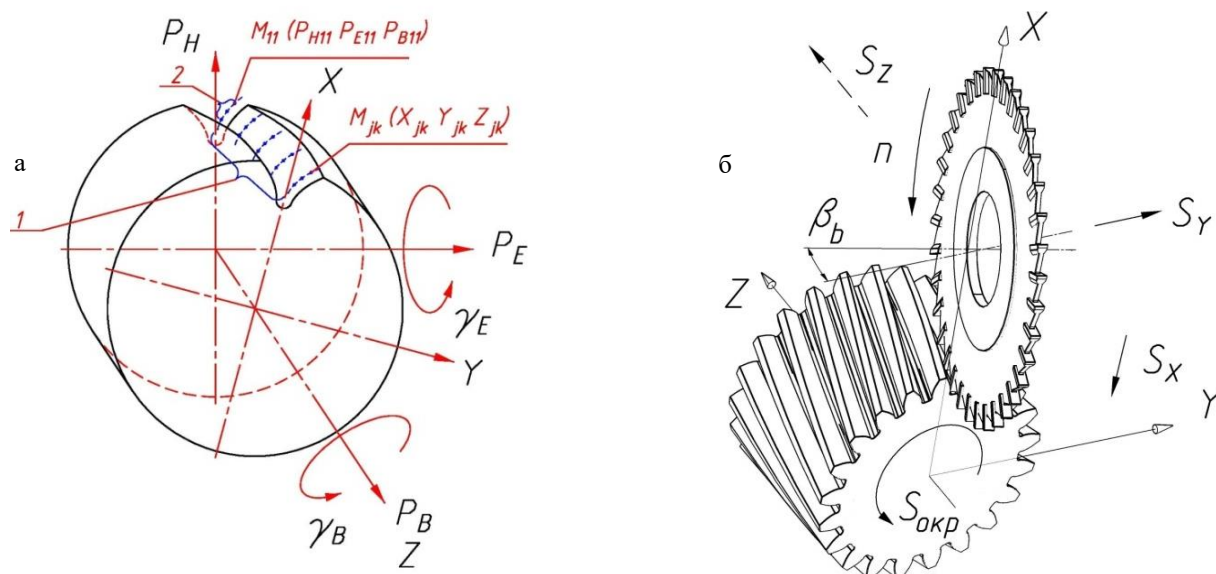


Рис. 3. Схема координат обрабатываемой впадины (а) и станка (б): 1 – траектории перемещения инструмента; 2 – точки траекторий

Fig. 3. The scheme of coordinates of gullets under machining (a) and the machine (б): 1 is tool paths; 2 are path points

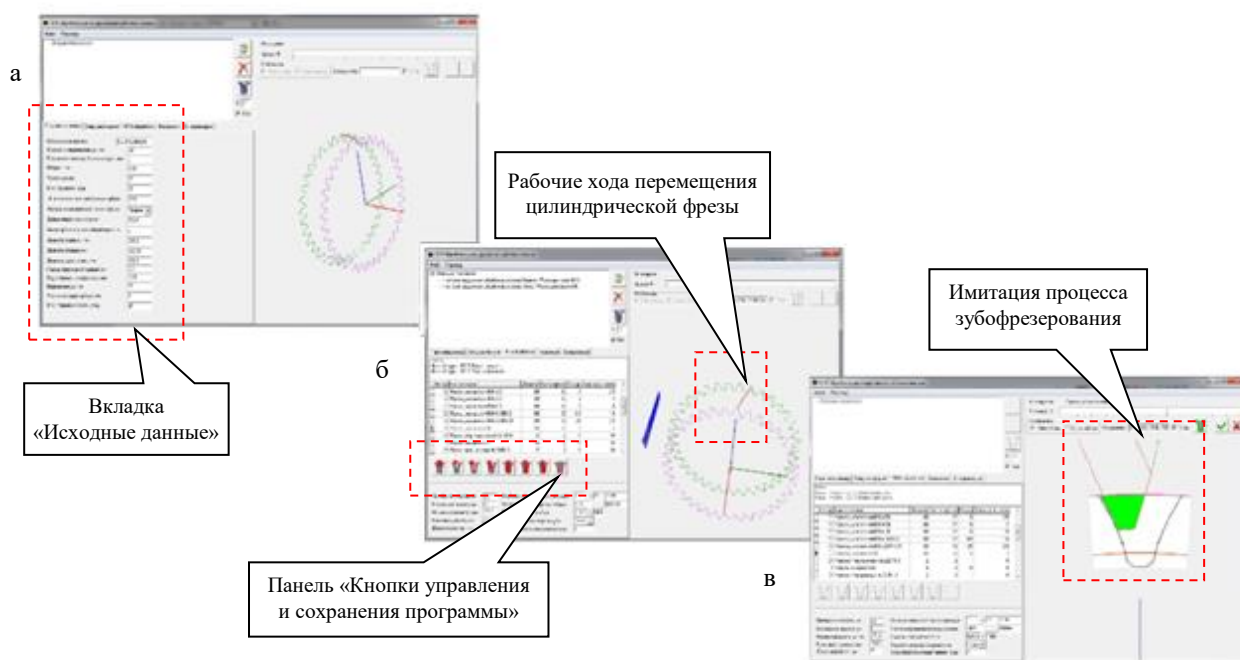


Рис. 5. Программный модуль разработки управляющих программ станка с ЧПУ обработки косозубых цилиндрических колес дисковыми и концевыми фрезами: а – окно ввода входных данных; б – окно расчета, просмотра траекторий базовых точек фрезы и сохранения управляющей программы ЧПУ; в – окно имитации процесса обработки впадины зубчатого колеса

Fig. 5. Software module for the development of control programs of a CNC machine for machining cylindrical helical gears with disk cutters and end mills: а is a window for entering input data; б is a window for calculating, viewing the paths of the base points of the milling cutter and saving the control program of CNC; в is a window for simulating a gear gullet machining process

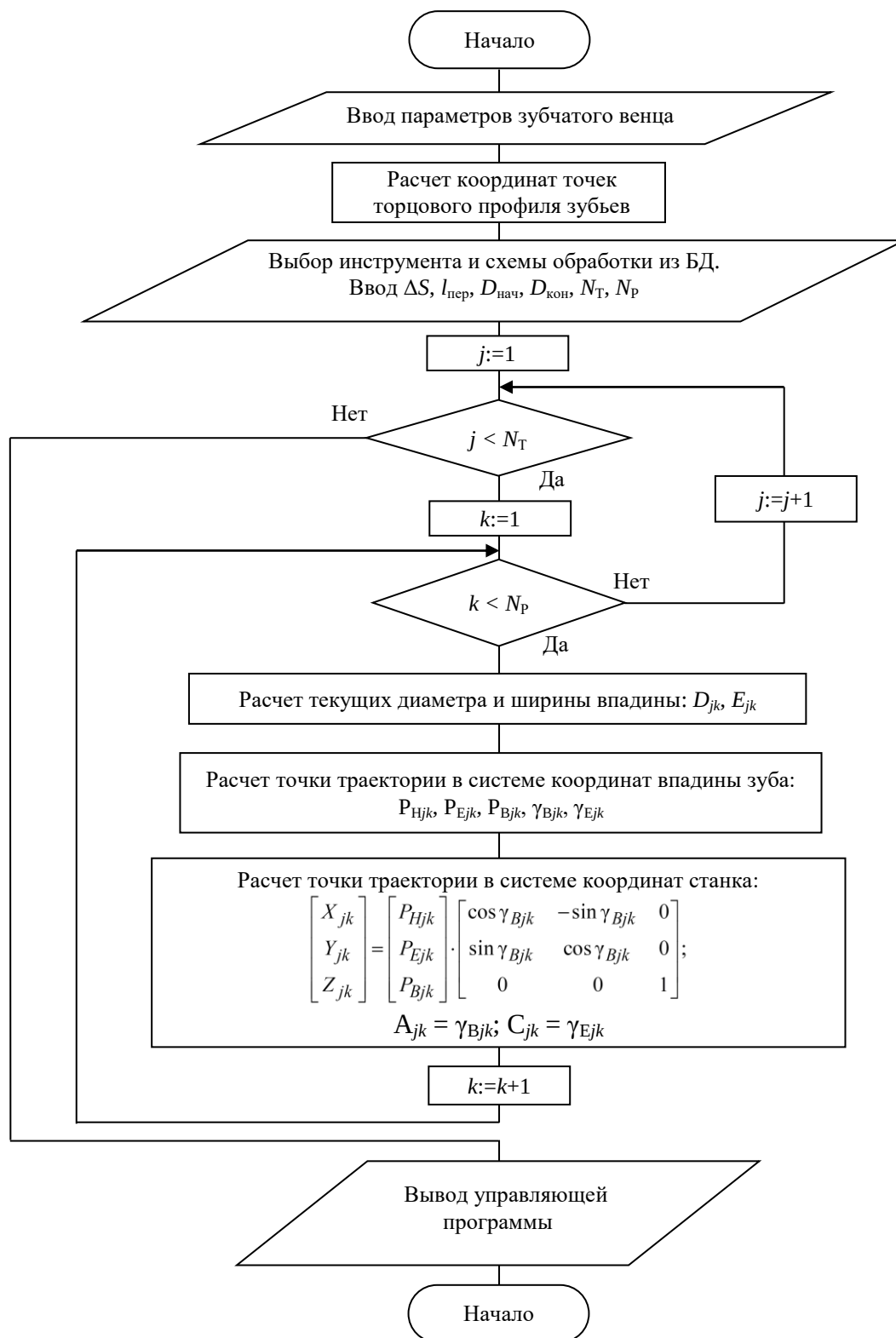


Рис. 4. Алгоритм расчета траекторий обработки зубьев универсальным инструментом на станке с ЧПУ
Fig. 4. An algorithm for calculating paths of tooth machining with a universal tool on a CNC machine

Входными данными являются параметры зубчатого колеса, на выходе же формируется текстовый файл управляющей программы для станка. Проверка правильности назначения параметров обработки выполняется в окне имитации процесса обработки впадины зубчатого колеса.

Результаты исследования и их обсуждение

Проверка теоретических положений прове-

дена при обработке зубчатого вала автоматической коробки переключения передач большегрузного автомобиля. Параметры зубчатого венца приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, венец имеет нестандартный модуль и исходный контур, что не позволяет осуществить подбор стандартной червячной фрезы. Заказ специального инструмента приведет к потерям времени (4-6 месяцев) и затратам (до 100 тыс. руб.).

Таблица 2. Параметры зубчатого венца

Table 2. Ring gear parameters

Параметр		Обозначение	Величина
Модуль нормальный		m_n	4,35
Число зубьев		z	23
Угол наклона винтовой линии зубьев		β	$22^\circ 30'$
Направление наклона винтовой линии зубьев		—	Левое
Нормальный исходный контур	Угол профиля	α	24°
	Коэффициент высоты головки	h_a^*	1,14
	Коэффициент высоты ножки	H_f^*	1,36
	Коэффициент радиального зазора	c^*	0,3
	Коэффициент радиуса кривизны	ρ_f^*	0,367
Коэффициент смещения		x	-0,087
Делительный диаметр		D	107,324
Основной диаметр		D_b	94,213
Диаметр вершин зубьев		D_a	$111,27_{-0,14}^{+0,14}$
Ширина зубчатого венца		B	64
Степень точности по ГОСТ ИСО 1328-2017		—	7
Допуск на погрешность профиля		$F_{\alpha T}$	0,019
Допуск на погрешность направления зуба		$F_{\beta T}$	0,020
Радиальное биение зубьев		F_{RT}	0,037
Погрешность окружного шага		f_p	0,013
Накопленная погрешность окружного шага		F_p	0,041
Длина общей нормали		W	$43,54_{-0,18}^{+0,08}$
Число зубьев на длине общей нормали		Z_W	4
Материал детали		—	18ХГР
Толщина центованного слоя		$h_{ц}$	0,6-1,0
Твердость поверхности		H_n	59-63HRC
Прочность сердцевины		σ_c	1000 Н/мм ²

Экспериментальная обработка реализована на пятикоординатном токарном обрабатывающем центре с ЧПУ фирмы «Mazak». Обработка выполняется дисковыми фрезами фирмы «Sandvik Coromant». Черновая обработка впадин зубчатого колеса выполняется фрезой Coromill 162, чистовая обработка фрезой Coromill 161 (рис. 6).

Технологические возможности данного станка позволяют обработать этими фрезами как отдельные шестерни, так и вал-шестерни. На рис. 7 показан процесс обработки вала-шестерни с косозубым цилиндрическим венцом чистовой фрезой модели Coromill 161 (диаметр 80 мм, 12 зубьев, материал неперетачиваемых пластин 1025, P10).

Проверка полученных геометрических показателей зубчатых колес выполняется на специализированной зубоизмерительной машине «Gleason». Характерные профилограммы профилей зубьев обработанных зубчатых колес приведены на рис. 8. В зависимости от движений фрезы в чистовом переходе обработки поверхностей зубчатых колес характер профиля отличается. При продольном перемещении дисковой фрезы на эвольвентном профиле формируются характерные следы (рис. 8, а) величиной 0,029-0,043 мм.

Полученная погрешность формы профиля является следствием значительных продольных рисков от инструмента на боковых сторонах зубьев. Данная погрешность допустима для предварительного нарезания зубьев под последующее шлифование (величина припуска на сторону под шлифование составляет величину от 0,12-0,15 мм). Остальные погрешности зубчатого венца не превышают требований по 7-й степени точности.

При поперечном перемещении дисковой фрезы погрешность формы профиля незначительна (рис. 8, б), ее величина до 0,005 мм. Поперечное перемещение фрезы формирует значительно более точный эвольвентный профиль. По результатам поперечной обработки погрешности зубчатого венца не превышают требований по 6-й степени точности. Шероховатость боковых сторон зубьев составила Ra 1,25 по высоте профиля и Ra 0,4 по ширине венца. Обработка поперечным перемещением дисковой фрезы увеличивает длительность процесса обработки до 1,5 раз по сравнению с обработкой только продольными перемещениями фрезы, что необходимо учитывать при утверждении оптимального процесса обработки зубчатых колес.

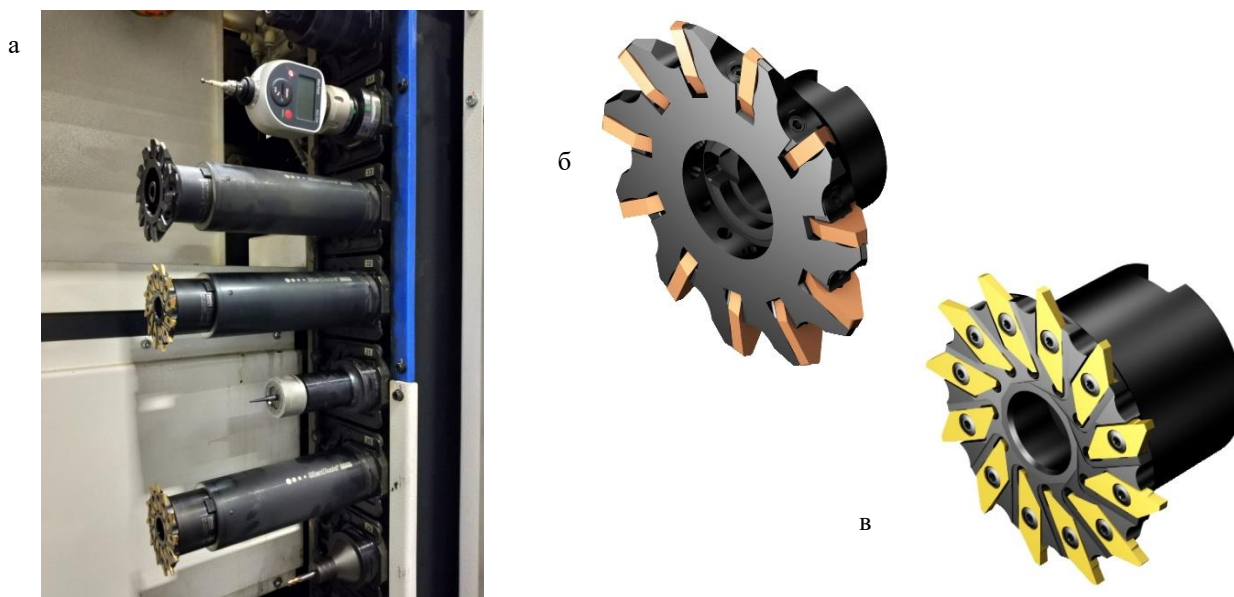


Рис. 6. Дисковые фрезы производства Sandvik Coromant для обработки впадин зубьев: а – установленные в инструментальном магазине станка Integrex I300S фирмы «Mazak»; б – фреза Coromill 162; в – фреза Coromill 161

Fig. 6. Disk cutters by Sandvik Coromant for gear gullet machining: а are installed in a tool storage device of the Integrex I300S machine by Mazak; б is Coromill 162 cutter; в is Coromill 161 cutter

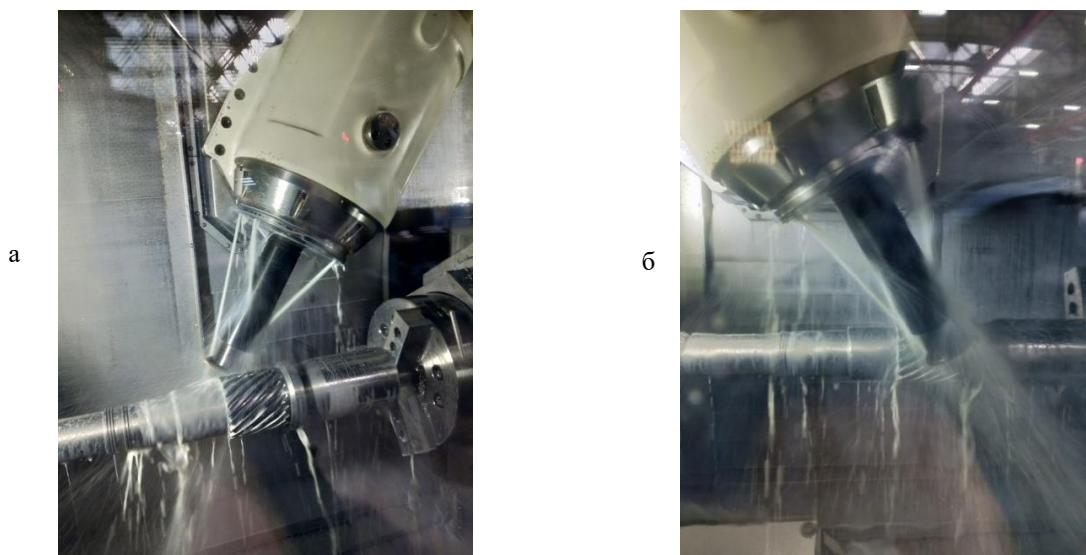


Рис. 7. Чистовая обработка впадин зубчатого венца опытной детали дисковой фрезой Coromill 161 при поперечном перемещении: а – по левой стороне; б – по правой стороне впадины зубчатого колеса
Fig. 7. Finishing of ring gear gullets of an experimental part with a Coromill 161 disk cutter, when moving transversely: а is on the left side; б is on the right side of gear gullets

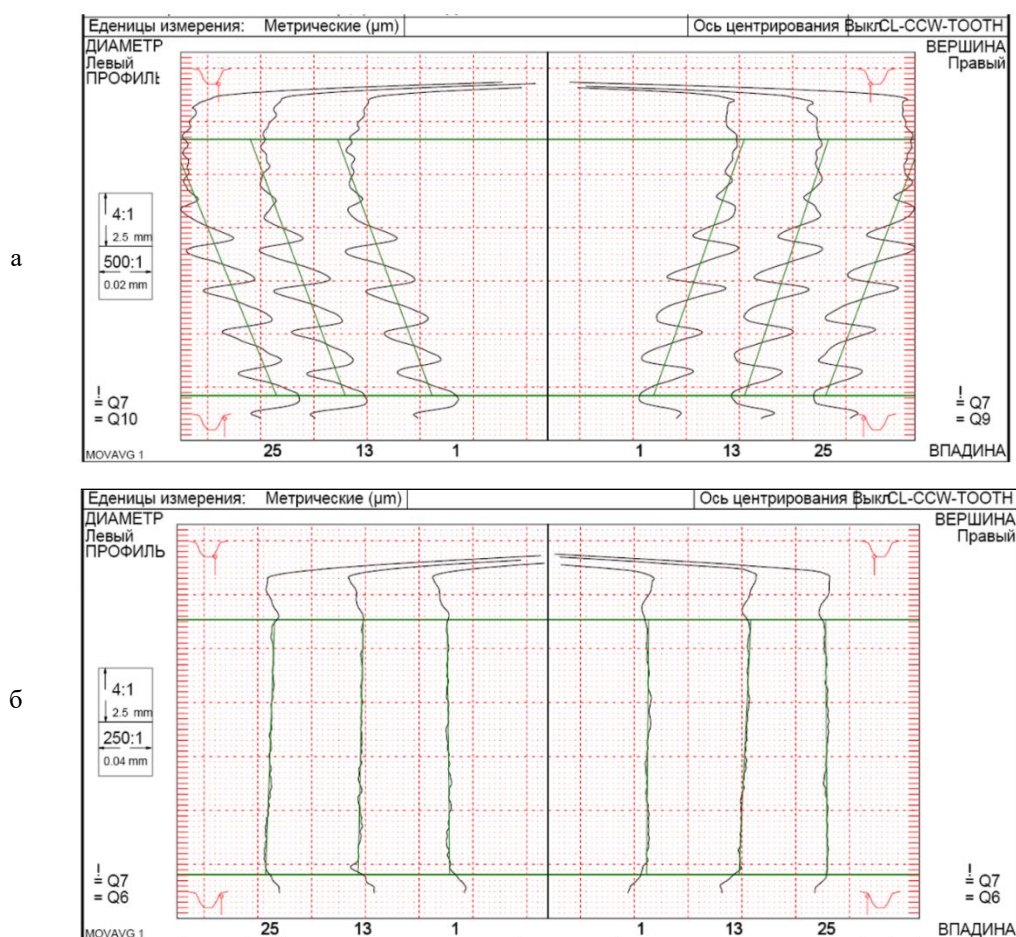


Рис. 8. Профилограммы эвольвентного профиля косозубых цилиндрических колес, обработанных при перемещениях дисковой фрезы: а – продольном; б – поперечном
Fig. 8. Profilograms of the involute profile of cylindrical helical gears machined, when moving the disk cutter: а is longitudinally; б is transversely

Заключение

Таким образом, впервые в отечественном автомобилестроении разработана технология изготовления, а также программный модуль, позволяющий сформировать управляющие программы обработки косозубых и прямозубых цилиндрических венцов (в том числе многовенцовых валов-шестерен) универсальным дисковым инструментом. Формирование управляющих программ может быть выполнено наладчиком или технологом непосредственно на рабочем месте.

По точности геометрических показателей зубчатых венцов данный способ превосходит способы обработки дисковыми модульными фрезами и другим универсальным инструментом и не уступает фрезерованию червячными зуборезными фрезами. При наличии в станочном парке предприятия пятикоординатного станка с ЧПУ обработку опытных партий зубчатых венцов (по 3-10 шт.) целесообразнее обрабатывать стандартным дисковым инструментом. Типовой проблемой подготовки производства изготовления узлов с зубчатыми передачами является необходимость изготовления специализированного зубчатого инструмента.

В условиях крупного машиностроительного предприятия необходимо проектирование, открытие заказа и изготовление специализированного зуборезного инструмента (червячные фрезы и зубофасочные фрезы, долбяки, обкаточные резцы), инструментальной и заготовительной оснастки в зависимости от параметров изготавливаемого зубчатого колеса, которое занимает от 3-х до 6-ти месяцев. В отдельных случаях заказы размещаются у иностранных производителей инструмента. Стоимость изготовления фрез может достигать от 50 до 300 тыс. руб. Например, освоение автоматической коробки передач потребовало изготовления 80-ти вариантов зубчатых венцов на различных деталях – шестернях, вал-шестернях и синхронизаторах в количестве от 5 до 10 шт. Применение разработанной программы позволило полностью избежать изготовления специализированного инструмента и инструментальной оснастки. Для рассматриваемого примера подготовки производства изготовления КПП обеспечена экономия средств около 9 млн руб. и сокращение сроков изготовления опытных коробок от 6-ти месяцев до года.

Список источников

1. Лелюхин В.Е. Классификация методов формообразования поверхностей при изготовлении деталей //

Вестник инженерной школы ДВФУ. 2012. №1(10). С. 14-17.

2. Козлов А.М., Савенков Д.Р., Козлов А.А. Расчет и проектирование модульных фрез для обработки крупномодульных зубчатых колес // Современные материалы, техника и технологии. 2019. №2(23). С. 26-33.
3. Козлов А.М., Савенков Д.Р. Расширение технологических возможностей универсального зубофрезерного станка при нарезании крупномодульных зубчатых колес // Современные материалы, техника и технологии. 2018. №6(21). С. 25-31.
4. Протасьев В.Б., Истоцкий В.В., Козлова О.В. Концевая однозубая модульная фреза для финишной обработки зубчатых колес // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 8. С. 232-237.
5. Ляшков А.А. Формообразование винтовой поверхности детали угловой фрезой // Инженерный вестник Дона. 2012. №3(21). С. 331-335.
6. Малахов Г.В., Михайлов А.В., Савичев И.А. Исходные технологические параметры зубообработки двухрядными резцовыми головками // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 8. Ч. 1. С. 117-125.
7. Малахов Г.В., Михайлов А.В., Савичев И.А. Схемы чистовой зубообработки резцовыми головками методами огибания // Известия ТулГУ. 2016. (08). Ч. 1. С. 110-116.
8. Балков В.П. Современные технологические подходы при изготовлении цилиндрических зубчатых колес в условиях мелкосерийного производства и особенности расчета и проектирования зуборезного инструмента / Каменецкий Л.И., Кирютин А.С., Негинский Е.А., Отт О.С., Пищулин Д.Н. // Металлообработка. 2015. №4(88). С. 2-6.
9. Артюхин Л.Л. Создание высокоэффективного специального инструмента для обработки крупномодульных зубчатых колес / Ветрова Н.А., Отт О.С., Надольский М.А. // Наука и образование. 2012. №9. С. 61-68.
10. Отт О.С. Разработка сборных дисковых фрез с кинематическим обкаточным движением для обработки зубчатых колес крупного модуля на станках с ЧПУ; автореф. ... канд. техн. наук. М.: Станкин, 2011. С. 24.
11. Игнатьева А.П. Повышение эффективности предварительной обработки крупномодульных малозубых колес // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. №3(08). С. 296-298.
12. Каталог Sandvik Coromant. Фрезерование – 2019. 245 с.
13. Хаятт Г. и др. Обзор новых стратегий производства зубчатых колес // Procedia CIRP. 2014, vol. 14, pp. 72-76.
14. Cichosz P. of article: „Innowacyjne narzędzia i technologie obróbki skrawaniem” (“Innovative machining tools and technologies”) // Mechanik. 2018, vol. 91, no. 10, pp. 794-802.

15. Gosselin C. Multi axis CnC manufacturing of straight and spiral bevel gears // *Advanced Gear Engineering*. 2018, pp. 167-204.
16. Буке Дж. и др. Быстрое изготовление прототипов зубчатых колес – сравнение технологий // *Procedia CIRP*. 2014, vol. 14, pp. 77-82.
17. Клоке Ф., Брум М., Штаудт Дж. Качество и поверхность зубчатых колес, изготовленных фрезерованием произвольной формы стандартными инструментами // *Материалы международной конференции по зубчатым колесам, Лион, Франция. Лион, 2014. С. 26-28.*
18. Сокращение времени изготовления за счет высокоточного 5-осевого фрезерования прототипа зубчатого колеса / Малек О., Мельник К., Мартенс К., Джейкобс Т., Буке Дж., Ауверс У., Хааф П.Т., Лауверс Б. // *Материалы 7-й конференции CRIP по высокопроизводительному резанию НРС, Хемниц, Германия, 31 мая – 2 июня 2016 года. Хемниц, 2016. Т. 46. С. 440-443.*
19. Гайзер У. Производство 5-осевых зубчатых колес становится практичным // *Технология зубчатых колес*. 2017. С. 32-34.
20. Chlost M., Gdula M. A new method of the positioning and analysis of the roughness deviation in five-axis milling of external cylindrical gear // *acta mechanica et automatica*. 2022, vol. 16, no. 3, pp. 207-214.
21. Бергс Т. и др. Исследования по пятиосевому фрезерованию и последующему пятиосевому шлифовку зубчатых колес // *Procedia CIRP*. 2022. Т. 107. С. 705-711.
22. Глейзер Т. и др. Жесткая обработка цилиндрических зубчатых колес методом invomillingtm // *Журнал по производству и обработке материалов*. 2018. Т. 2. №3. С. 44.
23. Захерт С. и др. Оценка влияния различных параметров фрезерования и износа инструмента на зону обода 5-осевой фрезерованной крупной шестерни // *Procedia CIRP*. 2022. Т. 108. С. 43-48.
5. Lyashkov A.A. Shaping of the screw surface of a part with an angle cutter. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Journal of the Don]. 2012;(3(21)):331-335. (In Russ.)
6. Malakhov G.V., Mikhailov A.V., Savichev I.A. Initial technological parameters of tooth machining with two-row cutter heads. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences]. 2016;(8):117-125. (In Russ.)
7. Malakhov G.V., Mikhailov A.V., Savichev I.A. Flow charts of finishing tooth machining with cutter heads by bending methods. *Izvestiya TulGU* [Proceedings of Tula State University]. 2016;(08):110-116. (In Russ.)
8. Balkov V.P., Kamenetsky L.I., Kiryutin A.S., Neginsky E.A., Ott O.S., Pishchulin D.N. Modern technological approaches to manufacturing cylindrical gears in small-scale production and features of calculation and design of gear-cutting tools. *Metalloobrabotka* [Metal Forming]. 2015;(4(88)):2-6. (In Russ.)
9. Artyukhin L.L., Vetrova N.A., Ott O.S., Nadolsky M.A. Design of a highly efficient special tool for machining coarse-pitch gears. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education]. 2012;(9):61-68. (In Russ.)
10. Ott O.S. *Razrabotka sbornikh diskovykh frez s kinematicheskim obkatochnym dvizheniem dlya obrabotki zubchatykh koles krupnogo modulya na stankakh s ChPU; avtoref. ... kand. tekhn. nauk* [Development of interlocking side milling cutters with a kinematic rolling motion for CNC machining of coarse-pitch gears: extended abstract of the PhD (Eng.) thesis]. Moscow: STANKIN, 2011, 24 p. (In Russ.)
11. Ignatieva A.P. Improving efficiency of pretreatment of coarse-pitch small-toothed gears. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Currently Relevant Issues of Aviation and Cosmonautics]. 2013;(3(08)):296-298. (In Russ.)
12. *Katalog Sandvik Coromant. Frezerovanie – 2019.* [Sandvik Coromant catalog. Milling – 2019]. 245 p. (In Russ.)
13. Hyatt G. et al. A review of new strategies for gear production. *Procedia CIRP*. 2014;14:72-76.
14. Cichosz P. Innovative machining tools and technologies. *Mechanik*. 2018;91(10):794-802.
15. Gosselin C. Multi axis CNC manufacturing of straight and spiral bevel gears. *Advanced Gear Engineering*. 2018: 167-204.
16. Bouquet J. et al. Fast production of gear prototypes – A comparison of technologies. *Procedia CIRP*. 2014;14:77-82.
17. Klocke F., Brumm M., Staudt J. Quality and surface of gears manufactured by free form milling with standard tools. *Proceedings of the International Conference on Gears, Lyon, France*. 2014:26-28.
18. Malek O., Mielnik K., Martens K., Jacobs T., Bouquet J., Auwers W., Haaf P.T., Lauwers B. Lead time reduction by high precision 5-axis milling of a prototype gear. *Procedia CIRP*. 2016;46:440-443.

References

1. Lelyukhin V.E. Classification of methods of forming surfaces in manufacturing of parts. *Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU* [Bulletin of School of Engineering of Far Eastern Federal University]. 2012;(1(10)):14-17. (In Russ.)
2. Kozlov A.M., Savenkov D.R., Kozlov A.A. Calculation and design of gear-milling cutters for machining coarse-pitch gears. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii* [Modern Materials, Machinery and Technologies]. 2019;(2(23)):26-33. (In Russ.)
3. Kozlov A.M., Savenkov D.R. Expansion of technological capabilities of a universal gear milling machine, when cutting coarse-pitch gears. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii* [Modern Materials, Machinery and Technologies]. 2018;(6(21)):25-31. (In Russ.)
4. Protasyev V.B., Istotsky V.V., Kozlova O.V. End single-tooth gear-milling cutters for finishing of

19. Gaiser U. 5-axis gear manufacturing gets practical. Gear Technology. 2017:32-34.
20. Chlost M., Gdula M. A new method of the positioning and analysis of the roughness deviation in five-axis milling of external cylindrical gear. Acta Mechanica et Automatica. 2022;16(3):207-214.
21. Bergs T. et al. Investigations on five-axis milling and subsequent five-axis grinding of gears. Procedia CIRP. 2022;107:705-711.
22. Glaser T. et al. Hard machining of spur gears with the InvoMilling™ method. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2018;2(3):44.
23. Zachert C. et al. Evaluation of the influence of different milling parameters and tool wear on the rim area of a 5-axis milled large gear. Procedia CIRP. 2022;108:43-48.

Поступила 08.06.2023; принята к публикации 21.06.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 08/06/2023; revised 21/06/2023; published 25/09/2023

Кондрашов Алексей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент,
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,
Набережные Челны, Россия. Email: kondrashovag@mail.ru.

Сафаров Дамир Тамасович – кандидат технических наук, доцент,
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,
Набережные Челны, Россия. Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524

Фасхутдинов Айрат Ибрагимович – кандидат технических наук, доцент,
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,
Набережные Челны, Россия. Email: fashutdinovai@gmail.com.

Казаргельдинов Рамиль Раилевич – ведущий инженер-конструктор ПАО «КамАЗ»,
Набережные Челны, Россия.

Aleksei G. Kondrashov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University,
Naberezhnye Chelny, Russia. Email: kondrashovag@mail.ru

Damir T. Safarov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University,
Naberezhnye Chelny, Russia. Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524

Ayrat I. Faskhutdinov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University,
Naberezhnye Chelny, Russia. Email: fashutdinovai@gmail.com

Ramil R. Kazargeldinov – Lead Design Engineer, PJSC KAMAZ, Naberezhnye Chelny, Russia.

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 538.97
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-137-143



ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С YBCO-ПЛЕНКАМИ

Позыгун И.С.¹, Серопян Г.М.¹, Сычев С.А.¹, Федосов Д.В.¹, Теплоухов А.А.², Семенюк Н.А.²

¹ Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

² Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Развитие современной техники и микроэлектроники вызывает необходимость совершенствования методов получения и обработки тонкопленочных сверхпроводящих микро- и наноструктур, в том числе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO)-пленок. Это обуславливает актуальность задачи формирования сверхпроводящих пленок YBCO на подложках титаната стронция толщиной более 50 нм. **Используемые методы.** Для формирования тонкопленочных микроструктур в работе применялась многофункциональная универсальная установка лазерной литографии с твердотельным лазером Nd:YAG с длинами волн излучения 532 и 1064 нм. **Новизна.** Впервые обнаружены пороговые плотности мощности, при которых происходит плавление и фотоабляция пленки. Выявлено, что при длине волны $\lambda = 532$ нм лазерного излучения порог лазерной абляции для YBCO-пленок толщиной от 30 до 200 нм достигается при значении плотности энергии 1,36 Дж/см². Для YBCO-пленок толщиной 100 нм при $\lambda = 1064$ нм лазерного воздействия порог лазерной абляции составляет 1,44 Дж/см². Установлено, что для инфракрасного лазерного излучения тонкопленочные покрытия толщиной менее чем 40 нм становятся прозрачными, что является препятствием для создания микроструктуры на их основе. **Результат.** Определены оптимальные значения плотности энергии лазерного излучения для формирования границы фотоабляции YBCO-пленки. Обнаружены пороговые плотности энергии, при которых происходит плавление пленки. **Практическая значимость.** Пороговое значение плотности энергии для формирования качественной границы фотоабляции пленок при длине волны 532 нм оказалось равным 1,36 Дж/см². Это указывает на то, что тонкие пленки YBCO имеют высокий коэффициент поглощения данного излучения, что делает возможным формирование микроструктур в широком диапазоне толщин.

Ключевые слова: сверхпроводящие структуры, лазерное воздействие, плотность энергии, YBCO-пленки, лазерная литография

© Позыгун И.С., Серопян Г.М., Сычев С.А., Федосов Д.В., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А., 2023

Для цитирования

Особенности взаимодействия наносекундного лазерного излучения с YBCO-пленками / Позыгун И.С., Серопян Г.М., Сычев С.А., Федосов Д.В., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 137-143. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-137-143>



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

FEATURES OF INTERACTION BETWEEN NANOSECOND LASER RADIATION AND YBCO FILMS

Pozygun I.S.¹, Seropyan G.M.¹, Sychev S.A.¹, Fedosov D.V.¹, Teploukhov A.A.², Semenyuk N.A.²

¹ Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia

² Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The development of modern technology and microelectronics fosters the improvement of methods applied to produce and process thin-film superconducting micro- and nanostructures, including $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) films. This determines the relevance of the task of forming superconducting YBCO films on strontium titanate substrates with a thickness of over 50 nm. **Methods Applied.** To form thin-film microstructures, the authors used a multifunctional universal laser lithography unit with an Nd:YAG solid-state laser with radiation wavelengths of 532 and 1064 nm. **Originality.** The authors have first detected threshold power densities, when the film starts melting and photoablation occurs. It has been revealed that at a laser radiation wavelength of $\lambda = 532$ nm, the threshold of laser ablation for YBCO films with a thickness of 30 to 200 nm is reached at an energy density of 1.36 J/cm^2 . Regarding YBCO films with a thickness of 100 nm, the laser ablation threshold is 1.44 J/cm^2 at $\lambda = 1064$ nm of laser exposure. It has been established that in case of infrared laser radiation, thin-film coatings with a thickness of less than 40 nm become transparent, presenting an obstacle to creating a film-based microstructure. **Result.** We have determined the optimal values of the laser radiation energy density to form the qualitative YBCO film photoablation boundary, and threshold values of the laser radiation energy density that correspond to film melting. **Practical Relevance.** The detected threshold value of energy density, when a qualitative boundary of the YBCO films photoablation is formed at a laser wavelength of 532 nm, turned out to be 1.36 J/cm^2 . This indicates that the YBCO thin films have a sufficiently high absorption coefficient of such radiation; therefore, this radiation can be used to form microstructures in the wide thickness range.

Keywords: superconducting structures, laser exposure, energy density, YBCO films, laser lithography

For citation

Pozygun I.S., Seropyan G.M., Sychev S.A., Fedosov D.V., Teploukhov A.A., Semenyuk N.A. Features of Interaction between Nanosecond Laser Radiation and YBCO Films. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 137-143. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-137-143>

Введение

Несмотря на интенсивные исследования по взаимодействию лазерного излучения с тонкими пленками различных материалов, в литературе мало работ по взаимодействию импульсного лазерного излучения с YBCO-пленками. При прямом воздействии наносекундного лазерного излучения на сверхпроводящие тонкие пленки YBCO происходит фотоабляция материала пленки, в результате чего формируется необходимая топология для изготовления сверхпроводящих пленочных датчиков [1-4]. Преимущество метода лазерной литографии связано с тем, что исключается химическая обработка поверхности пленки. Известны химические методы формирования заданной топологии структур, но они имеют существенный недостаток, заключающийся в плохом контроле ухода формируемой структуры («подтравы»), что снижает выход годных образцов [5].

Известны также методы ионного травления пленок, которые способны обеспечить необходимый размер элементов структуры, но которые вызывают деградацию сверхпроводящего состо-

яния пленок при бомбардировке ионным пучком [6, 7]. Для формирования топологии используется ионная имплантация [8, 9], но несоблюдение оптимальных режимов технологии может привести к деградации сверхпроводящих свойств тонких пленок после имплантации [10, 11]. Лазерная литография позволяет исключить химическое воздействие и ионную бомбардировку, что является ее несомненным достоинством. Несмотря на интенсивные исследования по взаимодействию лазерного излучения с тонкими пленками различных материалов, в литературе практически нет публикаций, отражающих вопросы структурирования сверхпроводящих тонкопленочных покрытий на основе $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ методом лазерной литографии.

Методы и материалы

Применяемая в работе лазерная установка для формирования пленочных микроструктур состоит из твердотельного импульсного лазера, системы управления энергией лазерного излучения, системы фокусировки, двухкоординатного столика для перемещения облучаемого образца

пленки относительно лазерного луча и формирования тонкопленочного рисунка, электронного микроконтроллерного блока управления двигателями. Схема установки, применяемая для воздействия лазером на тонкие YBCO-пленки показана на **рис. 1**.

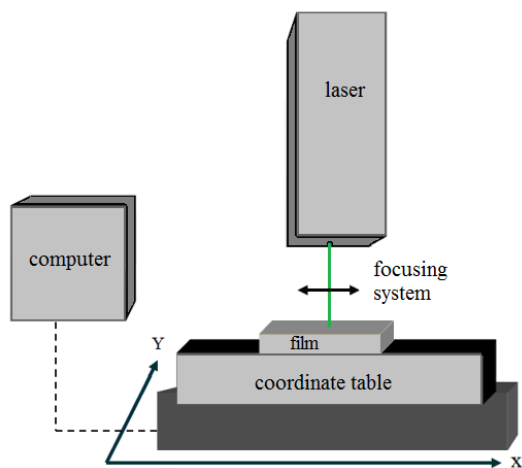


Рис. 1. Установка для облучения тонких YBCO-пленок

Fig. 1. The unit used for irradiation of thin YBCO films

В работе использовалось лазерное излучение с длинами волн 532 и 1064 нм, а длительность импульса составляла 16 нс. Сверхпроводящие пленки облучались одиночными импульсами с разными энергиями в импульсе. Компьютерное управление лазером позволяет производить удаление материала YBCO-пленки без применения различных масок. Исследование поверхности пленок проводилось с применением атомно-силовой (SOLVERPRO) и оптической (МИИ-4) микроскопии.

Сверхпроводящие пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ были выращены методом лазерной абляции на монокристаллических подложках SrTiO_3 (100) при температуре 830°C в атмосфере кислорода при давлении в камере 50-100 Па. Для напыления пленок использовалось лазерное излучение с длиной волны $\lambda = 532$ нм с плотностью мощности излучения $5 \cdot 10^8$ Вт/см². Длительность импульса лазерного излучения составила $\tau = 16$ нс при частоте следования импульсов $\nu = 10$ Гц. Выращенные пленки толщиной 100 нм имели следующие сверхпроводящие параметры: критический ток – 10^6 А/см², критическая температура 90-92 К, ширина сверхпроводящего перехода – 0,8-1,0 К. Скорость роста пленок при выбранных параметрах лазерного излучения и условий в напылительной камере составляла 40 нанометров в минуту, а толщина пленок задавалась временем напыления. Толщина пленки определя-

лась атомно-силовым микроскопом на предварительно сформированной ступеньке.

Результаты и обсуждение

Эксперименты по взаимодействию YBCO-пленок толщиной более 50 нм с лазерным излучением с длиной волны 1064 нм показали возможность изготовления сверхпроводящих микроструктур. Пленки толщиной менее 40 нм становятся прозрачными для инфракрасного излучения, что существенно затрудняет формирование микроструктур. Порог фотоабляции для YBCO-пленок толщиной около 100 нм достигается при значении плотности энергии 1,44 Дж/см². Пороговая плотность энергии падает с ростом толщины пленки из-за возрастания поглощенной энергии излучения.

На **рис. 2** и **3** представлены микрофотографии YBCO-пленок толщиной 50 и 200 нм соответственно после облучения лазером различной плотности энергии с длиной волны $\lambda = 532$ нм.

Экспериментально обнаруженный порог плотности энергии формирования качественной границы для YBCO-пленок толщиной 30-200 нм при длине волны 532 нм составляет около 1,36 Дж/см². Это объясняется тем, что в этом диапазоне толщин пленка имеет высокий коэффициент поглощения излучения. Значение 7,68 Дж/см² является верхним пределом при фотоабляции YBCO-пленок, выращенных на SrTiO_3 . При превышении указанной плотности энергии в монокристалле титаната стронция возникают упругие напряжения, приводящие к разрушению подложки [12].

На **рис. 4** показана профилограмма границы фотоабляции YBCO-пленки.

Толщина пленки составляла примерно 180 нм, а плотность энергии лазерного излучения 2,24 Дж/см². Достаточно резкая граница травления позволяет изготавливать тонкопленочные сверхпроводящие микромостики и иные микроструктуры.

На **рис. 5** представлена микрофотография облученной YBCO-пленки при плотности энергии 64 мДж/см².

Результаты облучения YBCO-пленок толщиной 100 нм лазерным излучением 532 нм показали, что плотность энергии менее 64 мДж/см² приводит к нагреву пленки без образования расплава. В правой части рисунка – облученный участок пленки, а в левой – не облученный.

При плотности энергии 192 мДж/см² наблюдается плавление пленки, как показано на **рис. 6**. В правой части рисунка в области облучения поверхность пленки приобретает рельефный вид, характерный для расплавленного материала. При плотности энергии выше 240 мДж/см² начинается фотоабляция пленки.

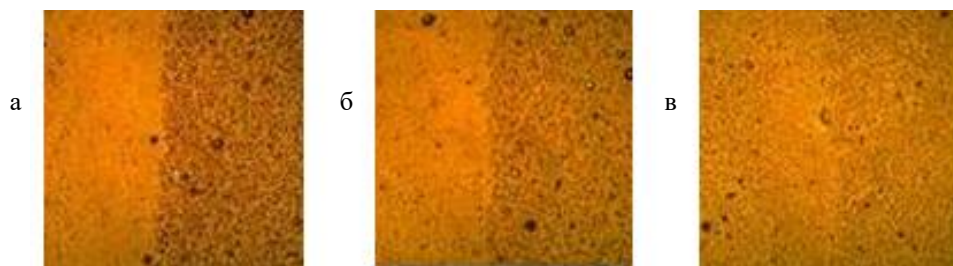


Рис. 2. Микрофотографии YBCO-пленок толщиной 50 нм: а – импульсная энергия 80 мДж, плотность энергии 1,76 Дж/см²; б – импульсная энергия 60 мДж, плотность энергии 1,33 Дж/см²; в – импульсная энергия 40 мДж, плотность энергии 0,88 Дж/см²

Fig. 2. Micrographs of YBCO films with a thickness of 50 nm: а is pulsed energy of 80 mJ, energy density of 1.76 J/cm², б is pulsed energy of 60 mJ, energy density of 1.33 J/cm², в is pulsed energy of 40 mJ, energy density of 0.88 J/cm²

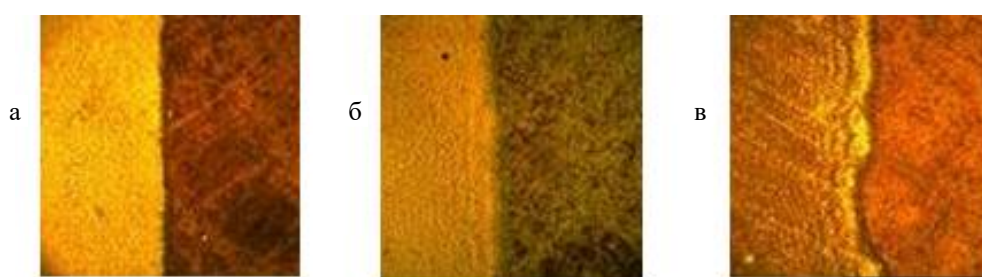


Рис. 3. Микрофотографии YBCO-пленок толщиной 200 нм: а – импульсная энергия 100 мДж, плотность энергии 2,24 Дж/см²; б – импульсная энергия 60 мДж, плотность энергии 1,34 Дж/см²; в – импульсная энергия 40 мДж, плотность энергии 0,90 Дж/см²

Fig. 3. Micrographs of YBCO films with a thickness of 200 nm: а is pulsed energy of 100 mJ, energy density of 2.24 J/cm², б is pulsed energy of 60 mJ, energy density of 1.34 J/cm², в is pulsed energy of 40 mJ, energy density of 0.90 J/cm²

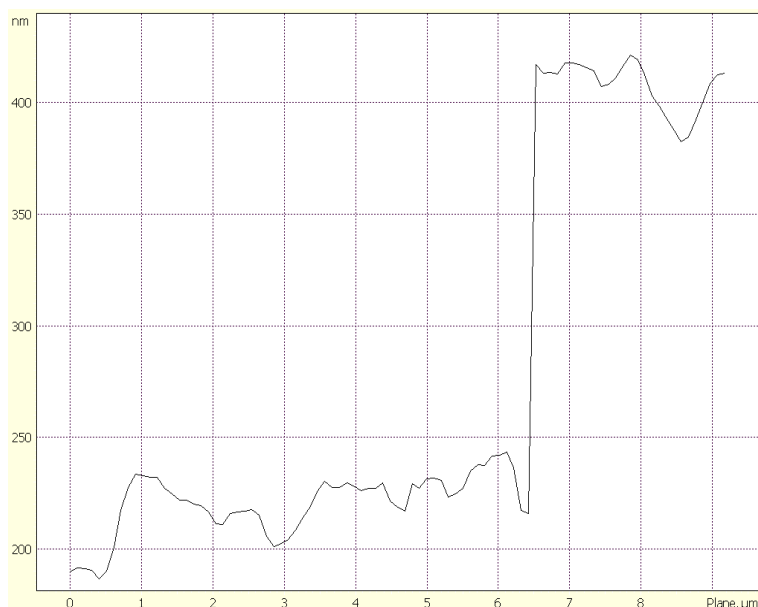


Рис. 4. Профилограмма границы фотоабляции YBCO-пленки

Fig. 4. The profilogram of the YBCO film photoablation boundary



Рис. 5. Микрофотография облученной YBCO-пленки при плотности энергии 64 мДж/см²
Fig. 5. The micrograph of the irradiated YBCO film at an energy density of 64 mJ/cm²

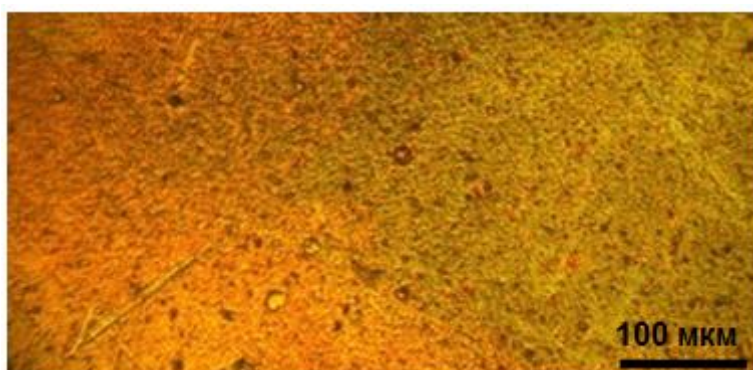


Рис. 6. Микрофотография облученной YBCO-пленки при плотности энергии 192 мДж/см²
Fig. 6. The micrograph of the irradiated YBCO film at an energy density of 192 mJ/cm²

Проведем оценку пороговой плотности энергии, при которой начинается плавление материала пленки. Долю поглощенной пленкой импульсной энергии можно рассчитать по формуле

$$E'_p = E_p \cdot (1 - R - T), \quad (1)$$

где E_p – импульсная энергия; $R = 0,1$ – коэффициент отражения YBCO-пленки [13]; $T = 0,5$ – коэффициент пропускания YBCO-пленки толщиной 100 нм для $\lambda = 532$ нм.

$$E'_p = 0,4 \cdot E_p. \quad (2)$$

Процесс поглощения пленкой энергии лазерного излучения можно считать адиабатным, поскольку длительность импульса мала $\tau = 16$ нс. Пороговое значение поглощенной энергии, при котором пленка начинает плавиться, можно рассчитать по формуле

$$E'_p = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где m – масса облученного участка пленки; $c = 1000$ Дж/кг·К – удельная теплоемкость YBCO-пленки [14]; ΔT – изменение температуры пленки,

$\Delta T = T_{\text{пл}} - T_0 = 1020 - 20 = 1000^\circ\text{C}$ ($T_{\text{пл}} \approx 1020^\circ\text{C}$ – температура плавления YBCO-пленки орторомбической модификации, $T_0 = 20^\circ\text{C}$ – температура пленки до облучения).

Масса облученного участка пленки $m = \rho \cdot s \cdot h = 1,78 \cdot 10^{-8}$ кг, где $\rho = 6,3$ г/см³ – плотность YBCO-пленки, $h = 100$ нм – толщина пленки, $s = 0,28$ см² – площадь лазерного пятна на пленке.

Таким образом, рассчитанное значение поглощенной энергии $E'_p = 18$ мДж, а пороговое значение импульсной энергии, при которой пленка начинает плавиться, $E_p = 45$ мДж. Тогда плотность энергии равна 160 мДж/см², что хорошо согласуется с экспериментом.

Заключение

В результате исследований взаимодействия наносекундного лазерного излучения с тонкими пленками YBCO на подложках титаната стронция обнаружены пороговые плотности энергии, при которых происходит плавление и фотоабляция YBCO-пленки.

Эксперименты показали, что взаимодействие лазерного излучения длиной волны 1064 нм с YBCO-пленками позволяет изготавливать микро- и наноструктуры на основе данных пленок. Порог фотоабляции для пленок толщиной 100 нм достигается при значении плотности энергии 1,44 Дж/см² и уменьшается с увеличением толщины пленки. Однако пленки толщиной менее 40 нм становятся проницаемыми для инфракрасного излучения, что затрудняет формирование микро-структур на их основе.

При длине волны лазерного излучения 532 нм пороговое значение плотности энергии формирования границы фотоабляции пленок толщиной 30-200 нм составило 1,36 Дж/см². Нижний предел плотности энергии, при котором начинает проявляться граница фотоабляции, составляет 0,24 Дж/см².

Результаты экспериментов показали, что плавление пленки начинается при плотности энергии 0,19 Дж/см². Расчетная оценка пороговой плотности энергии плавления тонкой YBCO-пленки дала значение 0,16 Дж/см². Полученный результат удовлетворительно согласуется с экспериментом.

Список источников

1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
2. Шугуров А.Р., Панин А.В. Механизмы генерации напряжений в тонких пленках и покрытиях // Технология. Физика. 2020. №65. С. 1881-1904.
3. José M De Teresa. Nanoscale direct-write fabrication of superconducting devices for application in quantum technologies // Materials for Quantum Technology. 2023, vol. 3(1), pp. 1-9.
4. Lee Y.H., Schneiderman J. Focus on SQUIDS in Biomagnetism // Superconductor Science and Technology. 2018, vol. 31(8), p. 080201.
5. Investigation of the Parameters of Superconducting and Insulating Elements of Structures Obtained on YBCO Films by Master Mask with Decreasing Their Size / D.V. Masterov, S.A. Pavlov, A. Parafin [et. al] // Physics of the Solid State. 2021, vol. 63(10), pp. 1480-1484.
6. On a Possibility to Fabricate YBCO Bridges with the Perfect Surface, Critical Temperature over 88 K and Critical Current Density up to 5×10^6 A/cm² / D.V. Masterov, S.A. Pavlov, A. Parafin [et. al] // Physics of the Solid State. 2020, vol. 62(9), pp. 1562-1566.
7. Обнаружение второй гармоники фазовой зависимости сверхпроводящего тока в гетеропереходах Nb/Au/YBCO / Ф.В. Комиссинский, Г.А. Овсянникова, Е. Ильичёв и др. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2001. Т. 73. №7. С. 405-409.
8. High-Tc superconducting Josephson mixers for terahertz heterodyne detection / M. Malnou, C. Feuillet-Palma, C. Ulysse [et. al] // Journal of Applied Physics. 2014, vol. 116, pp. 074505-074505.
9. Влияние ионного облучения на электронный транспорт в тонких пленках YBCO / А.В. Антонов, Д.В. Мастеров, А.Н. Михайлов и др. // Физика твердого тела. 2022. Т. 64. №9. С. 1162-1168.
10. Вopilкин Е.А., Востоков Н.В., Парафин А.Е. Исследование свойств края полосковой структуры из высокотемпературного сверхпроводника // Микросистемная техника. 2003. №4. С. 10.
11. Формирование высокотемпературных сверхпроводящих слоев на границах несверхпроводящих фаз / М.И. Петров, С.И. Попков, К.Ю. Терентьев и др. // Письма в Журнал технической физики. 2020. Т. 46. №20. С. 11-14.
12. Взаимодействие наносекундного лазерного излучения с поверхностью монокристаллического титаната стронция / И.С. Позыгун, Г.М. Серопян, И.Р. Султанов и др. // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. №8. С. 1261-1263.
13. Оптические свойства сверхпроводящих пленок YBCO, BSCCO, TBCCO в видимой и ближней инфракрасной части спектра / С.И. Тютюнников, В.Н. Шаляпин, Н.И. Балалыкин и др. Дубна: ОИЯИ, 1995. 10 с.
14. Термические эффекты в аморфных слоях YBaCuO при взаимодействии с лазерным излучением высокой мощности / В.Д. Окунев, В.А. Исаев, Р. Gierlowski // Письма в Журнал технической физики. 2005. № 14. С. 22-29.

References

1. Grigoryants A.G. *Osnovy lazernoy obrabotki materialov*. [Fundamentals of laser processing of materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 304 p. (In Russ.)
2. Shugurov A.R., Panin A.V. Mechanisms of stress generation in thin films and coatings *Tekhnologiya. Fizika*. [Technology. Physics]. 2020;(65):1881-1904. (In Russ.)
3. José M. De Teresa. Nanoscale direct-write fabrication of superconducting devices for application in quantum technologies. *Materials for Quantum Technology*. 2023;3(1):1-9.
4. Lee Y.H., Schneiderman J. Focus on SQUIDS in biomagnetism. *Superconductor Science and Technology*. 2018;31(8):080201.
5. Masterov D.V., Pavlov S.A., Parafin A.E. et al. Investigation of the parameters of superconducting and insulating elements of structures obtained on YBCO films by master mask with decreasing their size. *Physics of the Solid State*. 2021;63(10):1480-1484.
6. Masterov D.V., Pavlov S.A., Parafin A.E. et al. On a possibility to fabricate YBCO bridges with the perfect surface, critical temperature over 88 K and critical current density up to 5×10^6 A/cm². *Physics of the Solid State*. 2020;62(9):1562-1566.
7. Komissinsky F.V., Ovsyannikova G.A., Ilyichev E. et al. Detection of the second harmonic of phase dependence of superconducting current in heterojunctions Nb/Au/YBCO. *Pisma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki* [JETP Letters]. 2001;73(7):361-365. (In Russ.)

8. Malnou M., Feuillet-Palma C., Ulysse C., Faini G., Febvre P., Sirena M., Olanier L., Lesueur J., Bergeal N. High-Tc superconducting Josephson mixers for terahertz heterodyne detection. *Journal of Applied Physics*. 2014;116:074505.
9. Antonov A.V., Masterov D.V., Mikhailov A.N. et al. Effect of ion irradiation on electronic transport in YBCO thin films. *Fizika tverdogo tela* [Solid State Physics]. 2022;64(9):1162-1168. (In Russ.)
10. Vopilkin E.A., Vostokov N.V., Parafin A.E. Research of the properties of the edge of a strip structure from a high-temperature superconductor. *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystems Technology]. 2003;4(4):10. (In Russ.)
11. Petrov M.I., Popkov S.I., Terentyev K.Yu. et al. Forming high-temperature superconducting layers at the boundaries of non-superconducting phases. *Pisma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics Letters]. 2020;46(20):11-14. (In Russ.)
12. Pozygun I.S., Seropyan G.M., Sultanov I.R. et al. Interactions between nanosecond laser radiation and a surface of single-crystal strontium titanate. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics]. 2017;87(8):1261-1263. (In Russ.)
13. Tyutyunnikov S.I., Shaliapin V.N., Balalykin N.I. et al. *Opticheskie svoystva sverkhprovodnykh ple-nok YBCO, BSCCO, TBCCO v vidimoy i blizhnei in-frakrasnoy chasti spektra* [Optical properties of YBCO, BSCCO, TBCCO superconducting films in the visible and near infrared part of the spectrum]. Dubna: JINR, 1995, 10 p. (In Russ.)
14. Okunev V.D., Isaev V.A., Gierlowski P., Klimov A., Lewandowski S.J. Thermal effects in amorphous YBaCuO layers when interacting with high-power laser radiation. *Pisma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics Letters]. 2005;14(14):22-29. (In Russ.)

Поступила 03.04.2023; принята к публикации 27.06.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 03/04/2023; revised 27/06/2023; published 25/09/23

Позыгун Ирина Станиславовна – старший преподаватель, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия. Email: pozygun@mail.ru. ORCID 0000-0002-2262-264X

Серопян Геннадий Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия. Email: ser_gm@mail.ru. ORCID 0000-0001-8626-2893

Сычев Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия. Email: sychev226@mail.ru. ORCID 0000-0003-3849-8927

Федосов Денис Викторович – учебный мастер, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия. Email: feden86@mail.ru. ORCID 0000-0002-5617-112X

Теплоухов Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия. Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Семенюк Наталья Андреевна – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия. Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

Irina S. Pozygun – Senior Lecturer, Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia. Email: pozygun@mail.ru. ORCID 0000-0002-2262-264X

Gennady M. Seropyan – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia. Email: ser_gm@mail.ru. ORCID 0000-0001-8626-2893

Sergey A. Sychev – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia. Email: sychev226@mail.ru. ORCID 0000-0003-3849-8927

Denis V. Fedosov – Training Instructor, Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia. Email: feden86@mail.ru. ORCID 0000-0002-5617-112X

Andrey A. Teploukhov – PhD (Eng.), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia. Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Natalya A. Semenyuk – PhD (Eng.), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia. Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ STANDARDIZATION, CERTIFICATION AND QUALITY MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 656.25 (2Р37) + 06
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-144-154



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РИСКОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НА ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТАХ

Васин С.А.¹, Вережкина О.И.², Яицков И.А.²

¹ Тульский государственный университет, Тула, Россия

² Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. На крупных предприятиях – в транспортных и машиностроительных холдингах – широко внедряются системы управления качеством, одним из аспектов которых является оценка функциональной безопасности, предназначенная для выявления и устранения «слабых» мест в управлении качеством и безопасностью движения на инфраструктурных объектах. Приоритетная задача заключается в обеспечении гарантированной безопасности и надежности основной функции, а именно функции перевозки. Надежность перевозочного процесса, то есть его бесперебойное функционирование, поддерживается за счет грамотной эксплуатации и качественного ремонта инфраструктурных объектов, услуг сторонних организаций. Для финансовой и экономической стабильности уровень безопасности эксплуатации инфраструктурных объектов должен стремиться к недопущению транспортных происшествий, что в значительной степени зависит от профилактических мероприятий, направленных на предупреждение случаев нарушения безопасности движения и отказов технических средств при эксплуатации инфраструктурных объектов. В работе предложен анализ нормативных документов при проведении оценки, надежности и качества перевозки в машиностроительных и транспортных холдингах. Оценка основана на сборе массивов статистических данных при эксплуатации инфраструктурных объектов для последующего исследования с учетом влияния ключевых показателей деятельности инфраструктурных объектов и весовых коэффициентов для рейтинговой оценки функционала безопасности движения. Анализируемая в работе Методика реализует рискориентированный подход с учетом частот событий и влияния этих частот на потери от них в виде табличных коэффициентов. Вместе с тем учет нескольких важных коэффициентов является не отражающим тяжесть последствий соответственно уровню нарушений. Правильная оценка функциональной безопасности региональных центров корпоративного управления, дирекций и служб необходима не только для сравнения результатов обеспечения безопасности движения, но и для выявления и дальнейшего устранения «слабых» мест в управлении качеством и безопасностью движения транспортных единиц на инфраструктурных объектах.

Ключевые слова: оценка рисков, управление качеством, функциональная безопасность, инфраструктурные объекты

© Васин С.А., Вережкина О.И., Яицков И.А., 2023

Для цитирования

Васин С.А., Вережкина О.И., Яицков И.А. Совершенствование методики оценки рисков функциональной безопасности и надежности для управления качеством на инфраструктурных объектах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 144-154. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-144-154>



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

IMPROVING THE PROCEDURE FOR ASSESSING FUNCTIONAL SAFETY AND RELIABILITY RISKS FOR QUALITY MANAGEMENT AT INFRASTRUCTURE FACILITIES

Vasin S.A.¹, Verevskina O.I.², Yaitskov I.A.²

¹ Tula State University, Tula, Russia

² Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. Large transport and machine-building holdings widely use quality management systems, one of whose main aspects is the functional safety assessment designed to identify and eliminate weaknesses in quality management and traffic safety at infrastructure facilities. The priority is to ensure the guaranteed safety and reliability of the main function, namely the transportation function. Reliability of the transportation process, that is its uninterrupted operation, is supported by a competent operation and high-quality repair of infrastructure facilities and services of third-party organizations. To ensure financial and economic stability, the level of safety in the operation of infrastructure facilities should provide for avoidance of traffic accidents, which largely depends on preventive measures aimed at traffic safety and failures of technical means during the operation of infrastructure facilities. The paper proposes an analysis of regulatory documents for assessing reliability and quality of transportation in machine-building and transport holdings. The assessment is based on the statistical data collection in the operational process of infrastructure facilities for subsequent research due to the influence of key performance indicators of infrastructure facilities and weighting factors for the rating of traffic safety functionality. The procedure analyzed in the paper implements a risk-based approach based on frequency of events and the impact of these frequencies on losses from them as the tabular coefficients. At the same time, several important coefficients do not reflect severity of consequences according to the level of violations. The correct functional safety assessment of the regional corporate governance centers, directorates and services is necessary not only to compare the results of ensuring traffic safety, but also to identify and further eliminate weaknesses in the quality management and traffic safety of transport units at infrastructure facilities.

Keywords: risk assessment, quality management, functional safety, infrastructure facilities

For citation

Vasin S.A., Verevskina O.I., Yaitskov I.A. Improving the Procedure for Assessing Functional Safety and Reliability Risks for Quality Management at Infrastructure Facilities. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 144-154. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-144-154>

Актуальность работы

Важность правильного построения оценочной модели функциональной безопасности позволит определить приоритетные направления в управлении безопасностью движения с минимальными погрешностями в расчетах.

Рассмотрен вариант действующей методики проведения рейтинговой оценки инфраструктурных объектов с точки зрения рискориентированного анализа. Показано, что назначение коэффициентов, определяющих «вес» того или иного нарушения безопасности, не соответствует современным представлениям о риске, что, вообще говоря, нарушает реальный рейтинг инфраструктурных объектов с точки зрения безопасности движения транспортных единиц. Сформулированы предложения по пересмотру коэффициентов блока нарушений безопасности движения.

Обзор литературы

Вопросам повышения надежности и качества перевозки в холдинге ОАО «РЖД», а также на ремонтных заводах и машиностроительных предприятиях уделяется большое внимание, как и до структурной реформы. В 1990-х гг. появляется теория безопасности движения поездов [1], вопросы оценки риска начали развиваться в начале 2000-х гг. [2-5]. Дальнейшее развитие методы оценки риска получили в ГОСТ [6], а также в серии работ «Управление ресурсами, рисками, анализ надёжности» (УРРАН) [7, 8]. В то же время появились рейтинговые оценки безопасности движения подвижных единиц [9, 10] (на данный момент выведены из нормативной документации по ряду причин). С 2014-2015 гг. развиваются направления как прямых оценок функциональных рисков [11, 12], так и различные рискориентированные подходы. В 2017 г. введены методики,

оценивающие функциональную безопасность на рейтинговой основе, и методики комплексной оценки культуры безопасности [13, 14]. Преимущество рейтинговых методик по сравнению с методиками прямой оценки рисков – простота. В то же время упрощение может вести к значительному снижению декларируемой объективности оценки. Ниже приведен анализ Методики проведения рейтинговой оценки инфраструктурных объектов и предложена переоценка коэффициентов в блоке «нарушения безопасности движения».

Методика исследований

Оценка функциональной безопасности развивается в ОАО «РЖД» как элемент системы качества управления холдингом. В 2017 г. утверждена Методика проведения рейтинговой оценки инфраструктурных объектов (далее Методика). Для полного отображения показателей функциональной безопасности Методика развивалась в соответствии с распоряжениями ОАО «РЖД» от 28 декабря 2017 г. № 2769р, от 15 июня 2018 г. № 1251/р, от 25 декабря 2019 г. № 3006/р и т. 31 марта 2020 г. № 724/р. Вклад показателей функциональной безопасности в долю рейтинговой оценки транспортных инфраструктурных объектов составляет 25%.

В перечень ключевых показателей деятельности и весовых коэффициентов для рейтинговой оценки инфраструктурных объектов функционала безопасности движения, утвержденных распоряжением ОАО «РЖД» от 31 января 2017 г. № 193р, был внесен ряд изменений. Теперь величина показателя функциональной безопасности движения рассчитана на основании статистических данных автоматизированных систем ОАО «РЖД» в соответствии с классификацией случаев нарушений безопасности движения поездов [15], с ключевыми показателями деятельности холдинга «РЖД» [16], а также с учетом отказов в работе технических средств 1-й категории. В отдельную категорию при расчете показателя функциональной безопасности движения поездов вынесены случаи травмирования людей при производственном травматизме и случаи, связанные с несанкционированным движением по путям транспортных средств или со столкновением подвижного состава с транспортным средством вне установленного переезда.

Ключевые показатели, используемые в методике для оценивания функциональной безопасности, следующие:

- крушения подвижного состава;
- аварии подвижного состава;

– сходы или столкновения подвижного состава с другим подвижным составом при поездной работе (без последствий крушения или аварии);

– сходы или столкновения подвижного состава с другим подвижным составом при маневровой работе, экипировке или других передвижениях (без последствий крушения или аварии);

– происшествия, связанные с несанкционированным движением по путям транспортного средства или столкновение подвижного состава с транспортным средством вне установленного переезда (без последствий крушения или аварии);

– столкновения подвижного состава с транспортным средством на переезде (без последствий крушения или аварии);

– травмирования людей на инфраструктурном объекте;

– возгорания груза в вагоне или контейнере при перевозке подвижного состава в процессе его эксплуатации;

– инциденты при перевозке опасных грузов;

– отказы в работе технических средств, приведшие к задержке поезда на 1 час и более (за исключением признанных (учтенных) в качестве крушений, аварий, сходов).

В Методике каждому из вышеперечисленных показателей присвоен коэффициент (вес), соответствующий тяжести допущенного случая нарушения безопасности движения поездов на инфраструктурных объектах, случая производственного или непроизводственного травматизма, при этом учитывается контур ответственности по отношению к ОАО «РЖД». Принцип объективности в расчете показателя функциональной безопасности движения данной методики сохраняется путем приведения к показателю выполненной работы (млн поездо-км).

Сравнение полученных оценок функциональной безопасности выполняется с аналогичным периодом прошлого года.

На основании требований протокола заседания правления ОАО «РЖД» от 28 июня 2019 г. №32 для определения действующей эффективности системы управления функциональной безопасности движения поездов разработана и утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 23 октября 2019 г. № 2343/р Методика оценки функциональной безопасности на инфраструктуре ОАО «РЖД» [2], которая позволяет определить уровень полноты безопасности движения на железных дорогах на основе рассчитанных показателей функциональной безопасности, а результаты оценки функциональной безопасности ис-

пользуются для планирования мероприятий внутреннего контроля. Оценка функциональной безопасности проводится ежемесячно, ежеквартально, ежегодно, с нарастающим итогом и в сравнении с аналогичными периодами.

Согласно требованиям рассматриваемой Методики [2] образцовым в области управления безопасностью движения признается тот инфраструктурный объект, на котором по результатам выполненных расчетов показатель функциональной безопасности движения равен нулю или имеет наименьшее значение по сравнению с другими региональными центрами корпоративного управления. Однако при этом показатель функциональной безопасности расчетного периода должен быть ниже показателя функциональной безопасности предыдущего периода, а также отсутствия крушений и аварий, допущенных по ответственности подразделений инфраструктурных объектов.

Расчет уровня функциональной безопасности движения выполняется с учетом ответственности: подразделений ОАО «РЖД», дочерних обществ и сервисных организаций, территориально расположенных в границах регионального центра корпоративного управления; сторонних организаций и третьих лиц по месту допущенного случая.

Показатель функциональной безопасности движения в соответствии с [13, 14] определяется по формуле

$$\text{ПФБД}_q = \frac{\sum_{i=1}^m \left[\left(\sum_{j=1}^k M_{vj} \cdot C_{vj} \right) \cdot C_{ni} + C_{ai} \right] \cdot C_{ri}}{NL}, \quad (1)$$

где m – число случаев нарушения безопасности движения поездов, учитываемых для формирования рейтинговой оценки региональных центров корпоративного управления, ед.; i – номер учтенного случая ключевого показателя функциональной безопасности; k – число групп людей, пострадавших в случае возникновения нарушения безопасности движения, по степени тяжести и классификации в рамках одного случая нарушения; M_{vj} – количество людей, пострадавших при возникновении случая нарушения безопасности движения поездов, с распределением по степени тяжести при наступлении j -го случая нарушения безопасности движения; C_{vj} – коэффициент, принимаемый равным по классификации людей, пострадавших при возникновении случая нарушения безопасности движения поездов, при наступлении j -го нарушения безопасности дви-

жения; C_{ni} – коэффициент, принимаемый равным по числу людей, пострадавших при возникновении случая нарушения безопасности движения поездов, при наступлении i -го случая нарушения безопасности движения; C_{ai} – коэффициент, принимаемый равным по классификации i -го случая нарушения безопасности движения; C_{ri} – коэффициент, принимаемый равным по классификации контура причины i -го случая нарушения; NL – поездо-километры работы рассматриваемого регионального центра корпоративного управления за выбранный период (млн поездо-км).

Перечень показателей функциональной безопасности движения приведен в табл. 1 с учетом весовых коэффициентов с распределением по степени тяжести и определением источника данных.

Используемые сокращения в табл. 1:

АС РБ НБД – автоматизированная система управления безопасностью движения;

ЕК АСУТР – единая корпоративная система управления трудовыми ресурсами;

АСУ ПБ – автоматизированная система управления «Пожарная безопасность»;

АС КМ – автоматизированная система оперативного контроля и анализа качества коммерческой работы и безопасности грузовых перевозок;

КАС АНТ – комплексная автоматизированная система учета, контроля устранения отказов технических средств и анализа их надежности.

В соответствии с Методикой расчет показателя функциональной безопасности случаев нарушения, связанного с травмированием людей, которые произошли на i -й железной дороге за один месяц, производится по формуле

$$\sum_{i=1}^m \text{ТРАВМЛ} = \left[\left(M_{\text{ТРАВМЛ}} \cdot C_{vi} \right) \cdot C_{ni} + C_{ai} \right] \cdot C_{ri}. \quad (2)$$

Если все пострадавшие люди (табл. 2) не являются ни пассажирами, ни персоналом холдинга, а относятся к категории других лиц, то коэффициент по классификации C_{vj} равен 1, если пострадавший травмирован с какой-либо степенью тяжести, и 2, если пострадавший травмирован со смертельным исходом.

По количеству пострадавших во всех случаях коэффициент C_{ni} равен 1.

По классификации произошедших нарушений все иные лица были травмированы на железнодорожной инфраструктуре, что по степени тяжести C_{ai} является 1.

Таблица 1. Перечень показателей, используемых для расчета функциональной безопасности движения
Table 1. The list of indicators used to calculate the functional traffic safety

Наименование показателя нарушения безопасности движения	Наименование степени тяжести случая НБД	Весовой коэффициент тяжести случая НБД	Источник данных случаев НБД
Классификация людей, пострадавших при возникновении случая нарушения безопасности движения – C_{vj}			
Пассажир	гибель	8	АС РБ НБД, АС Травматизм
	травма	4	АС РБ НБД, АС Травматизм
Персонал	гибель	8	АС РБ НБД, ЕК АСУТР
	травма	4	АС РБ НБД, ЕК АСУТР
Иной контингент (третьи лица)	гибель	2	АС Травматизм
	травма	1	АС Травматизм
Пострадавшие люди отсутствуют		0	
Классификация по количеству пострадавших людей (один человек или группа людей) при возникновении случая нарушения безопасности движения – C_{ni}			
Человек (группа людей)	нет	0	АС РБ НБД, АС Травматизм
	1	1	АС РБ НБД, АС Травматизм
	от 2 до 5	2	АС РБ НБД, АС Травматизм
	более 5	3	АС РБ НБД АС Травматизм
Классификация случаев нарушения безопасности движения – C_{ai}			
Крушение	–	8	АС РБ НБД
Авария	–	7	АС РБ НБД
Сход или столкновение ПС с другим ПС при поездной работе (без последствий крушения или аварии)	–	5	АС РБ НБД
Сход или столкновение ПС с другим ПС при маневровой работе, экипировке или других передвижениях (без последствий крушения или аварии)	–	4	АС РБ НБД
Происшествие, связанное с несанкционированным движением по железнодорожным путям транспортного средства, или столкновение ПС с транспортным средством вне установленного переезда (без последствий крушения, аварии)	–	3	АС РБ НБД
Столкновение ПС с транспортным средством на переезде (без последствий крушения или аварии)	–	3	АС РБ НБД
Травмирование людей на инфраструктуре	–	1	АС РБ НБД ЕК АСУТР, АС Травматизм
Возгорание груза в вагоне или контейнере при перевозке или ПС при его эксплуатации	–	3	АСУ ПБ
Инцидент при перевозке опасных грузов	с высвобождением ПС	7	АС КМ
	без высвобождения ПС	3	АС КМ
Отказы в работе технических средств, приведшие к задержке поезда на 1 час и более (за исключением случаев, принятых к учету транспортными происшествиями и событиями)	–	1	КАСАНТ
Классификация по контуру причины – C_{ri}			
Внутренняя	–	2	АС РБ НБД
Внешняя	–	1	АС РБ НБД

Например, столкновение подвижного состава с транспортным средством на переезде (без последствий крушения или аварии) будет соответствовать числу баллов:

– при дорожно-транспортном происшествии без случаев травмирования или смерти по вине водителя транспортного средства (внешний контур)

$$\sum_{i=1}^m \text{НБД} = \left[(0 \cdot 1) \cdot 1 + 3 \right] \cdot 1 = 3 \text{ балла};$$

– при сходе подвижного состава при маневровой работе без случаев травмирования или смерти, произошедших по вине функционального филиала (внутренний контур)

$$\sum_{i=1}^m \text{НБД} = \left[(0 \cdot 1) \cdot 1 + 4 \right] \cdot 2 = 8 \text{ баллов}.$$

Входные данные для расчета приведены в табл. 2.

Результаты расчета в графическом виде представлены на рисунке в виде диаграммы оценочного показателя функциональной безопасности в разрезе инфраструктурного объекта. Среднее значение границы показателя функциональной безопасности выделено красным, то есть показатели функциональной безопасности, представленные синими маркерами, которые входят в красный круг, отвечают оптимальным результатам, а показатели функциональной безопасности, представленные синими маркерами, не обеспечивают параметры безопасности движения.

Таблица 2. Фрагмент данных за месяц по количественным показателям, используемым при определении оценки функциональной безопасности на инфраструктуре
Table 2. A fragment of data for a month by quantitative indicators used in assessing functional safety at the infrastructure

Наименование показателя	Наименование инфраструктурного объекта						
	ДОР 16	ДОР 15	ДОР 14	ДОР 15	ДОР 12	ДОР 11	ДОР 10
НБД	51		46	6	39	49	67
Возгорание	3		3				3
Травмирование	80	5	301	73	38	40	55
Производственный травматизм			10	20			
Инциденты с ОГ							
ОТС	306		232	146	153	79	107
Число баллов	440	5	592	245	230	168	232
Млн поездо-км	31,77	0,45	38,25	24,24	22,32	14,93	12,67
Итоговый ПФБ	13,8	10,9	15,5	10,1	10,3	11,2	18,3
Место	7	12	1	14	13	11	5



Рисунок. Диаграмма оценки показателя функциональной безопасности
Figure. The diagram of the functional safety indicator assessment

Анализ и обсуждение Методики

Учитывая значительный охват Методикой технологических особенностей возникновения и развития различных нарушений безопасности, можно заключить, что Методика является важным шагом в развитии оценки функциональной безопасности. Методика реализует рискориентированный подход, где суммируются произведения частот событий на потери от них в виде табличных коэффициентов.

Вместе с тем учет нескольких важных коэффициентов является не отражающим тяжесть последствий соответственно уровню НБД. Речь идет о взаимоотношении коэффициентов, определяющих уровень событий: крушение, аварии, сход поездов, сход при маневровой работе, отказ технических средств.

Проведем оценку соотношения первых четырех величин исходя из физических соображений потерь, связанных с энергией скорости движения. Основное предположение для сравнения потерь разрушения от крушения и при сходе в ходе маневров: потери пропорциональны скорости движения, на которой происходит НБД, средняя скорость при этом для крушения 60 км/ч, для схода при маневровой работе 5 км/ч.

Исходя из формулы кинетической энергии,

$$E = \frac{mv^2}{2}, \quad (1)$$

где E – кинетическая энергия, МДж; m – масса поезда, т; v – скорость поезда, км/ч.

Тогда потери при крушении W_K и при сходе при маневрах W_M , тыс. руб., оцениваются по формулам

$$W_K = \alpha \frac{mv_K^2}{2}, \quad (2)$$

$$W_M = \alpha \frac{mv_M^2}{2}, \quad (3)$$

где α – коэффициент перевода кинетической энергии в экономические потери, тыс. руб./МДж; v_K, v_M – скорости при этих событиях соответственно, км/ч; m – масса поезда, т.

Отношение потерь безразмерно (так как потери имеют одинаковую размерность) и рассчитывается по формуле

$$\frac{W_K}{W_M} = \frac{v_K^2}{v_M^2}. \quad (4)$$

Исходя из этого подхода, соотношение потерь для двух событий

$$\frac{W_K}{W_M} = \frac{3600}{25} = 144.$$

Учитывая меры по ограничению ущерба от сходов в поездах при столкновении (аппараты поглощения энергии до 30%), приведённую выше величину можно оценить как 100 (два порядка). Таким образом,

$$\frac{W_K}{W_M} \approx 100.$$

Учитывая, что сход поезда – это состояние движения, предшествующее крушению, но не получившее развитие до такой степени, отношение потерь в данном случае можно оценить величиной 10:

$$\frac{W_K}{W_{\Pi}} \approx 10,$$

где W_{Π} – потери от схода в поездной работе.

Сравним теперь полученные отношения с коэффициентами, используемыми в Методике (табл. 3).

Табл. 3 показывает, что стремление к объективности в данном случае не выполнено.

Покажем на примере, что такое несоответствие в весовых коэффициентах приводит к неверной оценке вклада этого блока НБД в оценку рейтинга.

Предположим, что в двух филиалах инфраструктурного объекта за период произошли события (табл. 4), в результате которых появились следующие данные по интенсивности НБД за период.

Результаты расчета рейтинга по этому блоку приведены в табл. 5.

Таблица 3. Сравнение коэффициентов потерь от основных типов НБД на основе модельной оценки и в Методике
 Table 3. The comparison of loss factors from the main types of traffic safety violations based on a model assessment and in the procedure

Вид НБД	Весовой коэффициент	Отношение весовых коэффициентов по Методике	Отношение весового коэффициента по модели к весовому коэффициенту «Крушение»	Весовой коэффициент по модели	Отклонение Методики от модели
Крушение	8	–	–	–	–
Авария	7	0,875	Не определен	Не определен	Не определен
Сход или столкновение ПС с другим ПС при поездной работе (без последствий крушения или аварии)	5	0,625	0,1	0,8	625%
Сход или столкновение ПС с другим ПС при маневровой работе, экипировке или других передвижениях (без последствий крушения или аварии)	4	0,5	0,01	0,08	5000%

Таблица 4. События на инфраструктурных объектах
 Table 4. Events at infrastructure facilities

Вид случаев нарушения безопасности движения	Филиал 1	Филиал 2
Крушение	1	2
Авария	0	0
Сход или столкновение ПС с другим ПС при поездной работе (без последствий крушения или аварии)	1	2
Сход или столкновение ПС с другим ПС при маневровой работе, экипировке или других передвижениях (без последствий крушения или аварии)	5	1

Таблица 5. Результат расчетов баллов в блоке НБД
 Table 5. The result of calculating points in the category of traffic safety violations

Номер филиала	Рейтинг по Методике	Рейтинг по модели
Филиал №1	33	8,88
Филиал №2	30	17,6
Лучшее состояние безопасности по Методике	Филиал 2	
Лучшее состояние безопасности по модели данной статьи	Филиал 1	

Приведенный пример показывает, что имеет смысл пересмотреть коэффициенты в Методике.

Полученные по модели коэффициенты сравнивались со средними значениями соотношений потерь от рассматриваемых НБД из автоматизированной системы АС РБ. Полученные величины показали ошибку на уровне 15-30%, что говорит о достаточном уровне адекватности модели, оценивающей соотношение потерь, приведенных в данной статье.

Выводы

1. Существующая Методика не объективно отражает текущие параметры в оценке функциональной безопасности. Проведя анализ методик

и подходов в мировой практике в оценке функциональной безопасности на инфраструктурных объектах был предложен альтернативный подход в системе оценок функциональной безопасности, который можно использовать параллельно с действующей Методикой в период апробации предлагаемого подхода.

2. Проведенное в исследовании сравнение весовых коэффициентов по Методике и по предлагаемому подходу с учетом разработанной модели оценки функциональной безопасности показывает, что упрощенные целые численные весовые коэффициенты неадекватно отражают фактическое состояние при оценке функциональной безопасности на инфраструктурных объектах.

3. По результатам проведенных исследований (см. табл. 5) видно, что филиал №1, который Методика определила худшим, фактически имеет лучший рейтинг. Таким образом, используемые в действующей Методике коэффициенты могут значительно исказить результат по рейтингу (вплоть до противоположного). Это означает, что при использовании таких весовых коэффициентов может искажаться во времени не только статическая карта рейтингов, но и динамическая.

Поскольку используемые в Методике коэффициенты не обеспечивают адекватности в отражении ситуации в блоке НБД, рекомендуется, помимо «внешних» расчетов, для внутренних расчетов использовать альтернативные пересмотренные значимости коэффициентов в блоке НБД и отказов технических средств.

Список источников

1. Лисенков В.М. Статистическая теория безопасности движения поездов: учебник для студентов вузов. М.: ВИНТИ РАН, 1999. 331 с.
2. О разработке принципов и методов оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте / И.В. Мартынюк, Н.С. Флегонтов, Б.Л. Недорчук, Н.А. Имховик // Информационный бюллетень ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2005 года». 2002. №1-2. 17 с.
3. Мартынюк И.В., Флегонтов Н.С., Попов О.Н. О работах по обоснованию условий выбора оптимальных маршрутов перевозок опасных грузов на основе оценки рисков возникновения аварийных ситуаций и ущербов от них по различным направлениям железных дорог // Сборник трудов научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». М., 2005. С. 1-18.
4. Шевченко А.И. Повышение устойчивости перевозочного процесса на железнодорожном транспорте в условиях чрезвычайных ситуаций: дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 151 с.
5. СТО РЖД 1.02.(001-012)-2006. Безопасность железнодорожных перевозок. М., 2006. 120 с.
6. ГОСТ Р 54505-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте.
7. СТО РЖД (УРРАН) 1.02.034-2010. Общие правила оценки и управления рисками. Межгосударственный стандарт ГОСТ 33432-2015. Безопасность функциональная. Политика, программа обеспечения безопасности. Доказательство безопасности объектов железнодорожного транспорта», введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4.12.2015 г. № 2107-ст. 43 с.
8. СТО РЖД 02.037-2011. Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Управление стоимостью жизненного цикла систем, устройств и оборудования хозяйств ОАО «РЖД». М., 2012. 28 с.
9. Липидус В.А., Усольцев А.Н. Методика оценки показателей процессов, влияющих на безопасность движения, на основе оценки рисков. М.: Приоритет, 2012. 25 с.
10. Вережкина О.И. Обзор нормативно-методологического сопровождения процессом управления безопасностью движения // Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2021): сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2021. С. 57-61.
11. Вережкина О.И. Методы оценки показателей процессного подхода к управлению рисками в обеспечении безопасности движения // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. № 1. С. 76-81.
12. Вережкина О.И. Результаты применения гибридного метода оценки функциональных рисков нарушения безопасности движения на региональном и линейном уровнях в хозяйстве пути // Надежность и качество сложных систем. 2019. №1(25). С. 106-117.
13. Методика оценки функциональной безопасности на инфраструктуре ОАО «РЖД», утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 23 октября 2019 г. № 2343р. 2020. 12 с.
14. Методика проведения рейтинговой оценки железных дорог. Распоряжение ОАО «РЖД» от 31.01.2017 № 193р. 12 с.
15. Положение о классификации, порядке расследования и учета транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, утвержденное приказом Минтранса России от 18 декабря 2014 г. № 344 (в редакции приказов Минтранса России от 29 июля 2016 г. № 217 и от 1 июня 2018 г. № 218).
16. О мониторинге ключевых показателей деятельности холдинга «РЖД», утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 1 августа 2019. № 1656/р.

References

1. Lisenkov V.M. *Statisticheskaya teoriya bezopasnosti dvizheniya poezdov: uchebnik dlya studentov vuzov* [Statistical theory of train traffic safety: a textbook for university students]. Moscow: The All-Union Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences, 1999, 331 p. (In Russ.)
2. Martynyuk I.V., Flegontov N.S., Nedorchuk B.L., Imkhovik N.A. On the development of principles and methods for assessing the risks of emergencies in railway transport. *Informatsionnyi byulleten FTsP «Snizhenie riskov i smyagchenie posledstviy chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo khaktera v Rossiiskoy Federatsii do 2005 goda»* [In-

- formation Bulletin of the Federal Target Program on “Risk reduction and mitigation of the consequences of natural and industry-related emergencies in the Russian Federation until 2005”]. 2002;(1-2):17. (In Russ.)
3. Martynyuk I.V., Flegontov N.S., Popov O.N. On activities aimed at providing rationale for choosing the optimal routes for the dangerous cargo transportation based on the assessment of the risks of accidents and damage from them in various directions of railways. *Sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii «Bezopasnost dvizheniya poezdov»* [Proceedings of the Scientific and Practical Conference Train Traffic Safety]. Moscow, 2005, pp. 1-18. (In Russ.)
 4. Shevchenko A.I. *Povyshenie ustoychivosti perevozhnogo protsessa na zheleznodorozhnom transporte v usloviyakh chrezvychaynykh situatsiy: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving stability of the railway transportation process in emergency situations: PhD thesis]. Moscow, 2008. 151 p.
 5. Corporate Standard of Russian Railways, STO RZhD 1.02.(001-012)-2006. *Bezopasnost zheleznodorozhnykh perevozok* [Railway Transportation Safety]. Moscow, 2006, 120 p. (In Russ.)
 6. National standard of the Russian Federation GOST R 54505-2011. *Bezopasnost funktsionalnaya. Upravlenie riskami na zheleznodorozhnom transporte* [Functional safety. Risk management on railway transport].
 7. Corporate Standard of Russian Railways, STO RZhD (Resource, Risk and Reliability Management at Lifecycle Stages) 1.02.034-2010. General rules for risk assessment and management. Interstate Standard GOST 33432-2015. *Bezopasnost funktsionalnaya. Politika, programma obespecheniya bezopasnosti. Dokazatelstvo bezopasnosti obektov zheleznodorozhnogo transporta* [Functional safety. Safety policy, program. Evidence of safety of railway transport facilities]. It was put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 2107-st dated December 4, 2015. 43 p.
 8. Corporate Standard of Russian Railways, STO RZhD 02.037-2011. *Upravlenie resursami, riskami i nadezhnostyu na etapakh zhiznennogo tsikla (URRAN). Upravlenie stoimostyu zhiznennogo tsikla sistem, ustroystv i oborudovaniya khozyaystv OAO «RZHD»* [Resource, Risk and Reliability Management at Lifecycle Stages (URRAN). Cost management of the life cycle of systems, devices and equipment of OJSC Russian Railways]. Moscow, 2012, 28 p. (In Russ.)
 9. Lapidus V.A., Usoltsev A.N. *Metodika otsenki pokazateley protsessov, vliyayushchikh na bezopasnost dvizheniya, na osnove otsenki riskov* [The procedure for assessing indicators of processes influencing traffic safety based on risk assessment]. Moscow: Priority, 2012, 25 p. (In Russ.)
 10. Verevkin O.I. Review of regulatory and methodological support for the process of traffic safety management. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo (Transport-2021): sb. nauch. tr. mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Transport: Science, Education, Production (Transport-2021): Collection of Research Papers of the International Scientific and Practical Conference]. Rostov-on-Don, 2021, pp. 57-61. (In Russ.)
 11. Verevkin O.I. Methods for assessing indicators of the process approach to risk management in ensuring traffic safety. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of Rostov State Transport University]. 2015;(1):76-81. (In Russ.)
 12. Verevkin O.I. Results of the application of a hybrid method for assessing functional risks of traffic safety violations at regional and linear levels at transport facilities. *Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and Quality of Complex Systems]. 2019;(1(25)):106-117. (In Russ.)
 13. The procedure for assessing functional safety at the infrastructure of OJSC Russian Railways approved by Instruction of OJSC Russian Railways No. 2343r dated October 23, 2019. 2020, 12 p. (In Russ.)
 14. The procedure for the railway rating assessment. Instruction of OJSC Russian Railways No. 193r dated January 31, 2017. 12 p. (In Russ.)
 15. Regulations on the classification, procedure for investigating and recording transport accidents and other events related to violation of the rules on traffic safety and operation of railway transport approved by Order of the Ministry of Transport of Russia No. 344 dated December 18, 2014 (as amended by Orders of the Ministry of Transport of Russia No. 217 dated July 29, 2016 and No. 218 dated June 1, 2018). (In Russ.)
 16. On monitoring key performance indicators of the Russian Railways holding approved by Instruction of OJSC Russian Railways No. 1656/r dated August 1, 2019. (In Russ.)

Поступила 25.06.2023; принята к публикации 03.07.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 25/06/2023; revised 03/07/2023; published 25/09/2023

Васин Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Городское строительство, архитектура и дизайн», Тульский государственный университет, Тула, Россия. Email: vasin_sa53@mail.ru.

Вережкина Ольга Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой», Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия. Email: ov18111966@mail.ru.

Яицков Иван Анатольевич – доктор технических наук, профессор, декан Электромеханического факультета, профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия. Email: yia@rgups.ru.

Sergey A. Vasin – DrSc (Eng.), Professor, Department of Urban Construction, Architecture and Design, Tula State University, Tula, Russia. Email: vasin_sa53@mail.ru.

Olga I. Verevkina – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Field Operation Management, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia. Email: ov18111966@mail.ru.

Ivan A. Yaitskov – DrSc (Eng.), Professor, Dean of the Electromechanical Faculty, Professor of the Department of Railway Cars and Railway Car Facilities, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia. Email: yia@rgups.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.562
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-155-169



МОДЕЛЬ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СЕТЕЙ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Кузьменко В.П., Солёный С.В.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Внедрение новых технологий на базе светодиодов в сетях освещения приводит к появлению новых проблем в обеспечении и контроле качества электрической энергии и оценки надежности сетей освещения. Нелинейная природа данных осветительных приборов и сложность технического обслуживания создают значительные препятствия в получении реальной выгоды от экономии электрической энергии и затрудняют расчет реальной экономии средств. Для решения описанных проблем возникает необходимость усовершенствования процесса контроля качества и развития стратегий предиктивного обслуживания как способа повышения эффективности управления качеством сетей освещения. **Цель работы.** Целью исследований является анализ возможности и целесообразности применения стратегий предиктивного обслуживания в сетях светодиодного освещения. **Используемые методы.** В работе используются комплексный исследовательский подход, включающий анализ соответствующей литературы и конкретных практик использования предиктивного подхода в электрических сетях, методы предиктивного моделирования, аналитики и структурного анализа. **Новизна.** В работе предложена стратегия использования методов прогнозируемого обслуживания на примере предиктивной математической модели с элементами машинного обучения с учетом контекста контроля основных параметров сетей освещения. **Результат.** Представлена стратегия прогнозируемого обслуживания на примере предиктивной математической модели, разработаны рекомендации для практического применения предлагаемой стратегии прогнозируемого обслуживания в сетях освещения для прогнозирования неисправностей, оптимизации графиков технического обслуживания и интеграции процесса управления качеством в порядок эксплуатации. Результаты показывают возможность и целесообразность внедрения стратегии предиктивного обслуживания для повышения эффективности процессов контроля качества, надежности и экономии затрат в сетях светодиодного освещения. **Практическая значимость.** Результаты исследования имеют важное практическое значение для специалистов светотехнической отрасли в области управления качеством сетей освещения. Применяя разработанные модели и стратегию, организации могут оптимизировать ресурсы технического обслуживания, сократить время простоя и обеспечить повышение качества систем светодиодного освещения.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание, сети освещения, светодиодные светильники, управление качеством, качество электроэнергии в сетях освещения, энергоэффективность сетей освещения

© Кузьменко В.П., Солёный С.В., 2023

Для цитирования

Кузьменко В.П., Солёный С.В. Модель предиктивного обслуживания для управления качеством сетей светодиодного освещения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 155-169. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-155-169>



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

A PREDICTIVE MAINTENANCE MODEL FOR QUALITY MANAGEMENT OF LED LIGHTING NETWORKS

Kuzmenko V.P., Solenyi S.V.

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The introduction of new LED-based technologies in lighting networks leads to new problems in ensuring and controlling the quality of electrical energy and assessing reliability of lighting networks. The non-linear nature of these lighting devices and complexity of maintenance create significant obstacles to obtaining real benefits of electricity savings and make it difficult to calculate the real cost savings. To address the problems described, there is a need to improve the quality control process and develop predictive maintenance strategies as a way to improve efficiency of lighting network quality management. **Objectives.** The research is aimed at studying and analyzing the possibility and feasibility of using predictive maintenance strategies in LED lighting networks. **Methods Applied.** The authors use a comprehensive research approach that includes an analysis of relevant literature and specific practices for using the predictive approach in electric grids, methods of predictive modeling, analytics, and a structural analysis. **Originality.** The paper proposes a strategy for using predictive maintenance methods, showing the example of a predictive mathematical model with elements of machine learning, factoring into the control context of the main parameters of lighting networks. **Result.** The paper presents the predictive maintenance strategy, using the example of a predictive mathematical model, recommendations developed for a practical application of the proposed predictive maintenance strategy in lighting networks for fault prediction, optimization of maintenance schedules and integration of a quality management process into an operation procedure. The results show the possibility and feasibility of implementing a predictive maintenance strategy to improve efficiency of quality control processes, reliability and cost savings in LED lighting networks. **Practical Relevance.** The results of the study have important practical relevance for lighting industry professionals in the field of lighting network quality management. By applying the developed models and strategy, organizations can optimize maintenance resources, reduce downtime periods and ensure the improved quality of LED lighting systems.

Keywords: predictive maintenance, lighting networks, LED lighting fixtures, quality management, quality of electricity in lighting networks, energy efficiency of lighting networks

For citation

Kuzmenko V.P., Solenyi S.V. A Predictive Maintenance Model for Quality Management of LED Lighting Networks. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 155-169. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-155-169>

Введение

Широкое распространение технологии светодиодного освещения произвело революцию в индустрии освещения, предлагая более энергоэффективные и более экологичные решения. Однако обеспечение качества и надежности сетей освещения сопряжено со значительными трудностями. Незапланированные отказы, сложность технического обслуживания и необходимость постоянного контроля требуют разработки эффективных стратегий управления качеством сетей освещения. В этой связи прогнозируемое техническое обслуживание становится перспективным подходом для решения этих проблем, оптимизации методов технического обслуживания и повышения общей производительности сетей светодиодного освещения.

Предиктивное техническое обслуживание – это упреждающая стратегия технического обслуживания, направленная на прогнозирование отказов оборудования или снижения производительности до того, как они произойдут. Это предполагает использование методов анализа данных, таких как статистическое моделирование, машинное обучение и мониторинг состояния, для выявления ранних признаков потенциальных проблем и обеспечения возможности своевременного вмешательства.

Предиктивное обслуживание предполагает использование передовых методов анализа данных, алгоритмов машинного обучения и мониторинга в режиме реального времени для прогнозирования отказов оборудования и соответствующего планирования работ по обслуживанию. Благодаря использованию существующих эксплуата-

ционных данных, сведений о производительности, учету факторов окружающей среды и применению методов цифрового моделирования, предиктивное обслуживание позволяет выявить закономерности деградации и потенциальные риски отказа светодиодных светильников. В результате своевременных и целенаправленных действий организации могут оптимизировать ресурсы, сократить временные издержки и обеспечить бесперебойное и высококачественное освещение.

Чтобы дать рекомендации по внедрению эффективных стратегий предиктивного обслуживания, а также для полноценного анализа и исследования возможности применения его стратегий в качестве нового подхода к управлению качеством в сетях светодиодного освещения, необходимо провести обзор основных методологий, инструментов и преимуществ предиктивного обслуживания и сделать практические выводы и рекомендации по интеграции практики предиктивного обслуживания в управлении сетью освещения и произвести обзор и анализ проблем управления качеством сетей светодиодного освещения с учетом принципов и методологии предиктивного обслуживания.

Качество и надежность сетей освещения являются важными факторами для обеспечения оптимальных характеристик освещения, энергоэффективности и удовлетворенности потребителей. Однако динамичный характер сетей освещения, меняющиеся условия окружающей среды и потенциальная деградация основных узлов, элементов и характеристик оборудования создают проблемы для поддержания постоянного качества и минимизации незапланированных отказов.

Традиционная практика технического обслуживания часто приводит к увеличению времени простоя, повышению эксплуатационных расходов и ухудшению качества освещения. Поэтому существует необходимость в проактивной и эффективной стратегии управления качеством, которая позволяет предвидеть потенциальные отказы, оптимизировать деятельность по техническому обслуживанию и обеспечить непрерывное высококачественное обслуживание освещения.

Решение проблем, связанных с управлением качеством сетей светодиодного освещения с помощью стратегий предиктивного технического обслуживания, имеет решающее значение для организаций, стремящихся оптимизировать ресурсы технического обслуживания, снизить затраты и повысить удовлетворенность клиентов. Используя

данную практику, заинтересованные стороны могут улучшить планирование технического обслуживания, оптимизировать потребление энергии, обеспечить стабильную работу сетей освещения. Более того, предиктивное техническое обслуживание способствует достижению целей устойчивого развития за счет минимизации отходов, оптимизации использования ресурсов и снижения воздействия на окружающую среду, связанного с возможными ненужными или избыточными мерами по техническому обслуживанию.

Анализ существующих актуальных исследований в данной области дает представление о применении стратегий прогностического обслуживания, моделей, основанных на данных, и методов машинного обучения в контексте сетей светодиодного освещения [1]. Они демонстрируют преимущества проактивного обслуживания, включая снижение затрат, повышение энергоэффективности и надежности. Ссылаясь на эти исследования, можно эффективно отразить ключевые выводы и достижения в области предиктивного обслуживания для сетей светодиодного освещения.

В исследованиях [2] предлагается комплексная стратегия предиктивного обслуживания систем с использованием моделей, основанных на собранных данных. Их подход включает сбор данных датчиков, использование алгоритмов машинного обучения и осуществление мониторинга в режиме реального времени для прогнозирования потенциальных отказов и оптимизации графиков технического обслуживания для оборудования.

В исследованиях [3] предлагается подход к применению иерархических нейросетевых методов для контроля качества изделий. Подход больше направлен на технологические процессы, однако может быть переориентирован и на обеспечение контроля и управления качеством сетей освещения.

Анализ существующих актуальных исследований показывает, что представленные источники дают ценную информацию о применении стратегий прогнозирования технического обслуживания, моделей, управляемых данными, и методов машинного обучения в различных областях, включая системы светодиодного освещения [4, 5]. Они подчеркивают преимущества прогнозируемого обслуживания, такие как снижение затрат, повышение энергоэффективности и надежности. Однако важно отметить, что, хотя эти источники вносят значительный вклад в область профилак-

тического обслуживания, они не охватывают в полной мере конкретный контекст сетей освещения и светодиодных осветительных приборов.

Несмотря на многообещающие результаты исследований в области машинного обучения, применение данных методов в сфере обслуживания, мониторинга и эксплуатации инженерных технических систем все еще ограничено. Управление объектами в строительстве также не в полной мере использует эффективность данных методов, особенно в порядке текущей эксплуатации и обслуживании. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха, сети освещения, слаботочные инженерные системы связи и оповещения являются основой операций по управлению и техническому обслуживанию объектов, и случайные неисправности могут привести к существенным денежным потерям [5, 6].

В контексте управления качеством сетей освещения со светодиодными осветительными приборами (СОП) необходимы дальнейшие исследования для изучения уникальных проблем и возможностей, связанных с управлением ими. Будущие исследования должны быть сосредоточены на интеграции методов прогнозного технического обслуживания, адаптированных к конкретным требованиям сетей освещения, охватывающих такие параметры, как качество электроэнергии, характер износа светильников и оптимизацию энергоэффективности. Это связано со сложностью моделирования нелинейных нагрузок и искажений в электрической сети, генерируемых данными изделиями, а также оценки надежности и реально-го срока службы изделий [6].

Материалы и методы исследования

Целью предиктивного обслуживания является оптимизация работ, сокращение времени простоя, повышение общей надежности и производительности оборудования. Применение таких стратегий позволяет оценить вероятность выхода из строя изделия. В этом контексте техническое обслуживание можно планировать заранее, исключая незапланированные простои и максимально увеличивая срок службы оборудования.

Для реализации математической базы предиктивных моделей в случае со светодиодными осветительными приборами рекомендуется применять стандарты LM-80 и TM-21, которые используются для получения экстраполяции данных о световом потоке и могут вводиться в алгоритм, разработанный на основе модели экспоненциальной деградации [7, 8].

В целом предиктивное обслуживание основывается на анализе данных, моделировании и непрерывном мониторинге оборудования, обеспечивая значительные преимущества с точки зрения улучшения планирования технического обслуживания, повышения надежности оборудования и экономии средств.

Процесс предиктивного обслуживания обычно включает в себя этапы по сбору и анализу данных. Соответствующие данные собираются из различных источников, включая датчики, исторические записи технического обслуживания и мониторинг. Эти данные дают представление о поведении оборудования, тенденциях производительности и операционной среде. Далее производится анализ собранных данных, к которым применяются аналитические методы для выявления закономерностей, аномалий или индикаторов потенциальных сбоев.

Статистические модели и алгоритмы машинного обучения используются для анализа данных и разработки прогностических моделей. Затем производится процесс прогнозирующего моделирования и разрабатываются модели с использованием проанализированных данных для прогнозирования производительности оборудования, обнаружения ранних признаков износа или прогнозирования того, когда потребуются мероприятия по техническому обслуживанию.

Для качественного и полного применения метода предиктивного обслуживания необходимо также проведение мониторинга оборудования в режиме реального времени или хотя бы периодического мониторинга для непрерывного сбора данных и сравнения их с прогнозами, сделанными с помощью прогностических моделей. Это позволяет выявлять отклонения, аномалии или признаки раннего предупреждения, которые могут потребовать вмешательства в техническое обслуживание, так как сложность построения моделей отказов или некорректной работы устройств с нелинейными характеристиками крайне сложный процесс. Так, например, сложность моделирования параметров СОП обусловлена их нелинейным поведением в качестве нагрузки в электрической сети [9-11].

Представим математическую модель для применения стратегий прогнозного технического обслуживания в контексте сетей светодиодного освещения.

Первым этапом является сбор данных.

Пусть X – матрица, представляющая собран-

ные данные датчиков, исторические записи технического обслуживания и данные об окружающей среде, где каждая строка представляет конкретный экземпляр, а каждый столбец представляет определенную функцию или параметр, а Y – вектор, представляющий требование к техническому обслуживанию или целевую переменную, указывающую время до отказа или порог снижения производительности.

Для организации процесса предварительной обработки данных необходимо выполнить нормализацию матрицы данных X , чтобы обеспечить сопоставимые масштабы для различных параметров. Пусть X_{norm} обозначает нормализованную матрицу данных. Тогда при использовании алгоритмов машинного обучения, например регрессионной модели, для разработки прогностической модели можно представить функцию $f(X_{norm})$ как прогнозирующую модель, где f – функция, которая сопоставляет входную матрицу, нормализованную матрицу данных X_{norm} с прогнозируемым требованием к техническому обслуживанию Y_{hat} .

Вторым этапом является проверка на целостность данных.

Необходимо проверить, нет ли пропущенных значений в собранных данных. В случае, если присутствуют пропущенные значения, возможно вычисление среднего значения, чтобы заполнить пропущенные значения. В таком случае пусть X_{filled} обозначает матрицу с пропущенными значениями, заполненными путем вычисления среднего значения. Следует также обращать внимание на отклонения в данных, чтобы обеспечить их качество и достоверность. Таким образом можно ввести z-балл для каждого признака в X_{filled} путем вычитания среднего значения и деления на стандартное отклонение.

Пусть Z обозначает матрицу z-баллов. Также необходимо установить пороговое значение для определения выбросов. Тогда любая точка данных в Z с z-баллом, превышающим пороговое значение, должна будет считаться выбросом.

Далее необходимо определить новую матрицу $X_{outlier_removed}$, удалив строки, соответствующие выбросам, из X_{filled} .

Третьим этапом является выбор целевых функций.

Необходимо произвести выбор соответствующих функций из $X_{outlier_removed}$, которые с наибольшей вероятностью будут способствовать выполнению задачи прогнозного обслуживания.

Пусть $X_{selected}$ обозначает матрицу, содержащую выбранные объекты. Применяя методы проектирования объектов для создания новых, которые отражают значимые закономерности можно, например, рассчитать коэффициент энергоэффективности, разделив светоотдачу на потребляемую мощность, после чего добавить эту новую функцию в $X_{selected}$.

Далее необходимо выполнить обучение прогностической модели, сопоставив ее с нормализованной матрицей данных X_{norm} и целевой переменной Y . Это включает в себя поиск оптимальных параметров модели, которые минимизируют ошибку прогнозирования. Также необходимо нормализовать матрицу объектов $X_{selected}$, чтобы обеспечить сопоставимые масштабы для различных объектов. Целесообразно применить минимальное-максимальное масштабирование для изменения значений каждого объекта в $X_{selected}$ в пределах предопределенного диапазона, такого как (0, 1).

Теперь для каждого объекта в $X_{selected}$ необходимо вычислить минимальное значение (min) и диапазон (max - min). Вычитая минимальное значение из значения каждого признака и разделив на диапазон, можно получить нормализованные значения.

Разделение данных.

Разделив предварительно обработанные данные на обучающие, валидационные и тестовые наборы данных, необходимо выделить определенный процент данных (например, 70%) для обучающего набора, меньшую часть (например, 15%) для проверочного набора и оставшуюся часть (15%) для тестового набора.

Пусть X_{train} , X_{val} и X_{test} представляют соответствующие матрицы данных.

Чтобы оценить эффективность прогностической модели, следует использовать соответствующие оценочные показатели, такие как среднеквадратичная ошибка, или коэффициент детерминации (R -квадрат), и оценить способность модели точно прогнозировать требования к техническому обслуживанию на основе заданных входных параметров.

При мониторинге в режиме реального времени необходимо собирать данные датчиков, подключенных к сети с СОП, и предварительно обрабатывать их таким же образом, как было описано на предыдущих шагах. Для этого обозначим матрицу объектов реального времени как $X_{realtime}$ и применим прогнозирующую модель $f(X_{norm})$ к

матрице характеристик реального времени $X_{realtime}$, чтобы получить прогнозируемую потребность в техническом обслуживании $Y_{hat_realtime}$.

Сравнивая прогнозируемую потребность в техническом обслуживании $Y_{hat_realtime}$ с предопределенными пороговыми значениями технического обслуживания, возможно организовать генерацию предупреждений или нотификации, когда $Y_{hat_realtime}$ превышает эти пороговые значения, указывая на необходимость упреждающих действий по техническому обслуживанию.

Также для адекватности функционирования модели необходимо включать в данные о сети мероприятия по техническому обслуживанию, периодически обновляя и переобучая прогнозную модель, используя обновленный набор данных, необходимых для фиксации новых закономерностей и повышения точности модели.

Описанные выше шаги представляют собой пример стратегии прогнозируемого технического обслуживания для сетей светодиодного освещения. Математическое описание включает в себя обработку недостающих данных путем вычисления среднего значения, обнаружение отклонений с использованием z-оценок, выбор соответствующих функций, разработку новых функций, нормализацию данных с использованием минимально-максимального масштабирования и разделение данных на обучающие, валидационные и тестовые наборы. Выполняя эти математические операции, появляется возможность подготовить данные для дальнейшего анализа и разработки моделей, что способствует эффективному профилактическому обслуживанию сетей светодиодного освещения.

Полученные результаты и их обсуждение

Рассмотрим практический пример использования модели прогнозируемого обслуживания сети светодиодного освещения.

Шаг 1: сбор данных.

Для согласования модели с реальными данными были собраны данные об измерениях активной мощности, напряжения сети, температуры светильника и светового потока в сети освещения с 21 светодиодными осветительными приборами моделями аналога ЛПО номинальной мощностью 36 Вт и номинальным световым потоком 1000 Лм.

Собранные данные необходимо представить в виде матрицы X , где каждая строка соответствует

определенному СОП, а каждый столбец представляет определенную функцию или параметр.

Примем, что X – это матрица размером 21×4 , где столбцы представляют потребляемую активную мощность (в ваттах), напряжение (в вольтах), температуру светодиода (в градусах Цельсия) и светотдачу (в люменах) соответственно.

Данные матрицы X собраны в табл. 1.

Таблица 1. Матрица X собранных данных для практической реализации обучающей модели

Table 1. Matrix X of collected data for practical implementation of the training model

Потребляемая мощность, Вт	Напряжение сети, В	Температура светодиода, °C	Светотдача, Лм
40	220	42	1020
44	215	46	1050
44	225	47	1050
42	210	46	1020
40	210	49	1020
40	212	43	1010
45	230	49	1070
40	211	43	1020
48	230	53	1100
40	220	43	1020
40	221	42	1020
40	215	42	1010
44	225	46	1060
45	226	49	1070
46	226	51	1080
40	215	43	1030
45	224	50	1090
40	215	42	1050
48	230	53	1110
40	215	40	1010
40	217	42	1020

Шаг 2: недостающая обработка данных.

Примем, что в собранных данных нет пропущенных значений. Таким образом, никаких дополнительных вычислений или манипуляций не требуется.

Шаг 3: обнаружение выбросов.

Необходимо вычислить z-балл для каждого признака в X , чтобы выявить все возможные выбросы.

Предположим, что пороговое значение 3 используется для обнаружения выбросов. Любая

точка данных в Z с z -баллом, превышающим 3, считается выбросом.

Тогда при X матрице с размером n строк и m столбцов

$$X = [x_{ij}], \quad (1)$$

где x_{ij} представляет собой элемент i -й строки и j -го столбца матрицы X .

Далее вычисляются среднее значение μ и стандартное отклонение σ для каждого признака.

Таким образом, z -балл для каждого элемента в матрице X вычисляется следующим образом:

$$z_{ij} = \frac{X_{ij} - \mu_j}{\sigma_j}, \quad (2)$$

$$\mu_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij}, \quad (3)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \mu_j)^2}, \quad (4)$$

$$s_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } |Z_{ij}| > 0 \\ 0, & \text{если } |Z_{ij}| \leq 0 \end{cases}. \quad (5)$$

где z_{ij} – z -балл для элемента в i -й строке и j -м столбце X ; μ_j – среднее значение для j -го столбца; σ_j – стандартное отклонение для j -го столбца.

Далее необходима установка порогового значения. В данном случае θ – это предопределенное пороговое значение. Выбросы выявляются путем сравнения абсолютных z -баллов с пороговым значением θ .

Далее создается двоичная матрица выбросов, где выбросы $s_{ij} = 1$, если абсолютный z -балл $|Z_{ij}|$ больше порогового значения, и выброс $s_{ij} = 0$ – в противном случае.

Результирующая матрица выбросов будет иметь те же размеры, что и матрица X , и ее элементы будут указывать, является ли каждый соответствующий элемент в матрице X выбросом или нет.

Шаг 4: выбор и введение новой функции.

Примем, что были выбраны параметры энергопотребления и температуры, соответствующие представленной модели прогнозируемого технического обслуживания.

Создадим новую функцию, рассчитывая отношение потребляемой мощности к температуре:

$$R_{P/T} = T \cdot P, \quad (6)$$

где $R_{P/T}$ – создаваемая характеристика отношения потребляемой мощности к температуре; T – параметр температуры светодиода из матрицы данных X ; P – параметр энергопотребления из матрицы данных X .

Данное соотношение представляет собой зависимость между потребляемой мощностью и температурой для каждой точки (строки) в матрице данных X .

Шаг 5 и 6: нормализация, разделение данных.

Создается матрица X_{selected} , содержащая выбранные объекты (в данном случае первый и третий столбцы матрицы X):

$$X_{\text{selected}} = \begin{bmatrix} 40 & 42 \\ 44 & 46 \\ 44 & 47 \\ 42 & 46 \\ 40 & 49 \\ 40 & 43 \\ 45 & 49 \\ 40 & 43 \\ 48 & 53 \\ 40 & 43 \\ 40 & 42 \\ 40 & 42 \\ 44 & 46 \\ 45 & 49 \\ 46 & 51 \\ 40 & 43 \\ 45 & 50 \\ 40 & 42 \\ 48 & 53 \\ 40 & 40 \\ 40 & 42 \end{bmatrix}.$$

Далее вычисляется отношение мощности к температуре путем деления первого столбца на второй столбец X_{selected}

Результатом будет новая матрица X_{selected}^* с вычисленным отношением мощности к температуре, добавленным в виде нового столбца:

$$X_{selected*} = \begin{bmatrix} 40 & 42 & 40 / 42 \\ 44 & 46 & 44 / 46 \\ 44 & 47 & 44 / 47 \\ 42 & 46 & 42 / 46 \\ 40 & 49 & 40 / 49 \\ 40 & 43 & 40 / 43 \\ 45 & 49 & 45 / 49 \\ 40 & 43 & 40 / 43 \\ 48 & 53 & 48 / 53 \\ 40 & 43 & 40 / 43 \\ 40 & 42 & 40 / 42 \\ 40 & 42 & 40 / 42 \\ 44 & 46 & 44 / 46 \\ 45 & 49 & 45 / 49 \\ 46 & 51 & 46 / 51 \\ 40 & 43 & 40 / 43 \\ 45 & 50 & 43 / 50 \\ 40 & 42 & 40 / 42 \\ 48 & 53 & 48 / 53 \\ 40 & 40 & 40 / 40 \\ 40 & 42 & 40 / 42 \end{bmatrix}.$$

Далее необходимо нормализовать выбранную матрицу объектов $X_{selected*}$, используя минимальное-максимальное масштабирование. Для каждого объекта вычисляется минимальное значение (min) и диапазон (max - min).

Далее минимальное значение вычитается из значения каждого признака и делится на диапазон, чтобы получить нормализованные значения. Создается матрица нормализованных объектов $X_{normalized}$. Общее количество данных в нормализованной матрице данных $X_{normalized}$ обозначается через n .

Разделяются предварительно обработанные данные на обучающие, валидационные и тестовые наборы данных. Примем, что 70% данных выделено для обучения, 15% – для валидации и 15% – для тестирования. Количество данных, выделенных для обучающего набора, рассчитывается как 70% от общего количества данных и обозначается как $n_{train} = [0,7 \times n]$.

Количество данных, выделенных для набора проверки, рассчитывается как 15% от общего

количества данных и обозначается как $n_{val} = [0,15 \times n]$.

Далее обучающие, валидационные и тестовые матрицы данных обозначаются как X_{train} , X_{val} и X_{test} соответственно.

После того как были определены обучающие, валидационные и тестовые матрицы данных, для обучения модели производится случайная перестановка от 1 до n . Для этого вводится результирующий массив случайных перестановок idx .

Математически это можно представить в виде $idx = \text{random} \{1, 2, \dots, n\}$, в таком случае массив idx будет хранить случайно переставленные индексы.

Если Y – это вектор, представляющий целевую переменную (в данном случае светоотдача), то необходимо извлечь значения светового потока из четвертого столбца исходной матрицы X и сохранить их в векторе Y .

Тогда для обучающего набора

$$X_{train} = X_{normalized} [idx (1 : n_{train})].$$

Для валидационного набора

$$X_{val} = X_{normalized} [idx (n_{train} + (1 : n_{train}) + n_{val})].$$

Для тестового набора

$$X_{test} = X_{normalized} [idx (n_{train} + n_{val} + 1)].$$

Аналогично создаются целевые переменные для обучающих, валидационных и тестовых наборов Y_{train} , Y_{val} , Y_{test} .

Далее должны выполняться подгонка и обучение модели.

Шаг 7: подгонка модели.

Так как наиболее распространенной и простой является модель линейной регрессии, то рассмотрим, как в данном случае будет происходить обучение с использованием отобранного обучающего набора данных из матрицы X с использованием модели линейной регрессии. Выбор модели зависит от конкретных характеристик данных, сложности взаимосвязей между переменными и требований к производительности. Выбор наилучшей модели для данной задачи прогнозного обслуживания зависит от таких факторов, как размер набора данных, характер взаимосвязей в данных, доступные вычислительные ресурсы и требования к интерпретируемости. На практике часто бывает полезно попробовать несколько моделей и сравнить их характеристики, используя подходящие оценочные показатели, чтобы определить наиболее эффективную для конкретного применения.

Целью этой модели является прогнозирование светового потока на основе других переменных. В алгебраических терминах процесс подгонки модели линейной регрессии включает в себя поиск наиболее подходящей линейной функции, которая связывает входные характеристики (X_{train}) с целевой переменной Y_{train} и будет иметь вид

$$Y_{train} = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_{train,1} + \beta_2 \cdot X_{train,2} + \dots + \beta_p \cdot X_{train,p}, \quad (7)$$

где Y_{train} – вектор, представляющий целевую переменную для обучающего набора; $X_{train,1}$, $X_{train,2}$, ..., $X_{train,p}$ – индивидуальные характеристики в обучающем наборе; β_0 , β_1 , β_2 , ..., β_p – коэффициенты, которые необходимо оценить.

Цель подгонки модели состоит в том, чтобы найти значения β_0 , β_1 , β_2 , ..., β_p , которые минимизируют ошибку прогнозирования (обычно используется метод наименьших квадратов).

Как только модель настроена, ее можно использовать для составления прогнозов на основе новых данных.

Шаг 8: тестирование модели и оценка производительности.

Прогноз на обучающем наборе: $Y_{train_pred} = f(X_{train})$, где Y_{train_pred} – вектор, представляющий прогнозируемую целевую переменную в наборе проверки.

Прогноз по валидационному набору: $Y_{val_pred} = f(X_{val})$, где Y_{val_pred} – вектор, представляющий прогнозируемую целевую переменную в наборе проверки.

Прогноз по набору тестирования: $Y_{test_pred} = f(X_{test})$, где Y_{test_pred} – вектор, представляющий прогнозируемую целевую переменную в тестовом наборе, здесь функция f представляет модель линейной регрессии, полученную на шаге 7, благодаря ей сопоставляются входные характеристики с прогнозируемой целевой переменной, используя оцененные коэффициенты.

Выражения $Y_{train_pred} = f(X_{train})$, $Y_{val_pred} = f(X_{val})$ и $Y_{test_pred} = f(X_{test})$ представляют прогнозируемые значения целевой переменной в наборах обучения, валидации и тестирования соответственно.

Далее происходит оценка модели.

Среднеквадратичная ошибка (RMSE) для обучающего набора

$$RMSE_{train} = \sqrt{\frac{1}{n_{train}} \sum_{i=1}^{n_{train}} (Y_{train}[i] - Y_{train_pred}[i])^2}. \quad (8)$$

Среднеквадратичная ошибка (RMSE) для валидационного и тестирующего наборов определяется аналогично.

Эти ошибки представляют собой среднюю величину различий между фактическими и прогнозируемыми значениями целевых переменных в каждом наборе.

R-квадрат (коэффициент детерминации) для обучающего набора вычисляется по формуле

$$R_{train}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{train}} (Y_{train}[i] - Y_{train_pred}[i])^2}{\sum_{i=1}^{n_{train}} (Y_{train}[i] - \bar{Y}_{train})^2}. \quad (9)$$

Для валидационного и тестирующего наборов вычисляется аналогично.

Для подтверждения работы стратегии на примере модели был написан код для решения примера представленной модели в среде компьютерного моделирования Matlab.

В программном обеспечении Matlab используется функция «film» для выполнения процесса подгонки модели линейной регрессии к обучающим данным X_{train} и Y_{train} . Он автоматически оценивает коэффициенты β_0 , β_1 , β_2 , ..., β_p и создает переменную LinearModel, которая представляет собой подогнанную модель.

Затем модель используется для составления прогнозов по наборам данных для обучения, валидации и тестирования.

Производительность модели оценивается с использованием среднеквадратичной ошибки (RMSE) и статистики в R-квадрат.

RMSE дает представление о том, насколько сильно прогнозы в среднем отклоняются от фактических значений в наборе данных, в то время как R-квадрат объясняет, какую часть дисперсии в данных способна объяснить модель.

Для обучающих, валидационных и тестовых наборов данных были получены точечные графики реальных, прогнозируемых данных, а также и графики остатков (разница значений между фактическими значениями целевой переменной и прогнозируемыми значениями целевой переменной из модели).

Точечные графики отображают взаимосвязь между фактическими и прогнозируемыми значениями, в то время как остаточные графики показывают разницу между этими значениями, что помогает идентифицировать любые закономерности, которые модель, возможно, не улавливает. Следует отметить, что количество точек на графике не соответствует количеству значений матрицы X не по причине их отсутствия, а по причине совпадения значений.

Результаты оценки точности модели с использованием среднеквадратичной ошибки ($RMSE$) и статистики в R -квадрат представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты оценки точности модели обучающей модели

Table 2. Results of estimated accuracy of the training model

Набор данных модели	$RMSE$	R -квадрат
Обучающий набор	7,341609	0,943203
Валидационный набор	20,507601	-0,455790
Тестирующий набор	11,135064	0,912990

Среднеквадратичная ошибка ($RMSE$) обучающего набора составляет $\sim 7,34$, а показатель R -квадрат (R^2) $\sim 0,94$. Это указывает на то, что модель обладает высокой производительностью при обработке обучающих данных, поскольку меньшее значение $RMSE$ означает меньшие ошибки прогнозирования, а оценка R^2 , близкая к 1, указывает на то, что модель объясняет высокую долю дисперсии в целевой переменной.

$RMSE$ проверочного набора данных значительно больше по сравнению с обучающим набором ($\sim 20,5$), а оценка R^2 отрицательна ($\sim -0,46$). Это говорит о том, что модель плохо обобщается на невидимые данные и, возможно, перестраивается на обучающие данные.

Переобучение происходит, когда модель слишком хорошо усваивает обучающие данные, включая их шум и выбросы, и, следовательно, плохо работает с новыми, невидимыми данными.

Тестовый набор (тестирование). На данном этапе модель показывает корректную работу, с $RMSE$ ($\sim 11,14$) и R^2 ($\sim 0,91$), что очень похоже на результаты обучения. Однако это не согласуется с плохими результатами проверки, что может быть связано с конкретными образцами в наборе для тестирования.

Таким образом, для такого небольшого количества данных модель показывает хорошие результаты. При увеличении количества данных точность модели будет увеличиваться.

Результаты работы модели при использовании представленного кода в среде Matlab показаны на рис. 1. Данные диаграммы позволяют помочь лучше понять модель и данные. Поскольку модель прогнозирования построена по модели линейной регрессии, то точечные диаграммы фактических и прогнозируемых значений позволяют визуализировать точность модели. В идеальном случае точки должны располагаться вдоль линии под углом 45° , а графики остатков позволяют проверить предположение о постоянной дисперсии ошибок.

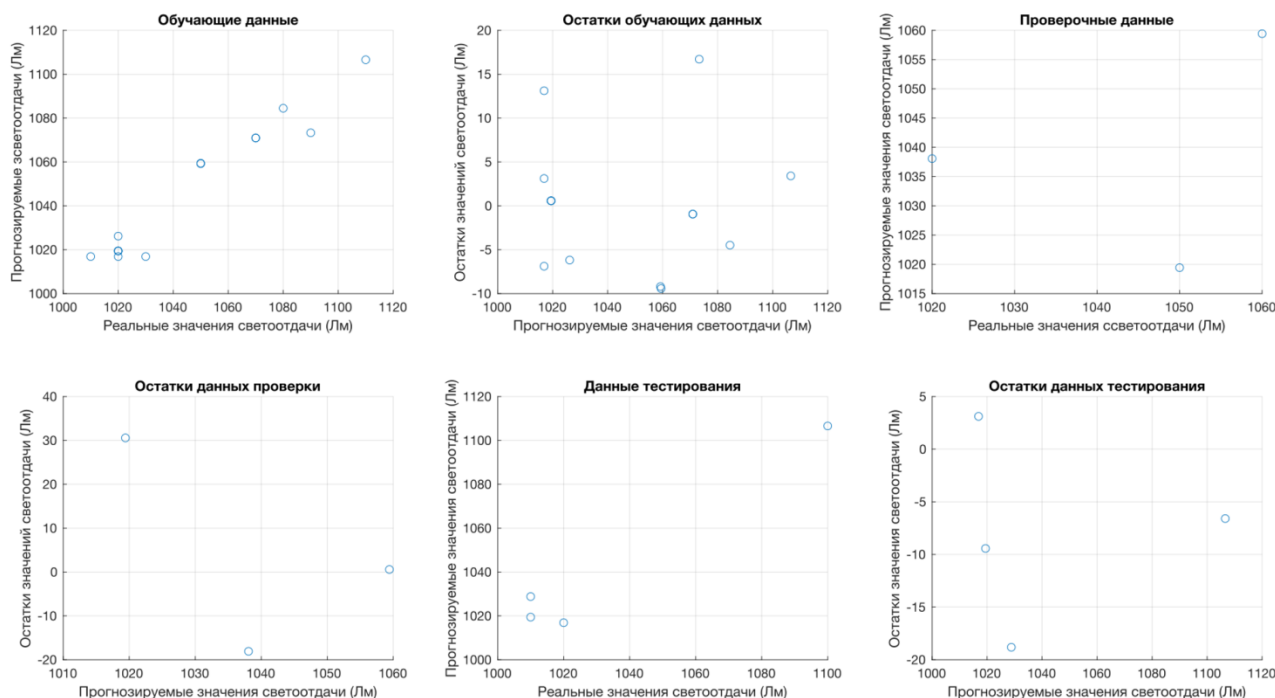


Рис. 1. Диаграммы оценки производительности модели для прогнозного обслуживания сети светодиодного освещения

Fig. 1. Model performance evaluation plots for LED lighting network predictive maintenance

Представленные на **рис. 1** диаграммы показывают сравнение фактических целевых значений из наборов данных Y_{train} , Y_{val} , Y_{test} со значениями, предсказанными моделью (Y_{train_pred} , Y_{val_pred} , Y_{test_pred}). Модель с идеальной точностью построила бы график, где все точки лежат на прямой диагональной линии, то есть вектор актуальных значений был бы равен вектору прогнозируемых значений. Отклонение от этой линии указывает на ошибки прогнозирования. Диаграммы остатков указывают на разницу значений между фактическими значениями целевой переменной и прогнозируемыми значениями целевой переменной из модели. Если значение равно нулю или близко к нулю, то на диаграмме оно не отображается. Проверочные диаграммы и диаграммы тестирования необходимы для проверки и управления моделью при внесении новых данных или изменении целевой функции прогнозирования модели. Основную информацию о предиктивной способности модели несут первые две диаграммы. Первая диаграмма показывает спрогнозированный моделью уровень светоотдачи (ось ординат) и соответствующий ему реальный уровень светоотдачи.

Основное управленческое решение в данном случае зависит от целевой функции прогнозирования и выбираемого набора данных. Рассматриваемый пример, с учетом достаточной точности, полученной в модели, позволяет принимать решения о необходимости замены осветительного прибора, при уменьшении его светоотдачи до уровня ниже требуемого (или ниже гарантийного). Основываясь на выходных параметрах модели, можно сделать несколько технических выводов. Во-первых, значение признаков функции, которые были использованы (столбец 1, столбец 2 и столбец 3 в матрице X), в данном случае являются предикторами значений светоотдачи (столбец 4). Об этом свидетельствуют высокие значения R^2 в наборе для обучения и тестирования, указывающие на то, что большая часть различий в световом потоке может быть объяснена этими особенностями. Во-вторых, несмотря на потенциальную переобучаемость, модель хорошо работает на тестовом наборе, что позволяет предположить, что она все еще может хорошо обобщаться на новые данные. Однако это требует дальнейшего изучения, учитывая низкую производительность набора для проверки. В результате возникает возможность с достаточной точностью отслеживать как изменения уровней освещенности в сети освещения, так и контролировать гарантийные обязательства поставщика и производителя осветительных приборов, что имеет высокую актуальность в протяженных се-

тях искусственного освещения, таких как уличные сети освещения дорожного полотна, городские сети освещения, железнодорожные и т.д.

Внедрение данной модели и стратегии прогнозирования в действующую сеть светодиодного освещения потребует выполнения нескольких технических шагов и развертывания дополнительных технических решений:

1. Инфраструктура сбора данных. Для непрерывного сбора данных из сети светодиодного освещения потребуется внедрить датчики и устройства сбора данных. Эти устройства должны быть способны измерять ключевые характеристики, используемые в модели, то есть первые три столбца матрицы X .

2. Хранение и управление данными. Собранные данные необходимо будет эффективно хранить и управлять ими. В зависимости от масштаба сети это может включать в себя настройку локальных серверов или использование облачных решений. Необходимо будет установить процедуры управления данными, включая очистку, обработку и регулярное резервное копирование данных.

3. Реализация модели. Сама прогностическая модель может быть реализована несколькими способами. Она может быть настроена на локальном сервере или в облаке в зависимости от масштаба и потребностей сети и эксплуатирующей организации. Модель должна быть закодирована в скрипт, который можно запускать регулярно или в режиме реального времени для получения прогнозов на основе текущих данных датчиков. Это включает в себя развертывание модели в инфраструктуре, интеграцию ее с компонентами сбора и хранения данных и настройку интерфейса для обновления модели и мониторинга.

4. Система оповещения. С моделью должна быть интегрирована система оповещения для генерации предупреждений или уведомлений о том, когда прогнозируемые требования к техническому обслуживанию превышают заранее определенные пороговые значения.

5. Планирование технического обслуживания. Прогнозная информация о техническом обслуживании, предоставляемая моделью, поможет в планировании технического обслуживания. Графики технического обслуживания могут быть оптимизированы на основе прогнозируемых требований к техническому обслуживанию, обеспечивая принятие упреждающих мер для предотвращения сбоев и простоев.

6. Непрерывное обновление и валидация модели. Со временем прогнозы модели могут становиться менее точными по мере износа эле-

ментов и изменения условий окружающей среды. Модель должна постоянно обновляться и подтверждаться новыми данными, чтобы фиксировать новые закономерности и адаптироваться к изменяющимся условиям.

7. Оценка системы. Наконец, крайне важно регулярно оценивать всю систему в целом. Это означает не только проверку точности модели, но и оценку того, эффективна ли стратегия технического обслуживания для повышения эффективности использования и улучшения качества сети освещения. Это включает в себя мониторинг ключевых показателей производительности, таких как точность прогнозов, эффективность действий по техническому обслуживанию, предпринимаемых на основе прогно-

зов, и общая надежность системы.

Следуя этим техническим шагам и интегрируя стратегию прогнозируемого технического обслуживания в сеть светодиодного освещения, организация может добиться повышения эффективности, сокращения времени простоя и экономии средств, обеспечивая при этом долговечность и оптимальную производительность инфраструктуры освещения. Структурная схема элементов системы, необходимых для выполнения описанных шагов и внедрения описанной модели, представлена на **рис. 2**.

В **табл. 3** представлен список конкретных типов устройств, которые могут понадобиться для реализации данной стратегии прогнозного обслуживания.



Рис. 2. Структурная схема системы прогнозирования обслуживания

Fig. 2. A block diagram of the maintenance prediction system

Таблица 3. Состав основных узлов и технических средств, необходимых для реализации стратегии системы прогнозируемого обслуживания

Table 3. The composition of the main components and technical means required for implementing the strategy of the predictive maintenance system

Компонент/устройство	Функциональное назначение	Пример зарубежных продуктов и российских аналогов
Датчик энергопотребления	Измеряет энергопотребление светодиодных осветительных приборов	Multi-Loop Energy Meter, ADW210 Series
Датчик температуры	Измеряет температуру светодиодных осветительных приборов/окружающей среды	Uni-T UT320D Mini Thermometer / Терморезисторный датчик NTC Incotex
Система сбора данных	Оцифровывает и форматирует данные датчика для дальнейшей обработки	ADLINK PCIe-7300A / Система сбора данных НИИЭТ JSC
Сетевое оборудование	Обеспечивает передачу данных по сети	Huawei Networking Hardware / MikroTik сетевое оборудование
Сервер/облачное хранилище	Хранит собранные данные для дальнейшего анализа	Alibaba Cloud Services / Yandex Cloud Services
ПО для прогнозируемого технического обслуживания	Анализирует собранные данные с использованием моделей прогнозирования	Alibaba Machine Learning Platform / Yandex DataSphere
ПО для управления техническим обслуживанием	Выполняет функции планирования необходимых задач на основе выходных данных ПО для прогнозирования	CMMS eWorkOrders / NOVOSOFT CMMS
Система оповещения	Уведомляет о запланированных задачах и возможных неисправностях	MNS Alibaba Cloud / Yandex Connect

Заключение

Разработанная модель прогнозного технического обслуживания сетей светодиодного освещения может оказать значительное влияние на управление качеством работы сети освещения.

Модель дает представление о прогнозируемых требованиях к техническому обслуживанию отдельных светодиодных осветительных приборов (в конкретном описанном примере в качестве основного показателя была выбрана светоотдача). Полученная информация позволяет оптимизировать планирование технического обслуживания и предпринимать упреждающие действия для устранения потенциальных проблем до того, как они приведут к сбоям. Это помогает сократить время простоя и обеспечить непрерывную и надежную работу сети освещения там, где это наиболее необходимо.

Способность модели прогнозировать светоотдачу и производительность светодиодных осветительных приборов позволяет операторам оптимизировать потребление энергии. Выявляя неэффективные устройства, можно оптимизировать энергопотребление, что приведет к экономии энергии и повышению общей энергоэффективности сети освещения.

Модель помогает определить конкретные светодиодные осветительные приборы, нуждающиеся в техническом обслуживании, позволяя операторам эффективно распределять ресурсы. Это позволяет сосредоточить усилия по техническому обслуживанию критически важных устройств, продлевая срок их службы и обеспечивая оптимальное управление активами.

Модель опирается на анализ данных и распознавание образов для составления прогнозов. Такой подход, основанный на данных, улучшает процессы принятия решений, позволяя операторам расставлять приоритеты в задачах технического обслуживания и распределять ресурсы на основе анализа данных.

Применение представленной модели в контексте прогнозируемого технического обслуживания сетей светодиодного освещения предлагает ряд новых управленческих аспектов.

Модель специально разработана для прогнозируемого технического обслуживания в индустрии светодиодного освещения. Используя данные датчиков, исторические записи технического обслуживания и данные об окружающей среде, модель позволяет прогнозировать требования к техническому использованию конкретных освети-

тельных приборов, такие как время до отказа или порог снижения производительности. Это позволяет оптимизировать операции по техническому обслуживанию и повысить общую надежность данного оборудования в используемой сети.

В модели используются методы выбора характеристик для выбора соответствующих параметров, которые способствуют выполнению задачи прогнозного технического обслуживания. Модель включает в себя обнаружение выбросов с использованием z-оценок, что помогает идентифицировать и обрабатывать точки данных, которые значительно отклоняются от нормы. Это имеет решающее значение для качества и достоверности данных, особенно в эксплуатационных решениях, где выбросы могут оказать существенное влияние на прогнозные модели. Также Модель применяет нормализацию данных и разбивает данные на обучающие, валидационные и тестовые наборы, гарантируя, что модель обучается и оценивается на независимых подмножествах данных. Правильное разделение данных имеет важное значение для надежной оценки модели и предотвращения переобучения.

Модель может применяться для мониторинга в режиме реального времени, непрерывного сбора данных с датчиков и генерации предупреждений о проактивном техническом обслуживании, когда прогнозируемые требования к техническому обслуживанию превышают заданные пороговые значения. Такого рода моделирование в режиме реального времени жизненно важно для эффективных стратегий прогнозного технического обслуживания.

Использование представленной модели и описанной стратегии позволяет производить анализ закономерностей и тенденций в нормализованных значениях энергопотребления, напряжения и температуры в каждом наборе данных. Этот анализ может помочь выявить взаимосвязи между характеристиками, а также потенциальные корреляции с другими факторами, такими как светоотдача или требования к техническому обслуживанию.

Используя предварительно обработанные данные для разработки прогнозирующих моделей, которые позволяют прогнозировать требования к техническому обслуживанию на основе нормализованных значений энергопотребления, напряжения, температуры и других параметров, можно добиться повышения эффективности процесса оптимизации производительности систем освещения и совершенствования стратегий управления качеством в данных сетях.

Представленная модель может быть масштабирована. Целесообразно расширить матрицу X и добавить в нее более сложные зависимости, а также дополнительные параметры, например срок эксплуатации, влажность и температуру окружающей среды, циклы включения и выключения, гармонический состав токов и напряжений, коэффициент мощности. После чего модель может быть использована для реализации описанной стратегии прогнозного технического обслуживания для управления качеством сетей светодиодного освещения.

В целом модель прогнозируемого технического обслуживания улучшает управление качеством сети светодиодного освещения, предлагая своевременную и точную информацию о потребностях в техническом обслуживании, оптимизируя энергоэффективность, сокращая время простоя и позволяя осуществлять упреждающее планирование технического обслуживания. Конкретные технические решения, основанные на прогнозах модели, могут привести к лучшему распределению ресурсов, экономии затрат и общему улучшению работы и надежности сети светодиодного освещения.

Список источников

1. Segovia-Muñoz D. & Serrano Guerrero, Xavier & Barragán-Escandón, Antonio. Predictive maintenance in LED street lighting controlled with telemanagement system to improve current fault detection procedures using software tools. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2022, vol. 20, pp. 379-386. doi:10.24084/repqj20.318.
2. Karami, Mahdi and Madlener, Reinhard, Smart Predictive Maintenance Strategy Based on Cyber-Physical Systems for Centrifugal Pumps: A Bearing Vibration Analysis (September 1, 2019). FCN Working Paper No. 14/2019, SSRN doi.org/10.2139/ssrn.3544199
3. Прыткова Е.А., Давыдов В.М. Анализ применения иерархических нейросетевых методов в контроле качества // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 74-81. doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-74-81
4. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками / Егоров Д.Э., Довгун В.П., Боярская Н.П., Ян А.В., Слюсарев А.С. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. №6. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.
5. De Luca R., Ferraro A., Galli A., Gallo M., Moscato V. and Sperli G. A deep attention-based approach for predictive maintenance applications in IoT scenarios // *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2023, vol. 34, no. 4, pp. 535-556. doi.org/10.1108/JMTM-02-2022-0093
6. Минимизация потерь мощности в пассивных силовых фильтрах / Боярская Н.П., Довгун В.П., Егоров Д.Э., Новиков В.В., Шандрыгин Д.А. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. №6. С. 42-52. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-42-52.
7. Mirza Rayana Sanzana, Tomas Maul, and others, Application of deep learning in facility management and maintenance for heating, ventilation, and air conditioning, *Automation in Construction*, 2022, vol. 141, pp. 104445, ISSN 0926-5805, doi.org/10.1016/j.autcon. 2022.104445.
8. Gong Chen & Xu, Haiping & Yuan, Zengquan & Liang, Jinhua. The Accelerated Life Test Investigation and Lifetime Prediction Method for LED Driver, 2022, pp. 355-359. doi:10.1109/ICPEA56363.2022.10052233.
9. Kuzmenko V. and others. Definition and approximation of the light flux degradation of a LED lamp // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 734, pp. 012197. doi:10.1088/1757-899X/734/1/012197.
10. Калечиц В.Н. Особенности моделирования режимов работы линий наружного освещения. *Энергетика* // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022. Т. 65. №6. С. 499-510. doi:10.21122/1029-7448-2022-65-6-499-510.
11. Кузьменко В.П., Солёный С.В. Исследование влияния светодиодных прожекторов на процессы управления качеством электрической энергии и энергоэффективностью // Омский научный вестник. 2021. Т. 2. №176. С. 15-19.

References

1. Segovia-Muñoz D., Xavier Serrano Guerrero, Antonio Barragán-Escandón. Predictive maintenance in LED street lighting controlled with telemanagement system to improve current fault detection procedures using software tools. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2022;20:379-386. DOI: 10.24084/repqj20.318
2. Mahdi Karami, Reinhard Madlener. Smart predictive maintenance strategy based on cyber-physical systems for centrifugal pumps: A bearing vibration analysis. FCN Working Paper No. 14/2019. DOI: 10.2139/ssrn.3544199
3. Prytkova E.A., Davydov V.M. Analysis of the use of hierarchical neural network methods in quality control. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(1):74-81. (In Russ.) doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-74-81
4. Egorov D.E., Dovgun V.P., Boyarskaya N.P., Yan A.V., Slyusarev A.S. Power factor correction in power delivery systems with multiphase nonlinear loads. *Izvesti-*

- ya vysshikh uchebnykh zavedeniy. *Problemy energetiki* [Power Engineering: Research, Equipment, Technology]. 2020;22(6):3-15. (In Russ.) DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15
5. De Luca R., Ferraro A., Galli A., Gallo M., Moscato V., Sperli G. A deep attention-based approach for predictive maintenance applications in IoT scenarios. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2023;34(4):535-556. doi.org/10.1108/JMTM-02-2022-0093
 6. Boyarskaya N.P., Dovgun V.P., Egorov D.E., Novikov V.V., Shandrygin D.A. Minimization of power losses in passive power filters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Power Engineering: Research, Equipment, Technology]. 2021;23(6):42-52. (In Russ.) DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-42-52
 7. Mirza Rayana Sanzana, Tomas Maul et al. Application of deep learning in facility management and maintenance for heating, ventilation, and air conditioning. *Automation in Construction*. 2022;141:104445. ISSN 0926-5805. doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104445
 8. Chen Gong, Haiping Xu, Zengquan Yuan, Jinhua Liang. The accelerated life test investigation and lifetime prediction method for LED driver. 2022;355-359. DOI: 10.1109/ICPEA56363.2022.10052233
 9. Kuzmenko V. et al. Definition and approximation of the light flux degradation of a LED lamp. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;734:012197. DOI: 10.1088/1757-899X/734/1/012197
 10. Kalechits V.N. Features of modeling the operating modes of outdoor lighting lines. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedineniy SNG* [Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations]. 2022;65(6):499-510. (In Russ.) DOI: 10.21122/1029-7448-2022-65-6-499-510
 11. Kuzmenko V.P., Solenyi S.V. Study on the influence of LED spotlights on the processes of managing the quality of electrical energy and energy efficiency. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2021;2(176):15-19. (In Russ.)

Поступила 26.05.2023; принята к публикации 07.08.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 26/05/2023; revised 07/08/2023; published 25/09/23

Кузьменко Владимир Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.

Email: mr.konnny@gmail.com. ORCID 0000-0002-0270-4875

Солёный Сергей Валентинович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия.

Email: ssv555ssv@yandex.ru ORCID 0000-0002-7919-3890

Vladimir P. Kuzmenko – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Electromechanics and Robotics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.

Email: mr.konnny@gmail.com. ORCID 0000-0002-0270-4875

Sergey V. Solenyi – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Electromechanics and Robotics, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia.

Email: ssv555ssv@yandex.ru. ORCID 0000-0002-7919-3890

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.512
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-170-179



ОБЗОР ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА И ПОДВИЖНОСТИ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ, ОСНОВАННЫХ НА МЕТОДАХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА

Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Ерофеева Л.Н., Бушуева М.Е.

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

Аннотация. В статье проводится анализ существующих методов, позволяющих получить числовой показатель качества технического изделия в условиях современной промышленности на этапе проектирования изделия. Задача является актуальной, поскольку количественная оценка качества дает исчерпывающую информацию об объекте с точки зрения его пригодности и целесообразности использования для решения каких-либо технологических задач и управления производством, дает возможность разработать технически сложное изделие с заранее заданными характеристиками и уровнем качества. При решении задач, посвященных оцениванию качества автотракторной техники, предлагается обоснованное применение понятия подвижности как интегрального эксплуатационного свойства транспортно-технологических машин. Среди разнообразия подходов к получению оценок качества наибольшую популярность и подтвержденную достоверность имеют интегральные показатели, вычисленные на основании методов многокритериальной оптимизации, предполагающих декомпозицию интегрального свойства на простейшие составляющие, а затем агрегирования эмпирических показателей с учетом их веса посредством аддитивной свертки. Отдельно проанализированы различные методы нахождения коэффициентов весовости, указана целесообразность их использования. Исследование показало, что существующие подходы посвящены оцениванию качества или подвижности отдельных технических изделий и классов автотракторной, но объективной, универсальной, практичной методики, с помощью которой можно будет вычислить показатель качества любой ТТМ, на сегодняшний день не существует. В статье приводятся предпосылки, способствующие разработке универсального алгоритма вычисления интегрального показателя подвижности, который может лечь в основу системы управления качеством продукции на стадии проектирования автотракторной техники.

Ключевые слова: качество, подвижность, ТТМ, автотракторная техника, интегральный показатель качества, интегральный показатель подвижности, весовые коэффициенты, многокритериальная оценка качества

© Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Ерофеева Л.Н., Бушуева М.Е., 2023

Для цитирования

Обзор подходов к оценке качества и подвижности автотракторной техники, основанных на методах многокритериальной оценки качества / Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Ерофеева Л.Н., Бушуева М.Е. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 170-179. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-170-179>



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

OVERVIEW OF APPROACHES TO ASSESSING THE QUALITY AND MOBILITY OF AUTOMOTIVE VEHICLES AND TRACTORS BASED ON MULTI-CRITERIA QUALITY ASSESSMENT METHODS

Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., Bushueva M.E.

Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper analyzes the existing methods for getting a numerical indicator of the quality of a technical product in the modern industry at the product design stage. The objective is currently relevant as the quantitative assessment of the quality provides comprehensive information about the object in terms of its suitability and feasibility of use for solving any technological problems and production management, and makes it possible to develop a technically complex product with the predetermined characteristics and quality. When solving problems dedicated to assessing the quality of automotive vehicles and tractors, we propose a reasonable application of the concept of mobility as an integral operational property of transport and technological machines. A variety of approaches to getting quality assessments include integral indicators, showing the greatest popularity and confirmed reliability, calculated by multi-criteria optimization methods assuming the decomposition of the integral property into the simplest components and then the aggregation of empirical indicators factoring into their weight by the additive convolution. The authors analyzed various methods of finding weighting coefficients, and indicated feasibility of their use. The study has showed that the existing approaches are devoted to assessing the quality or mobility of individual technical products and classes of automotive vehicles and tractors. Though there are no currently available impartial, universal and practical methods used to calculate the quality indicator of any transport and technological machine (TTM). The paper provides the prerequisites, contributing to the development of a universal algorithm for calculating the integral mobility index, which can form the basis of a product quality management system at the stage of designing automotive vehicles and tractors.

Keywords: quality, mobility, TTM, automotive vehicles and tractors, integral quality index, integral mobility index, weighting coefficients, multi-criteria quality assessment

For citation

Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N., Bushueva M.E. Overview of Approaches to Assessing the Quality and Mobility of Automotive Vehicles and Tractors Based on Multi-Criteria Quality Assessment Methods. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 170-179. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-170-179>

Введение

Оценка качества и конкурентоспособности технических объектов, в том числе автотракторной техники, является важнейшим инструментом повышения эффективности их применения. В 19 веке знаменитый британский физик, механик и инженер Уильям Томсон, лорд Кельвин (William Thomson, 1st Baron Kelvin), сказал: «Если вы можете оценить то, о чем говорите, и выразить это количественно, тогда вы что-то об этом знаете, но если вы не можете это оценить и выразить количественно, тогда ваши познания скудны и неудовлетворительны» [1]. Уже на стадиях исследований и разработки изделия стоит вести речь о его качестве. Для транспортно-технологических машин (ТТМ) оно напрямую связано с технико-эксплуатационными характеристиками, которые описываются понятием «подвижность». На этом этапе возникает необходимость управления качеством проектируемых машин. Оно может включать в себя

как мероприятия, направленные на соблюдение необходимых нормативных требований, так и на повышение отдельных количественных или качественных показателей [2]. Количественная оценка качества позволяет получить исчерпывающую информацию об объекте с точки зрения его пригодности и целесообразности использования для решения каких-либо технологических задач и управления производством. Оценка качества изделия на этапе проектирования позволяет снизить затраты на производство заведомо неконкурентоспособной продукции и дает возможность разработать технически сложное изделие с заранее заданными характеристиками и показателем качества.

Понятия «качество» и «подвижность»

С понятием «качество» продукции тесно связано понятие «конкурентоспособность», нередко эти два понятия вообще отождествляют. Однако следует помнить, что сравнивать по категории «качество» можно лишь однородные товары, а

конкурентоспособность товара включает в себя дополнительно потребительские, организационные и ценовые показатели. Применительно же к исследованиям в области конструирования и эксплуатации транспортно-технологических машин целесообразно трансформировать понятие «качество» в понятие «подвижность», наследуя при этом практически весь наработанный в области оценки качества вычислительный аппарат.

Автотракторостроение – крупная отрасль машиностроения, а эксплуатация подвижного состава транспортно-технологических машин охватывает все области производственной деятельности человека. Автотракторная техника – сложное техническое изделие, характеризующееся различными техническими, эксплуатационными, функциональными, эстетическими, эргономическими, экологическими и экономическими показателями. Для получения достоверной оценки качества необходимо исследовать и учитывать все эти критерии.

В 2000 году профессором Беляковым В.В. был определен термин «подвижность» как интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин, определяющее её способность выполнять поставленную задачу

с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины, то есть возможность машины противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи [3]. В соавторстве с другими исследователями в его работах был осуществлен комплексный и системный подход к раскрытию структуры подвижности. Подвижность ТТМ, включающая в себя технико-технологические и эксплуатационно-потребительские свойства транспортных средств, является неотъемлемой составляющей конкурентоспособности машин. С этой точки зрения конкурентоспособность, которая охватывает еще и экономические, эстетические и экологические характеристики, является более общей оценкой уровня качества. В основе методики получения оценки подвижности автотракторной техники профессором Беляковым В.В. предлагается метод многокритериальной оценки качества, где в качестве эмпирических критериев рассматриваются технические характеристики автомобилей, влияющие на мощность, динамичность, маневренность, проходимость (табл. 1), которые сворачиваются к единому рациональному показателю [4].

Таблица 1. Система критериев подвижности

Table 1. Mobility criteria system

Критерий	Формализация
Запас тягового усилия Q_1	$\Delta P_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}$
Баланс мощности Q_2	$W_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda}$
Поддержание курсовой ориентации Q_3	$\Phi_R(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda}$
Подвижность по живучести Q_4	$R_{\text{он}}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda, t) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}$
Интегральный показатель качества	$F(w, Q_i) = \sum_{i=1}^4 w_i \cdot Q_i$
Φ_f – обобщенная функция сопротивления движению машины Φ_{φ} – обобщенная функция сцепления движителя машины с материалом опорного основания Φ_R – обобщенная функция радиуса кривизны траектории движения $R_{\text{он}}$ – вероятность безотказной работы λ – различные параметры машины t – время эксплуатации w_i – весовые коэффициенты	

Существующие методики оценки качества технических объектов

Первые попытки оценить подвижность были предприняты еще в семидесятых годах прошлого века, когда были разработаны отраслевые инструкции, касающиеся вычисления интегрального показателя качества легковых автомобилей [5]. В них выделена номенклатура показателей, по которым ведется оценивание. Система показателей оцениваемого объекта $\{X_i^o\}$ соотносится с системой показателей образца $\{X_i^m\}$, возникает система относительных показателей качества $\{Y_i^o\}$, где $Y_i^o = \frac{X_i^o}{X_i^m}$. Затем вычисляются комплексные показатели по группам как среднее арифметическое значение в группе. Далее групповые показатели агрегируются в интегральный с учетом их веса:

$$\begin{aligned} \Pi = & K_D \Pi_D + K_K \Pi_K + K_B \Pi_B + \\ & + K_{\Xi} \Pi_{\Xi} + K_H \Pi_H, \end{aligned} \quad (1)$$

где $K_D, K_K, K_B, K_{\Xi}, K_H$ – коэффициенты весомости соответствующих комплексных показателей: динамики, комфортабельности, безопасности, эксплуатационных затрат, надежности.

С помощью данной методики можно получить количественные показатели качества автотранспорта, позволяющие сравнивать рассматриваемые образцы. К недостаткам метода можно отнести неполный охват рассматриваемых технических характеристик автомобилей, например отсутствие оценивания по экологическим критериям, а также достоверность значений весовых коэффициентов.

Несколько иной подход к оцениванию качества продукции рассмотрен в исследовании Григорьева М.А. и Долецкого В.А. [6]. Авторами предложена методика вычисления интегрального показателя технико-экономической оценки качества двигателя за полный срок его службы. Показатель качества вычисляется как отношение полезного эффекта от потребления к суммарным затратам на создание и эксплуатацию рассматриваемого образца. Рассчитанный таким образом показатель позволяет выявить основные пути повышения качества двигателя с точки зрения его технико-экономической эффективности. Ис-

следователями предложены следующие мероприятия: увеличение мощности и коэффициента ее использования, увеличение первичного и межремонтных ресурсов, увеличение приспособляемости двигателя к автомобилю, снижение веса двигателя, уменьшение расходов на его изготовление, снижение расхода топлива и масла, обеспечение его эксплуатационной надежности, снижение вибраций, шума и токсичности. К сожалению, метод непригоден к получению показателя технического качества на этапе разработки нового изделия, а также не учитывает условия его эксплуатации.

Первые оценки интегрального показателя качества автомобилей многоцелевого назначения (АМН) были получены по формуле

$$Q = \frac{K_v \cdot K_o \cdot K_{\text{экв}} \cdot K_{\text{сп}}}{S}, \quad (2)$$

где K_v – коэффициент совершенства по средней скорости; K_o – комплексный показатель надежности; $K_{\text{экв}}$ – эквивалентный показатель оценки условий труда водителя; $K_{\text{сп}}$ – коэффициент учета специфических свойств машины; S – суммарные затраты на достижение результата использования автомобиля [7].

В рассмотренном выше методе учитывается ограниченный набор критериев, к тому же представляет определенную сложность вычисление некоторых коэффициентов.

Для сравнительного анализа технических средств, а именно для решения многокритериальной задачи оптимизации автоматизированных средств управления испытаниями космических аппаратов по их собственным техническим характеристикам, в исследовании [8] предложена методика, основанная на построении обобщенной функции желательности Харрингтона.

Выстраивается система частных критериев. Частным показателям качества рассматриваемого продукта присваиваются числовые значения по формуле $f_i = e^{-X_i}$, предварительно исходные показатели приводятся к шкале $[-2; 5]$, поскольку она является промежутком эффективных значений на шкале частных показателей. Затем частные значения по формуле среднего геометрического агрегируются в обобщенный коэффициент желательности: $F = \sqrt[n]{f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_n}$, здесь n – количество эмпирических показателей. Анализ качества исследуемого образца про-

водится по шкале Харрингтона. Он дает возможность оценить текущее состояние качества продукции, а также указать пути улучшения ее технического состояния.

Методом Харрингтона не могут быть сравнены изделия, не имеющие какой-либо характеристики, которая присутствует в товарах-конкурентах. Кроме того, здесь не учитывается вклад каждого параметра в обобщенный показатель ввиду отсутствия весовых коэффициентов. Таким образом, методика не обладает универсальностью и достаточной точностью, поэтому применима лишь к однородной продукции, обладающей одинаковым набором характеристик.

Большое количество работ профессора Фасхиева Х.А. посвящены исследованиям в области качества и конкурентоспособности продукции [9-13]. Качественные и количественные подходы оценки качества товара легли в основу агрегатно-декомпозиционной методики, благодаря которой может быть вычислен интегральный показатель, позволяющий сравнивать объекты и выстраивать их в ранжированный ряд. Методика применялась исследователем для оценки качества и конкурентоспособности различного рода продукции автомобилестроения, а также решения задач принятия решения по нескольким критериям выбора.

Первоначально рассматривалось шесть групп показателей: функциональные, эксплуатационно-технологические, эксплуатационно-экономические, эргономические, экологические, стоимостные. Каждой группе экспертным путем назначались весовые коэффициенты. Внутри групп параметры объединялись также со своими коэффициентами веса, то есть каждый простейший показатель подвергался двойному взвешиванию. Далеко не полный перечень свойств, описываемых в работе, в достаточной мере даёт адекватную характеристику лишь узкому классу автотракторной техники – легковым автомобилям.

Предложенный профессором Фасхиевым Х.А. алгоритм, в основе которого лежит метод многокритериальной оптимизации и который может быть адаптирован к любому классу автотракторной техники, базируется на следующих принципах.

Во-первых, строится иерархическая структура оценочных показателей нескольких уровней. Например, для грузового автомобиля число технико-эксплуатационных показателей самого последнего уровня составляет 224. Перечень показателей допускает расширение в связи с различ-

ными целями оценок качества. С другой стороны, для снижения трудоемкости задачи рекомендуется рассматривать наиболее значимые характеристики оцениваемого объекта.

Оценку качества предлагается вести в два этапа [11]. Сначала графическим методом «профилей» определяются коэффициенты качества объекта, который характеризуется небольшим числом показателей. Профиль представляет собой оценочное поле, разделенное на $(n-1)$ частей, где n – число выбранных показателей. Площадь этого поля отражает численно качество рассматриваемого объекта. Профиль позволяет измеряемые в разных единицах показатели качества объекта наглядно представить на оценочном поле. Также коэффициент качества может быть получен аналитически без построения оценочного поля, используя формулу

$$K = \frac{0,5 \cdot Y_1 + Y_2 + \dots + 0,5 \cdot Y_n}{n-1}, \quad (3)$$

где $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ – расчетные величины. При этом если с ростом показателя качество объекта улучшается, то расчетная величина вычисляется по формуле

$$Y_i = \frac{\Pi_i - \Pi_{i\min}}{\Pi_{i\max} - \Pi_{i\min}}, \quad (4)$$

если же увеличение показателя влечет за собой снижение качества объекта, расчетная величина вычисляется по формуле

$$Y_i = \frac{\Pi_{i\max} - \Pi_i}{\Pi_{i\max} - \Pi_{i\min}}. \quad (5)$$

Здесь $\Pi_{i\max}$, $\Pi_{i\min}$ и Π_i – максимальные, минимальные и текущие значения i -го показателя изделия, которое подвергается оценке. Если описывается довольно сложный объект, то множество предварительно преобразованных по формулам показателей предлагается разбить на группы и внутри каждой группы объединить методом «профилей».

На втором этапе групповые показатели агрегируются в интегральный с учетом коэффициентов весомости на основании аддитивной свертки критериев:

$$K_{\text{инт}} = \sum_{i=1}^m w_i \cdot K_i. \quad (6)$$

Методы нахождения весовых коэффициентов критериев

Вопрос о получении коэффициентов весомости давно стоял перед исследователями в области решения многокритериальных задач. Экспертный метод назначения весовых коэффициентов «грешит» субъективностью. Для нивелирования такой погрешности в работе [14] использовали методы математической статистики. Достоверность мнений экспертов предлагалось проверить с помощью коэффициента конкордации.

Особое внимание профессором Фасхиевым уделено исследованию различных методов нахождения весовых коэффициентов [11]. Наиболее эффективным был назван метод анализа иерархий, разработанный американским математиком Т. Саати (Thomas L. Saaty) в 1972 году. В настоящее время он представляет собой неотъемлемую часть теории принятия решений при рассмотрении многокритериальных задач для получения весовых коэффициентов критериев. В основе метода лежит декомпозиция конечного критерия на простые составляющие, которые потом подвергаются попарному сравнению согласно разработанной шкале предпочтений [15]. Процесс сравнения выполняется лицом, принимающим решение, или экспертом. Метод учитывает неопределенность задачи, неоднократно успешно применялся в исследованиях, посвященных решению многокритериальных задач с доказанной достоверностью.

Особое внимание в области исследования подходов к расчёту весовых коэффициентов уделено в работах Постникова В.М. и Спиридонова С.Б. [16-18]. Ими рассмотрены и систематизированы различные методики вычисления коэффициентов весомости эмпирических критериев, входящих в состав интегрального показателя. Рассмотрены возможности получения весовых коэффициентов с учетом фиксированной, плавающей и настраиваемой оценки предпочтения критериев друг над другом, для чего разработаны шкалы с разными уровнями градаций. Показано, что в первом случае коэффициенты являются членами арифметической прогрессии, во втором – членами геометрической прогрессии. Практическая ценность разработок заключается в том, что получены простые аналитические выражения для вычисления весовых коэффициентов. Таким образом, наработан определенный потенциал, позволяющий в зависимости

от поставленной задачи всегда подобрать соответствующий адекватный метод вычисления коэффициентов веса.

Обзор методов оценки подвижности автомобилей многоцелевого назначения и военной техники

Двухступенчатая методика оценки качества автотранспорта многоцелевого назначения была разработана Плиевым И.А. и Вержбицким А.Н. [19]. В 1999 году ими была представлена методика, основанная на декомпозиции интегрального критерия на простейшие свойства и показатели в виде иерархического графа, в вершине которого стоит показатель технического уровня автомобилей многоцелевого назначения. В вершинах следующего уровня иерархической структуры лежат групповые показатели, характеризующие подвижность, проходимость, производительность, живучесть. Каждой группе присвоен коэффициент весомости.

Интегральный показатель качества рассчитывался по формуле

$$V = \prod_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^k \left(\frac{P_i}{P_{i0}} \right)^{m_{ij}} \right]^{m_j}, \quad (7)$$

где P_i – значение i -го показателя оцениваемой модели; P_{i0} – значение i -го показателя базовой модели; m_{ij} – весовой коэффициент i -го показателя j -й группы; m_j – весовой коэффициент j -й группы.

Трудности в выборе базового образца, а также субъективность нахождения весовых коэффициентов групповых показателей можно отнести к недостаткам этого метода. Кроме того, набор характеристик не описывает достоверно все свойства модели. Методика получила дальнейшее продолжение.

В исследовании 2010 года Плиевым И.А. [20, 21] был расширен спектр рассматриваемых показателей, число групп доведено до шести. Выделены наиболее значимые характеристики для автомобилей многоцелевого назначения: базовые свойства, безопасность, подвижность, надежность, технологичность, специальные свойства. Были получены интегральные показатели качества для трёх семейств автомобилей многоцелевого назначения: «Мустанг», «Мотовоз» и «Гараж». Также было отмечено, что методика стано-

вится применимой для оценки автомобилей «двойного назначения», если из номенклатуры показателей исключить характеристики группы «Специальные свойства».

Весовые коэффициенты локальных критериев получены методом Саати, для чего построена четырехуровневая система критериев, где наверху находится интегральный показатель. Промежуточные звенья иерархической структуры занимают составные критерии (групповые показатели), самый нижний уровень состоит из простейших критериев, по которым ведется сравнение альтернативных вариантов.

Разработанный метод оценки технического уровня полноприводных автомобилей, имеющих отношение к автомобилям многоцелевого назначения и автомобилям «двойного назначения», имеет практическую значимость, так как позволяет сравнивать модели по качеству, а также выделить основные группы показателей, на которые следует обратить внимание при конструировании модели.

Применительно к оценке качества военной автомобильной техники (ВАТ) разработана иерархическая номенклатура оценочных показателей [22]. Все свойства сравниваемых объектов были разделены на две группы: эксплуатационно-экономические свойства и боевые свойства. Группа эксплуатационно-экономических свойств включает в себя весь спектр свойств, присущий машине в течение всего жизненного цикла. Группа боевых свойств содержит свойства, необходимые для оценки объекта ВАТ, используемого в боевых условиях. Разработанная номенклатура свойств предназначена для сравнения военной техники типа MRAP. Особую ценность исследование имеет в связи с возможностью получения необходимых значений критериев уже на стадии проектирования. На основании представленной номенклатуры свойств можно вычислить интегральный показатель подвижности образцов ВАТ, однако подобная методика в исследовании не описана.

Метод декомпозиции, а затем агрегирования показателей с учетом их веса был применен для описания свойств и структуры системы характеристик при оценке технического уровня двигателей образцов бронетанкового вооружения и техники [23]. Предложенный метод отражает специфику работы двигателя в процессе реальной эксплуатации и позволяет проводить исследования по выбору рациональных вариантов конструктив-

ных параметров двигателей для модернизируемых и перспективных образцов военной техники.

На основании вышеупомянутых подходов к многокритериальной оценке качества [9-13, 19-21] авторами настоящего исследования была предложена методика оценки подвижности ряда легковых автомобилей и вездеходной техники [24, 25]. Методики отличались друг от друга набором эмпирических критериев, для каждого класса строилась своя иерархическая структура интегрального показателя подвижности. В работах также проведен сравнительный анализ результатов применения различных методов нахождения весовых коэффициентов [26] и приведена методика преобразования качественных характеристик в количественные показатели, что позволяет значительно расширить систему эмпирических критериев [27].

Выводы и направления дальнейших исследований

Вопрос оценки качества продукции, в том числе образцов автотракторной техники, с давних пор интересовал исследователей, поскольку был продиктован необходимостью решить ряд технических и экономических задач. Еще в начале прошлого века академик Крылов А.Н. попытался оценить и выбрать лучший проект по совокупности свойств военных кораблей [28]. В настоящее время к оценке качества автотракторной техники разработано множество подходов, которые имеют свои преимущества и недостатки, главным из которых является узкая специализация методик, ориентированных на определенный класс машин. Кроме того, при оценивании и сравнении образцов автотракторной техники на этапе проектирования целесообразно использовать интегральный показатель подвижности [4, 29].

Профессором Беляковым В.В. разработана концептуальная парадигма, обуславливающая понятие подвижности мобильных наземных транспортных средств. Подвижность в совокупности с экономическими, эргономическими, экологическими показателями и показателями безопасности характеризует конкурентоспособность, качество объектов как товара. Подходы к исследованию качества являются наиболее обобщенным и могут применяться к любым образцам ТТМ, поскольку иерархическая структура показателей содержит в себе наиболее полную номенклатуру. Среди прочих методов получения оценки подвижности автотракторной техники предлагается метод много-

критериальной оценки качества, позволяющий охватывать достаточное количество критериев. Проанализированы и рекомендованы к применению различные методы нахождения весовых коэффициентов. Таким образом, существуют все предпосылки для разработки объективной, универсальной, практичной методики, с помощью которой можно будет вычислить показатель качества любой ТТМ, вопрос о необходимости построения которой остается актуальным. Полученный алгоритм может служить основой системы управления качеством продукции на стадии проектирования автотракторной техники.

Список источников

1. Миронов Б.Н., Степанов З.В. Историк и математика. Л.: Наука, 1975. 184 с.
2. Михеева Е.Н., Сероштан М.В. Управление качеством: учебник. 2-е изд., испр. и доп. М.: Дашков и Ко, 2017. 532 с.
3. Беляков В.В. Оценка подвижности транспортно-технологических систем // «АВТО-НН-2000»: материалы международной научно-технической конференции, 27-29 июня 2000 г. Н. Новгород: НГТУ, 2000. С. 339-357.
4. Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. №3(100). С. 145-174.
5. Инструкция. И37.001.017-75. Интегральная оценка конкурентоспособности легковых автомобилей с учетом технического уровня. М.: Минавтопром, 1975.
6. Григорьев М.А., Долецкий В.А. К вопросу технико-экономической эффективности двигателей и управления их качеством // Автомобильная промышленность. 1976. №3. С. 1-3.
7. Володин А.Н. Техничко-экономическая оценка эффективности машин многоцелевого назначения // Грузовик. 1999. №7. С. 25-27.
8. Пичкалев А.В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // Исследования наукограда. 2012. №1(1). С. 25-28.
9. Фасхиев Х.А. Обеспечение конкурентоспособности изделия на этапе разработки // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16. №5(50). С. 173-184.
10. Фасхиев Х.А., Крахмалева А.В. Методика оценки качества автомобилей // Экономическое возрождение России. 2006. №2(8). С. 57-62.
11. Фасхиев Х.А. Интеллектуальная поддержка ранжирования объектов по конкурентоспособности // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. Т. 18. №3(64). С. 210-224.
12. Фасхиев Х.А., Костин И.М. Техничко-экономическая оценка грузовых автомобилей при разработке. Набережные Челны: Изд-во КамПИ, 2002. 480 с.
13. Фасхиев Х.А., Крахмалева А.В. Методика оценки качества автомобилей // Маркетинг в России и за рубежом. 2005. №4. С. 86-100.
14. Сероштан М.В., Михеева Е.Н. Качество непродовольственных товаров. М.: Дашков и Ко, 2010.
15. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.
16. Постников В.М., Спиридонов С.Б. Выбор весовых коэффициентов локальных критериев на основе принципа арифметической прогрессии // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. №9. С. 237-249.
17. Постников В.М., Спиридонов С.Б. Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. №6. С. 267-287.
18. Постников В.М., Спиридонов С.Б. Расчёт весовых коэффициентов критериев на основе принципа геометрической прогрессии // Аспирант и соискатель. 2022. №5(132). С. 21-26.
19. Плиев И.А., Вержбицкий А.Н. Методика оценки качества технического уровня АТС многоцелевого назначения // Автомобильная промышленность. 1999. №11. С. 34-36.
20. Плиев И.А. Оценка технического уровня семейств автомобилей многоцелевого назначения на основе метода анализа иерархий // Журнал автомобильных инженеров. 2010. №3(62). С. 46-49.
21. Плиев И.А. Оценка технического уровня семейств автомобилей многоцелевого назначения на основе метода анализа иерархий // Журнал автомобильных инженеров. 2010. №5(64). С. 50-54.
22. Морозов А.В. Комплексное сравнение объектов военной автомобильной техники типа MRAP на стадии проектирования // Журнал автомобильных инженеров. 2015. №1(90). С. 40-45.
23. Метод оценки технического уровня двигателей образцов бронетанкового вооружения и техники / А.В. Олейников, А.И. Макоклюев, Л.Г. Дулатина и др. // Наука и военная безопасность. 2022. №1(28). С. 17-21.
24. Разработка методики вычисления показателя подвижности по мобильности легковых автомобилей, основанной на применении многокритериальной оптимизации / Л.Н. Мазунова, М.А. Дубкова, В.В. Беляков и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №2(133). С. 102-112.
25. Методика вычисления интегрального показателя подвижности колесных вездеходов на основе метода многокритериальной оптимизации / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, Л.Н. Ерофеева и др. // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №3. С. 211-222.
26. Сравнительный анализ методов многокритериальной оценки конкурентоспособности и подвижности автотракторной техники с учетом весовой значимости характеристик / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков,

- В.С. Макаров и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. №1(136). С. 125-136.
27. Преобразование качественных характеристик транспортных средств в количественные показатели с применением метода анализа иерархий / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, В.С. Макаров и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. №1(140). С. 97-106.
28. Прохоров Ю.К. Управление качеством: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 144 с.
29. Беляков В.В., Бушуева М.Е., Сагунов В.И. Многокритериальная оптимизация в задачах подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем: учеб. пособие. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2001. 271 с.
- ### References
1. Mironov B.N., Stepanov Z.V. *Istoriya i matematika* [Historians and mathematics]. Leningrad: Nauka, 1975, 184 p. (In Russ.)
 2. Mikheeva E.N., Seroshtan M.V. *Upravlenie kachestvom: Uchebnik* [Quality management: textbook]. Moscow: Dashkov and Co., 2017, 532 p. (In Russ.)
 3. Belyakov V.V. Assessing mobility of transport and technological systems. «AVTO-NN-2000»: *materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [AUTO-NN-2000: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University, 2000, pp. 339-357. (In Russ.)
 4. Belyakov V.V., Belyaev A.M., Bushueva M.E. et al. The concept of mobility of ground transport and technological machines. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University]. 2013;(3(100)):145-174. (In Russ.)
 5. Instruction 137.001.017-75. *Integralnaya otsenka konkurentosposobnosti legkovykh avtomobilei s uchetom tekhnicheskogo urovnya* [An integral assessment of competitiveness of light vehicles, factoring into an engineering level]. Moscow: Minavtoprom, 1975. (In Russ.)
 6. Grigorev M.A., Doletsky V.A. On the issue of the feasibility study on motors and their quality management. *Avtomobilnaya promyshlennost* [Automotive Industry]. 1976;(3):1-3. (In Russ.)
 7. Volodin A.N. A technical and economic assessment of efficiency of multi-purpose vehicles. *Gruzovik* [Trucks]. 1999;(7):25-27. (In Russ.)
 8. Pichkalev A.V. Generalized Harrington's desirability function for the comparative analysis of technical facilities. *Issledovaniya naukoigrada* [Studies of the Science City]. 2012;(1(1)):25-28. (In Russ.)
 9. Faskhiev Kh.A. Ensuring competitiveness of products at the engineering stage. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Ufa State Aviation Technical University]. 2012;16(5(50)):173-184. (In Russ.)
 10. Faskhiev Kh.A., Krahmaleva A.V. A car quality assessment procedure. *Ekonomicheskoe vozrozhdenie Rossii* [Economic Revival of Russia]. 2006;(2(8)):57-62. (In Russ.)
 11. Faskhiev Kh.A. Intelligent support of the object ranking by competitiveness. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Ufa State Aviation Technical University]. 2014;18(3(64)):210-224. (In Russ.)
 12. Faskhiev Kh.A., Kostin I.M. *Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka gruzovykh avtomobilei pri razrabotke* [A feasibility study on trucks at the engineering stage]. Naberezhnye Chelny: Kama Polytechnic Institute, 2002, 480 p. (In Russ.)
 13. Faskhiev Kh.A., Krahmaleva A.V. A car quality assessment procedure. *Marketing v Rossii i za rubezhom* [Marketing in Russia and abroad]. 2005;(4):86-100. (In Russ.)
 14. Seroshtan M.V., Mikheeva E.N. *Kachestvo neprodovolstvennykh tovarov* [Quality of non-food goods]. Moscow: Dashkov and Co., 2010. (In Russ.)
 15. Saaty T.L., Kearns K. *Analiticheskoe planirovanie* [Analytical planning]. Moscow: Radio i Svyaz, 1991, 224 p. (In Russ.)
 16. Postnikov V.M., Spiridonov V.M. Choosing weighting coefficients of local criteria by an arithmetic progression principle. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education: Scientific Journal of Bauman Moscow State Technical University]. 2015;(9):237-249. (In Russ.)
 17. Postnikov V.M., Spiridonov S.B. Methods of choosing weighting coefficients of local criteria. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education: Scientific Journal of Bauman Moscow State Technical University]. 2015;(6):267-287. (In Russ.)
 18. Postnikov V.M., Spiridonov S.B. Calculating weighting coefficients of criteria by a geometric progression principle. *Aspirant i soiskatel* [Postgraduate Students and External Postgraduate Students]. 2022;(5(132)):21-26. (In Russ.)
 19. Pliev I.A., Verzhbitsky A.N. The procedure for assessing the quality of an engineering level of multi-purpose vehicles. *Avtomobilnaya promyshlennost* [Automotive Industry]. 1999;(11):34-36. (In Russ.)
 20. Pliev I.A. Assessing an engineering level of families of multi-purpose vehicles by the analytic hierarchy process. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers]. 2010;(3(62)):46-49. (In Russ.)
 21. Assessing an engineering level of families of multi-purpose vehicles by the analytic hierarchy process. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers]. 2010;(5(64)):50-54. (In Russ.)
 22. Morozov A.V. A comprehensive comparison of military vehicles of MRAP type at the engineering stage. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers]. 2015;(1(90)):40-45. (In Russ.)
 23. Oleinikov A.V., Makoklyuev A.I., Dulatina L.G. et al. The method for assessing an engineering level of mo-

- tors of samples of armament of armored fighting vehicles and machines. *Nauka i voennaya bezopasnost* [Science and Military Security]. 2022;(1(28)):17-21. (In Russ.)
24. Mazunova L.N., Dubkova M.A., Belyakov V.V. et al. Developing a procedure of calculating a mobility index for passenger cars based on a multi-objective optimization. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University]. 2021;(2(133)):102-112. (In Russ.)
25. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Erofeeva L.N. et al. Developing a procedure of calculating a mobility index for all-wheel drive vehicles based on a multi-objective optimization. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and Technical Journal of Bryansk State University]. 2022;(3):211-222. (In Russ.)
26. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Makarov V.S. et al. A comparative analysis of methods of multi-criteria assessment of competitiveness and mobility of automotive vehicles and tractors, factoring into indicator weight. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University]. 2022;(1(136)):125-136. (In Russ.)
27. Mazunova L.N., Belyakov V.V., Makarov V.S. et al. Transforming qualitative characteristics of vehicles into quantitative indicators by the analytic hierarchy process. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University]. 2023;(1(140)):97-106. (In Russ.)
28. Prokhorov Yu.K. *Upravlenie kachestvom: Uchebnoe posobie* [Quality management: study guide]. Saint Petersburg: ITMO University, 2007, 144 p. (In Russ.)
29. Belyakov V.V., Bushueva M.E., Sagunov V.I. *Mnogokriterialnaya optimizatsiya v zadachakh podvizhnosti, konkurentosposobnosti avtotraktorov i diagnostiki slozhnykh tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie* [Multi-criteria optimization in problems of mobility, competitiveness of automotive vehicles and tractors and diagnostics of complex technical systems: study guide]. Nizhny Novgorod: Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 2001, 271 p. (In Russ.)

Поступила 30.05.2023; принята к публикации 01.06.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 30/05/2023; revised 01/06/2023; published 25/09/2023

Мазунова Лариса Николаевна – старший преподаватель, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: matematixx@mail.ru. ORCID 0000-0003-3262-8348

Беляков Владимир Викторович – доктор технических наук, профессор, начальник управления научно-исследовательских и инновационных работ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: nauka@nntu.ru. ORCID 0000-0003-0203-9403

Ерофеева Лариса Николаевна – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой «Высшая математика», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: erofeevaln@mail.ru. ORCID 0000-0001-6535-1459

Бушуева Марина Евгеньевна – кандидат технических наук, доцент, декан факультета довузовской подготовки и дополнительных образовательных услуг, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: bme@nntu.ru. ORCID 0000-0002-0071-2417

Larisa N. Mazunova – Senior Lecturer, Institute of Transport Systems, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: matematixx@mail.ru. ORCID 0000-0003-3262-8348

Vladimir V. Belyakov – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Directorate for Research and Innovation, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: nauka@nntu.ru. ORCID 0000-0003-0203-9403

Larisa N. Erofeeva – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Further Mathematics Department, Institute of Transport Systems, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: erofeevaln@mail.ru. ORCID 0000-0001-6535-1459

Marina E. Bushueva – PhD (Eng.), Associate Professor, Dean of the Department of Pre-University Training and Further Educational Services, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: bme@nntu.ru. ORCID 0000-0002-0071-2417

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 656.078.1: 502.131.1
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196



ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ЦЕПЕЙ ПОСТАВОК НА ОСНОВЕ СЕРОГО РЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Установлено отсутствие общепринятой методологии оценки устойчивости цепей поставок. В зависимости от вида и структуры цепей поставок используются разнообразные критерии, методы и модели оценки устойчивости, основанные на учёте влияния различных факторов среды функционирования этих цепей. **Цель работы.** Обоснование универсальной системы экономических, социальных и экологических факторов устойчивости цепей поставок и разработка методики оценки устойчивости этих цепей. **Используемые методы.** Литературный обзор, системный анализ, многокритериальный анализ, серый реляционный анализ, метод экспертных оценок. **Новизна.** Универсальная система факторов устойчивости цепей поставок, обоснованная с использованием оригинальной методики оценки значимости факторов на основе серого реляционного анализа. **Результат.** Ранжирование факторов устойчивости цепей поставок в порядке убывания влияния факторов на достижение целей устойчивого развития. Способ выбора методов и инструментов зелёной логистики на основе рангов факторов устойчивости. **Практическая значимость.** Разработанная методика предназначена для оценки устойчивости цепей поставок и выбора управленческих решений по достижению экономических, социальных и экологических целей их развития и функционирования.

Ключевые слова: цепи поставок, устойчивость, устойчивые цепи поставок, многокритериальный анализ, серый реляционный анализ, факторы, «зелёная» логистика

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-21-10038, <https://rscf.ru/project/23-21-10038/>.

© Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н., 2023

Для цитирования

Осинцев Н.А., Рахмангулов А.Н. Оценка устойчивости цепей поставок на основе серого реляционного анализа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 180-196. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196>



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

SUPPLY CHAIN SUSTAINABILITY ASSESSMENT BASED ON GRAY RELATIONAL ANALYSIS

Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). It has been established that there is no generally accepted methodology for assessing the sustainability of supply chains. A variety of criteria, methods, and models for assessing the sustainability based on the influence of various factors in the supply chain operation environment, are used depending on the type and the structure of supply chains. **Objectives.** The research is aimed at providing a rationale for a universal system of economic, social, and environmental factors for the sustainability of supply chains and development of a relevant assessment methodology. **Methods Applied.** A literature review, a system analysis, a multicriteria analysis, gray relational analysis, and a peer review method. **Originality.** A universal system of supply chain sustainability factors supported by using an original methodology for assessing the value of factors based on gray relational analysis. **Result.** The paper describes the ranking of supply chain sustainability factors in a descending order of their impact on the achievement of sustainable development goals. The authors present an approach to the choice of methods and tools of green logistics based on the ranks of sustainability factors. **Practical Relevance.** The developed methodology is designed to assess the sustainability of supply chains and make management decisions to achieve the economic, social, and environmental goals of their development and functioning.

Keywords: supply chains, sustainability, sustainable supply chains, multicriteria analysis, gray relational analysis, factors, green logistics

The research was funded by grant of the Russian Science Foundation No. 23-21-10038, <https://rscf.ru/project/23-21-10038/>.

For citation

Osintsev N.A., Rakhmangulov A.N. Supply Chain Sustainability Assessment Based on Gray Relational Analysis. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 180-196. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-180-196>

Введение

Изменчивость и неопределённость множества факторов эффективности функционирования цепей поставок осложняет принятие управленческих решений. Глобализация, сокращение продолжительности жизненного цикла товаров, государственное регулирование, инновации приводят к появлению новых продуктов и услуг, изменению целей и поведения стейкхолдеров в цепях поставок [1]. Каждый участник цепи поставок по-разному оценивает влияние факторов внешней среды. Такие оценки не всегда совпадают с объективной интенсивностью и силой воздействия факторов, оказывающих различное влияние на элементы цепей поставок. Это осложняет согласованное функционирование звеньев цепи поставок, снижает их эффективность. Возникает необходимость приоритизации факторов, определения их значимости и степени влияния на элементы цепей поставок с целью принятия эффективных управленческих решений.

В настоящее время эффективность функционирования цепей поставок всё чаще оценивают критерием устойчивости – комплексным критерием достижения экономических, социальных и экологических целей. Это обусловлено особенностями структуры цепей поставок, когда элементы одной и той же цепи могут располагаться в регионах с различными природно-климатическими и политическими условиями, разными уровнями развития экономики. Единственным фактором, оказывающим схожее влияние на разные элементы цепей поставок, является необходимость решения комплекса глобальных экологических проблем, связанных с выбросами парниковых газов, загрязнением окружающей среды, истощением природных ресурсов и изменением климата.

По заявлению генерального секретаря ООН Антонио Гутерриша, «Каждая страна, город, финансовое учреждение и компания должны принять планы по нулевому выбросу вредных веществ и действовать сейчас, чтобы встать на пра-

вильный путь к этой цели, что означает сокращение глобальных выбросов на 45% к 2030 году по сравнению с уровнем 2010 года» [2]. Следуя этой тенденции, многие ведущие мировые организации планируют достижение углеродной нейтральности в своей деятельности и цепочках поставок [3]. Большинство государств приняты цели в области устойчивого развития (ЦУР), реализуется концепция устойчивого развития (Sustainable Development). Растущее давление со стороны стейкхолдеров, государственных и неправительственных организаций вынуждает различные отрасли внедрять инициативы по управлению устойчивыми цепями поставок – Sustainable supply chain management [4]. Интеграция концепции устойчивого развития в операции цепей поставок позволяет компаниям создать «конкурентное преимущество» на рынке [5], а аспекты устойчивого развития и ЦУР становятся все более актуальными для включения в бизнес-логику и управление цепочками поставок [6].

Однако термин «устойчивость» в логистике и практике управления цепями поставок в настоящее время часто используется как синоним другим хорошо известным из теории управления понятиям, таким, например, как надёжность, эластичность, уязвимость или адаптация [7]. Наиболее часто в отношении устойчивости цепей поставок используются два понятия – «sustainability» и «resilience». Если «sustainability» больше тяготеет к концепции устойчивого развития, то «resilience» рассматривается как возможность сохранения ключевых функций в условиях неопределённости, сбоев и изменений [7, 8]. В данном исследовании под устойчивостью цепей поставок понимается их состояние, обеспечивающее достижение целей устойчивого развития, то есть достижение максимальных сбалансированных социальных, экологических и экономических показателей.

В настоящее время ведутся серьёзные споры о том, как следует измерять эффективность и устойчивость цепей поставок [9], какие факторы оказывают влияние на устойчивость [3], а также какие модели и методы использовать для оценки устойчивости. Целью настоящего исследования является разработка универсальной системы факторов устойчивости цепей поставок, а также методики формирования и корректировки такой системы.

Структура статьи организована следующим образом. В разделе «Литературный обзор» представлены результаты анализа актуальных исследований в области оценки устойчивости цепей

поставок, выявлены основные недостатки существующих подходов к оценке устойчивости. Раздел «Материалы и методы исследования» содержит описание оригинальной методики оценки факторов устойчивости цепей поставок, основанной на использовании серого реляционного анализа и логистического подхода к систематизации факторов устойчивости. В разделе «Полученные результаты и их обсуждение» представлены результаты ранжирования факторов устойчивости в порядке убывания их влияния на достижение целей устойчивого развития цепей поставок. Показан способ выбора методов и инструментов «зелёной» логистики на основе рангов факторов устойчивости. В заключении представлены основные результаты и показаны перспективы развития исследования.

Литературный обзор

В результате обзора научных публикаций в области оценки устойчивости цепей поставок выделены следующие направления исследований: драйверы и барьеры управления устойчивыми или «зелёными» цепями поставок; модели и методы оценки факторов эффективности и устойчивости различных видов цепей поставок; тематические исследования цепей поставок различного вида и структуры. В [10] отмечается, что эмпирические исследования по изучению факторов управления «зелёными» цепями поставок показывают разные результаты.

В работе [11] в качестве основных факторов эффективности цепи поставок выделяют структуру цепей, политику управления запасами, систему обмена информацией, потребительский спрос, методы прогнозирования, время выполнения заказа и продолжительность отчётного периода. По мнению авторов [11], оптимальный набор параметров этих факторов повышает эффективность цепочки поставок. В [12] представлен всесторонний обзор факторов экологической устойчивости цепочки поставок. Эти факторы затем используются для обоснования управленческих решений по трём направлениям – управление закупками (тринадцать факторов), оценка эффективности (семь факторов) и сотрудничество (двадцать пять факторов).

В [13] исследованы факторы внутренней среды цепей поставок и выделены восемь групп факторов, наиболее значимыми из которых являются приверженность высшего руководства целям устойчивого развития, а также процессы реверсивной логистики и управления запасами. В другой работе [10] исследованы шесть факторов и

показано, что наиболее влиятельным является «зелёное производство», а фактор «зелёная логистика» находится под влиянием всех остальных факторов. В [14] выполнено исследование факторов, оказывающих влияние на реализацию «зелёных» инициатив и их вклад в достижение корпоративных целей логистических компаний.

В [15] установлено, что среди одиннадцати факторов внедрения «зелёных» цепей поставок на верхнем уровне иерархии находятся четыре: экологичный дизайн; интеграция качественного управления окружающей средой в процесс планирования и эксплуатации; снижение энергопотребления; повторное использование и переработка материалов (упаковки). В работе [16] исследованы важнейшие факторы успеха «зелёного» управления цепочками поставок в странах с развивающейся экономикой. Автором разработаны двадцать три модели и гипотезы с целью выявления факторов и барьеров внедрения экологичного управления ЦП.

Исследование [17] посвящено анализу устойчивого развития отдельных звеньев цепи поставок. Выявлены семь факторов формирования стратегии устойчивости цепи поставок. В исследовании [18] авторы акцентируют внимание на поведенческие факторы устойчивой цепи поставок. Авторы выделяют четырнадцать таких факторов, влияющих на эффективность управления. В работе [4] оценка успешного внедрения устойчивых цепей поставок осуществляется с использованием шестнадцати факторов.

В [19] выполнен обзор исследований критических факторов реализации инноваций в устойчивых цепях поставок. В результате анализа выделено четырнадцать основных категорий критических факторов, наиболее значимыми из которых являются сотрудничество, стратегическая ориентация, культура, практика и политический контекст. В работе [20] в качестве критических факторов успеха устойчивого управления цепями поставок выделяют четыре группы факторов: внешнее влияние; внутренняя среда организации; практика устойчивого управления цепочками поставок; эффективность устойчивого развития организации. Оценка факторов осуществляется с использованием двадцати параметров. В работе [21] выполнен анализ семнадцати факторов риска цепочки поставок с участием малых и средних предприятий в условиях неопределённости внешней среды с целью устойчивого развития.

Авторы [22] основным драйвером устойчивости цепи поставок называют управление прозрачностью цепочки поставок. Ими исследовано че-

тырнадцать факторов и выполнена их приоритизация. В другой работе [23] прозрачность устойчивой цепи поставок предлагают оценивать пятнадцатью факторами, используя для оценки шестьдесят девять параметров и показателей. В [24] предложена ABCDE-структура, включающая в себя пять групп факторов прозрачности цепей поставок (предпосылки (A), барьеры (B), проблемы (C), драйверы (D) и последствия (E)).

В [3] на основе обобщения тридцати двух факторов декарбонизации цепи поставок установлено четыре основных барьера устойчивости цепи: первоначальные инвестиционные затраты; недостаточная осведомлённость (среди потребителей, заказчиков, поставщиков и сотрудников); отсутствие опыта; устойчивое мышление. В [25] выявлено сорок семь барьеров, препятствующих внедрению «зелёных» практик в управление цепями поставок. В [26] на основе анализа научных работ систематизированы тридцать семь драйверов и тридцать шесть барьеров как основных факторов, влияющих на эффективность реверсивной логистики.

В качестве методов оценки факторов устойчивости цепей поставок большинство исследователей используют: интерпретационное структурное моделирование (Interpretive Structural Modelling, ISM) [13, 15, 21, 27]; метод «Матричное произведение пересечений (жёстких) воздействий применительно к рейтингу» (Matriced' Impacts Croises Multiplication Applique a un Classement, MICMAC) [15, 21]; метод «Лаборатория оценки и испытаний принятия решений» (DEMATEL) [10, 18]; системный литературный обзор [3, 19], факторный анализ [20]; дисперсионный анализ ANOVA [14]; метод парного сравнения с использованием нечётких чисел [22]; метод анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process, AHP) [25]. Изменчивость и неопределённость множества факторов, оказывающих влияние на функционирование цепей поставок, показывает возможность применения серого реляционного анализа (Grey Relational Analysis, GRA) для оценки эффективности и устойчивости цепочек поставок [28-31].

Таким образом, анализ научных работ в области оценки устойчивости цепей поставок позволяет сделать следующие выводы:

1. Наблюдается увеличение числа научных публикаций, посвящённых управлению устойчивыми и зелёными цепями поставок, в том числе работ, связанных с оценкой устойчивости цепей поставок. При этом отмечается расхождение во взглядах учёных относительно понимания устойчивости цепей поставок.

2. Недостатком большинства существующих подходов является отсутствие системного подхода к оценке устойчивости всех элементов и процессов в цепях поставок. Наиболее частым объектом оценки являются «устойчивая поставка», на долю которого приходится до 43% исследований. Наименьшее количество исследований приходится на «устойчивое производство» и «устойчивое складирование».

3. Отсутствует единая система факторов и общепринятая система индикаторов оценки устойчивости цепей поставок. Исследователями используются различные факторы и показатели оценки данных факторов в зависимости от вида цепей поставок, масштабов и целей их функционирования.

4. Множество факторов, оказывающих влияние на устойчивость цепей поставок, а также сложность сбора исходных данных для их оценки делает целесообразным использование многокритериального анализа, экспертных методов, в том числе основанных на положениях теории нечётких множеств и теории серых систем.

Материалы и методы исследования

Серый реляционный анализ. Серый реляционный анализ (далее GRA) является частью теории серых систем (Grey System Theory), которая впервые была предложена профессором Дэн Джулонгом [32] в 1982 году. Название теории было выбрано на основе соответствия цветов степени ясности информации о системе: черный – для обозначения неизвестной информации; белый – полностью известной информации; серый – для информации, которая известна только частично. Такой подход позволяет учитывать неопределённость в принятии решений при наличии не точной и неполной информации о системе (её элементах, границах, параметрах), а также поведении системы [33].

GRA используется для исследования динамической взаимосвязи между различными факторами и их изменениями, оценки влияния данных факторов на исследуемую систему и определения важности влияния факторов на цели системы [34]. На основе расчёта серых реляционных коэффициентов и анализа серой реляционной степени, которая является положительной метрикой корреляции, определяется важность соответствующего фактора в системе [31].

Методика оценки факторов устойчивости цепей поставок с использованием серого реляционного анализа состоит из шести этапов.

Этап 1. Формирование начальной матрицы оценки факторов устойчивости цепей поставок

X_i в соответствии с мнениями экспертов, которая включает m факторов, характеризующихся n критериями по формуле

$$X_i = [x_{ij}]_{nm}, \quad (1)$$

где x_{ij} – значение оценки i -го фактора по j -му критерию.

Этап 2. Нормализация начальной матрицы оценки факторов устойчивости цепей поставок с учётом критериев «выгода» и «затраты», характеризующихся различными значениями целевой функции. Для критериев «выгода» (benefit) значение целевой функции стремится к максимуму, а для критериев «затраты» (cost) – к минимуму.

Нормализованная матрица X_i^* рассчитывается по формуле

$$X_i^* = [x_{ij}^*]_{nm}, \quad (2)$$

где значения x_{ij}^* для критериев «выгода» определяются по формуле

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}}, \quad (3)$$

а для критериев «затраты» – по формуле

$$x_{ij}^* = \frac{\max\{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}}. \quad (4)$$

Использование формул (3) или (4) будет зависеть от установленных целевых значений критериев. Например, для показателя «прибыль» значение целевой функции стремится к максимуму и используется формула (3), а для показателя «операционные расходы» – к минимуму и используется формула (4).

Этап 3. Определение эталонного значения оценки факторов и построение матрицы различий Δ путём сравнения значений оценок каждого фактора нормализованной матрицы X_{ij}^* с эталонным значением x_{0j} .

$$\Delta = [\Delta_{ij}]_{nm}, \quad (5)$$

$$\Delta_{ij} = |x_{0j} - x_{ij}^*|. \quad (6)$$

Из полученной матрицы различий Δ_{ij} выбираются минимальное и максимальное значения:

$$\Delta_{\min} = \min\{\Delta_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}, \quad (7)$$

$$\Delta_{\max} = \max\{\Delta_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}. \quad (8)$$

Этап 4. Расчёт серого реляционного коэффициента для всех факторов по формуле

$$\gamma(x_{0j}, x_{ij}) = \frac{\Delta_{\min} + \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} - \varphi \Delta_{\max}}, \quad (9)$$

где φ – различительный коэффициент, показывающий соотношение значений минимальных и максимальных оценок. Значение коэффициента устанавливается лицами, принимающими решения, в интервале $\varphi \in [0, 1]$. Обычно значение φ принимается равным 0,5 [35].

Этап 5. Расчёт серых реляционных оценок для m факторов.

Серая реляционная оценка рассчитывается как среднее значение серых реляционных коэффициентов по формуле

$$\delta_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \gamma(x_{0j}, x_{ij}), i = 1, 2, \dots, m. \quad (10)$$

В случае если критерии имеют разные веса, серая реляционная оценка определяется по формуле

$$\delta_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_j \gamma(x_{0j}, x_{ij}), i = 1, 2, \dots, m, \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1, \quad (12)$$

где w_j – весовой коэффициент j -го критерия.

Определение весовых коэффициентов критериев в сложных системах, к которым относится система оценки цепей поставок, возможна с использованием субъективных и объективных методов взвешивания. Субъективные методы определения веса основаны на экспертной оценке, то есть определяются на основе суждений лица, принимающего решения (ЛПР) о данных критериях. Наибольшее распространение в MCDM получили такие методы, как SMART, AHP, SIMOS и метод Delphi. В методах объективного взвешивания вес определяется в результате анализа данных, собранных по каждому критерию с использованием математических алгоритмов и моделей и без участия ЛПР. Наиболее распространёнными методами являются метод наименьших средних квадратов (LMS), минимальное максимальное

отклонение, энтропия, TOPSIS и многокритериальная оптимизация [36].

Этап 6. Ранжирование факторов.

Ранжирование факторов производится в порядке уменьшения значений серых реляционных оценок δ_i . Фактор с наибольшим значением серой реляционной оценки будет считаться наиболее значимым, то есть его значение будет наиболее близким к эталонному значению по всем критериям.

Методика оценки факторов устойчивости цепей поставок с использованием GRA. Принципиальная схема предлагаемой методики оценки факторов устойчивости цепей поставок с использованием серого реляционного анализа представлена на **рис. 1**.

Основные этапы методики:

I этап. Формирование модели устойчивой цепи поставок путём декомпозиции цепи на элементы с выделением специфических функций и операций по продвижению и переработке логистических потоков [37]. В устойчивых цепях поставок такими функциями являются [38]: снабжение и поставка (входной элемент); производство (перерабатывающий элемент); складирование (накопительный элемент); транспортирование (транспортный элемент); сбыт и дистрибуция (выходной элемент) и управление (управляющий элемент) (**рис. 2**). Выполнение перечисленных функций направлено на достижение целей устойчивого развития [38].

II этап. Оценка факторов устойчивости цепей поставок. Формируется группа экспертов, которые выполняют оценку факторов, оказывающих влияние на устойчивость каждого элемента цепи поставок в соответствии с выбранными критериями устойчивости. Оценивание допускается производить с использованием различных шкал, в том числе с использованием нечётких чисел. Далее с использованием GRA (формулы (1)-(12)) рассчитываются серые реляционные оценки, численные значения которых показывают значимость того или иного фактора устойчивости цепи поставок.

III этап. Оценка степени влияния факторов на элементы цепей поставок с использованием результатов GRA. Полученные результаты являются основой разработки рекомендации по использованию инструментов «зелёной» логистики применительно к элементам цепей поставок. Для ранжирования и выбора инструментов рекомендуется использовать многокритериальные методы принятия решений [39].

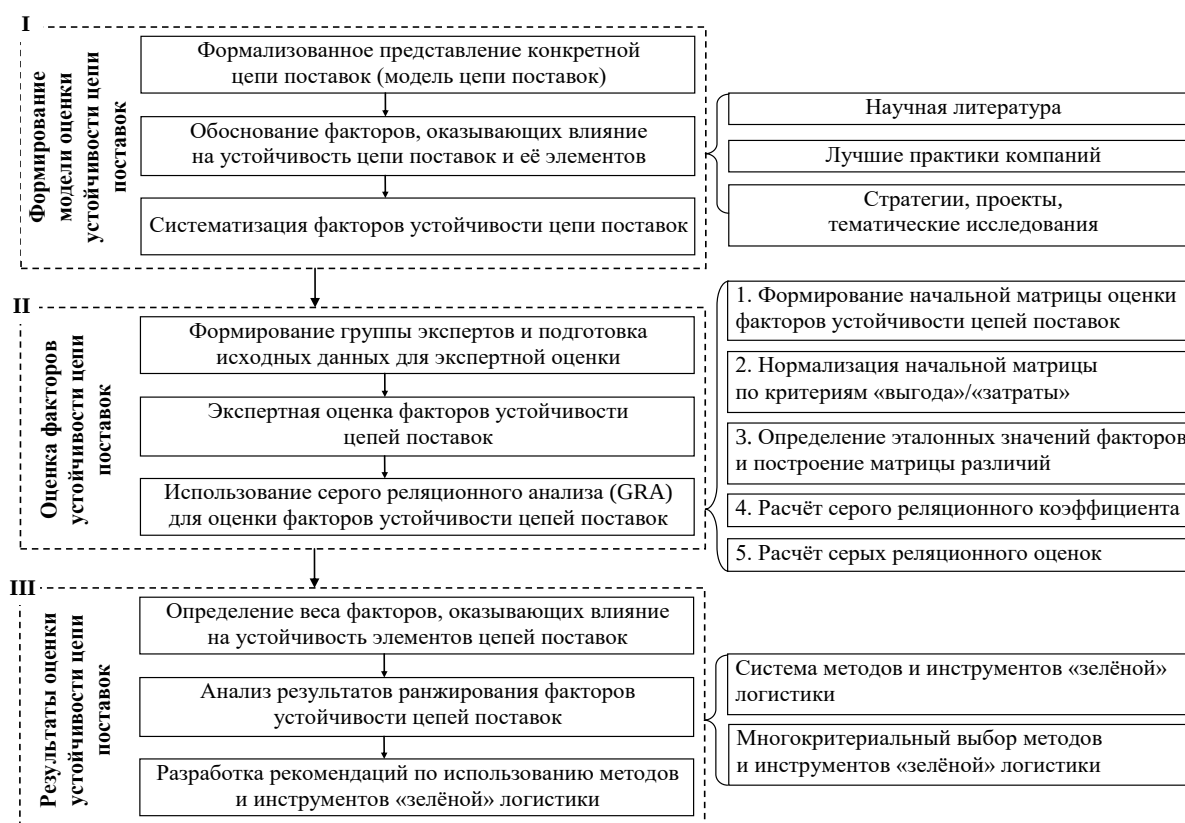


Рис. 1. Схема методики оценки факторов устойчивости цепей поставок

Fig. 1. Methodology for assessing the supply chain sustainability factors

Полученные результаты и их обсуждение

Система факторов устойчивости цепей поставок. На основе анализа научной литературы, проектов, программ, а также лучших практик реализации «зелёных» принципов и технологий по повышению устойчивости цепей поставок нами обоснована система факторов устойчивости цепей поставок. На **рис. 2** представлена предлагаемая система. В качестве основного признака систематизации были использованы поддерживающие функции элементов цепей поставок [40].

Разработанная система включает 54 фактора: 8 факторов входного элемента (F1.1...F1.8); 9 факторов перерабатывающего элемента (F2.1...F2.9); 11 факторов накопительного элемента (F3.1...F3.11); 12 факторов транспортного элемента (F4.1...F4.12); 6 факторов выходного элемента (F5.1...F5.6); 8 факторов управляющего (F6.1...F6.8). В качестве критериев оценки устойчивости цепей поставок могут быть использованы различные системы параметров и показателей, обзор которых представлен в [41]. Общим признаком различных систем оценки является соответствие параметров и показателей трём основным аспектам концепции устойчивого развития – экономическому, социально-культурному и экологи-

ческому. В настоящей работе использованы три обобщённых критерия экономической (C1), социальной (C2) и экологической (C3) устойчивости. Экономическая устойчивость характеризует эффективность использования всех видов ресурсов цепи поставок, а также степень экономической жизнеспособности цепи поставок. Это заключается в согласовании целей устойчивого развития с целями формирования и функционирования цепей поставок – получение прибыли, экономический рост, повышение конкурентоспособности и др. Социальная устойчивость характеризует возможность достижения целей, направленных на повышение уровня жизни, обеспечения транспортной безопасности, расширения доступности и улучшения качества транспортных и логистических услуг населению. Экологическая устойчивость отражает влияние цепей поставок на окружающую среду в процессе продвижения и переработки логистических потоков. Это выражается в оценке и учёте экологических факторов, а также ресурсных ограничений, необходимых для проектного и инвестиционного анализа, при стратегическом планировании развития территорий, обоснования приоритетных направлений развития транспорта и логистической инфраструктуры [40].

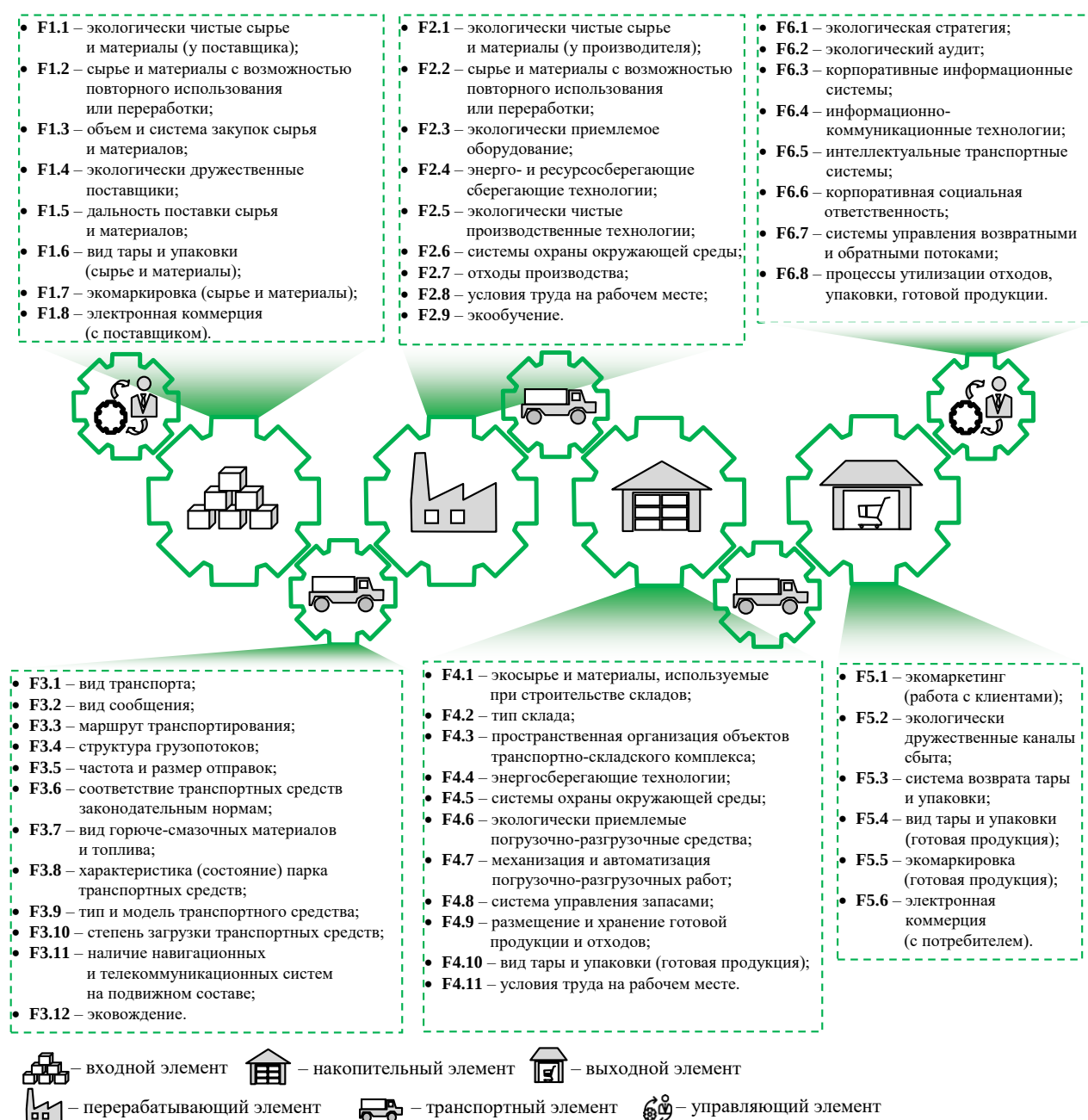


Рис. 2. Универсальная система факторов устойчивого развития цепей поставок [40]
Fig. 2. A universal system of the supply chain sustainable development factors [40]

На втором этапе реализации методики была сформирована группа экспертов, состоящая из пяти академических экспертов в области логистики и управления цепями поставок (три доктора и два кандидата технических наук). Эксперты произвели оценку влияния факторов на экономическую, социальную и экологическую устойчивость элементов цепей поставок по 9-бальной шкале (1 – наибольшее влияние, 9 – наименьшее). Сформированная начальная матрица оценки факторов X_i представлена в табл. 1.

Согласованность мнений экспертов в расчёт-

ном примере оценивалась с помощью коэффициента конкордации Кендалла отдельно по каждому критерию устойчивости цепи поставок и составила от 0,55 до 0,6, что говорит об умеренной согласованности экспертов. Необходимо отметить, что представленный пример ставит целью показать реализацию разработанной методики и максимально упростить оценку факторов по трём ключевым аспектам устойчивости цепей поставок (значимость которых в примере одинаковая). Однако для оценки устойчивости

цепей поставок на практике используют сложные многокритериальные иерархические системы. Вес параметров и показателей в них различный, а значения показателей могут быть получены как экспертными методами, так и с помощью

статистических или отчётных данных. Сложность сбора исходных данных, неопределённость информации делает целесообразным использование GRA для оценки устойчивости конкретных цепей поставок.

Таблица 1. Результаты экспертной оценки факторов устойчивости цепей поставок

Table 1. An expert assessment of the supply chain sustainability factors

Элементы ЦП	Факторы	Эксперт 1			Эксперт 2			Эксперт 3			Эксперт 4			Эксперт 5		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Входной элемент (поставка)	F1.1	6	5	7	5	3	7	5	2	7	4	2	7	2	2	4
	F1.2	7	4	6	7	3	8	7	3	9	5	2	9	3	2	5
	F1.3	6	2	5	7	9	6	7	8	7	5	9	4	6	5	4
	F1.4	3	4	4	5	7	3	2	3	5	3	2	7	4	3	4
	F1.5	6	3	6	7	7	5	4	7	9	7	7	8	6	5	3
	F1.6	2	3	5	6	2	6	5	4	7	3	2	7	5	2	5
	F1.7	2	5	4	5	3	2	4	5	7	2	2	5	4	2	2
	F1.8	3	7	6	3	3	5	7	7	5	2	6	2	5	5	4
Перерабатывающий элемент (производство)	F2.1	7	5	7	9	5	9	7	2	9	5	2	8	4	2	3
	F2.2	8	5	8	7	2	7	7	2	9	5	2	9	3	3	5
	F2.3	7	8	8	7	6	9	5	2	9	5	2	8	5	2	5
	F2.4	8	7	6	7	5	8	7	2	9	8	2	8	3	3	6
	F2.5	8	8	9	7	5	9	7	2	9	8	2	8	3	3	5
	F2.6	6	7	7	7	3	9	5	2	9	5	2	5	3	2	6
	F2.7	6	7	8	8	2	7	7	2	9	5	2	8	5	3	4
	F2.8	7	9	6	5	6	7	3	3	9	4	2	5	3	2	3
	F2.9	4	7	6	5	5	7	5	3	9	4	2	4	3	2	2
	F3.1	7	6	7	5	2	9	3	2	2	6	2	5	5	3	4
Накопительный элемент (складирование)	F3.2	6	7	3	6	7	5	8	5	9	7	2	5	5	3	4
	F3.3	5	6	4	6	3	6	6	3	9	5	2	4	4	3	3
	F3.4	7	4	6	9	5	7	8	2	7	5	2	8	5	3	6
	F3.5	6	7	6	7	6	8	3	2	7	4	2	5	4	3	6
	F3.6	6	5	7	7	7	9	4	2	8	5	2	8	4	3	6
	F3.7	6	8	3	8	9	5	9	5	5	8	7	5	5	5	4
	F3.8	8	3	4	9	6	6	7	8	9	5	8	5	4	6	4
	F3.9	7	6	7	5	7	7	5	7	7	3	6	2	3	3	3
	F3.10	6	3	6	7	5	7	3	2	5	2	2	3	4	3	5
	F3.11	6	8	3	5	6	6	3	6	8	3	2	5	3	2	3
	F4.1	6	5	7	9	5	9	6	3	9	3	2	8	4	3	5
Транспортный элемент (транспортировка)	F4.2	7	6	7	6	7	7	7	6	7	7	7	7	3	4	3
	F4.3	6	6	5	6	6	7	7	7	7	5	7	6	4	5	5
	F4.4	5	5	4	5	7	7	7	7	7	7	7	6	6	4	3
	F4.5	8	5	6	5	4	7	7	7	7	6	8	5	3	4	5
	F4.6	5	3	7	7	6	8	6	2	9	5	2	8	3	3	4
	F4.7	6	2	7	7	2	9	6	2	9	5	2	7	3	3	4
	F4.8	7	6	6	7	6	7	8	4	9	7	2	9	3	3	6
	F4.9	6	5	6	7	4	9	6	2	9	6	2	9	3	3	5
	F4.10	5	3	4	7	4	6	8	3	9	6	2	6	5	3	7
	F4.11	7	6	5	5	6	5	5	7	7	4	5	6	3	5	4
	F4.12	4	6	4	6	5	7	3	4	7	2	2	5	3	3	4
	F5.1	6	8	7	5	6	5	2	3	5	5	2	2	5	3	3
Выходной элемент (дистрибуция)	F5.2	6	7	6	7	8	7	5	5	7	6	5	7	3	4	5
	F5.3	7	5	8	6	4	8	5	3	7	6	4	7	3	3	3
	F5.4	5	6	5	7	6	7	5	5	7	4	4	7	3	3	4
	F5.5	3	5	4	4	5	7	3	4	3	2	3	3	3	3	4
	F5.6	6	7	6	5	5	7	5	7	5	4	7	3	3	5	3
	F6.1	8	7	7	6	4	7	3	3	7	4	2	8	5	3	5
Управляющий элемент (управление)	F6.2	7	6	8	3	5	5	3	3	7	3	2	8	3	3	4
	F6.3	5	8	4	7	7	5	3	3	5	5	6	3	4	5	4
	F6.4	6	7	5	7	6	7	7	9	7	9	7	7	5	5	3
	F6.5	8	6	5	8	8	8	5	7	7	9	7	5	5	6	6
	F6.6	6	9	7	3	7	5	3	3	5	3	5	3	3	3	4
	F6.7	7	5	7	6	4	8	5	3	7	6	4	6	5	3	6
	F6.8	8	6	8	5	6	7	7	3	7	5	2	8	5	3	6

С использованием формул (2)-(8) рассчитаны нормализованные значения оценки факторов x_{ij}^* и определены их отклонения от эталонного значения Δ_{ij} (табл. 2). Далее по формуле (9) рассчитаны зна-

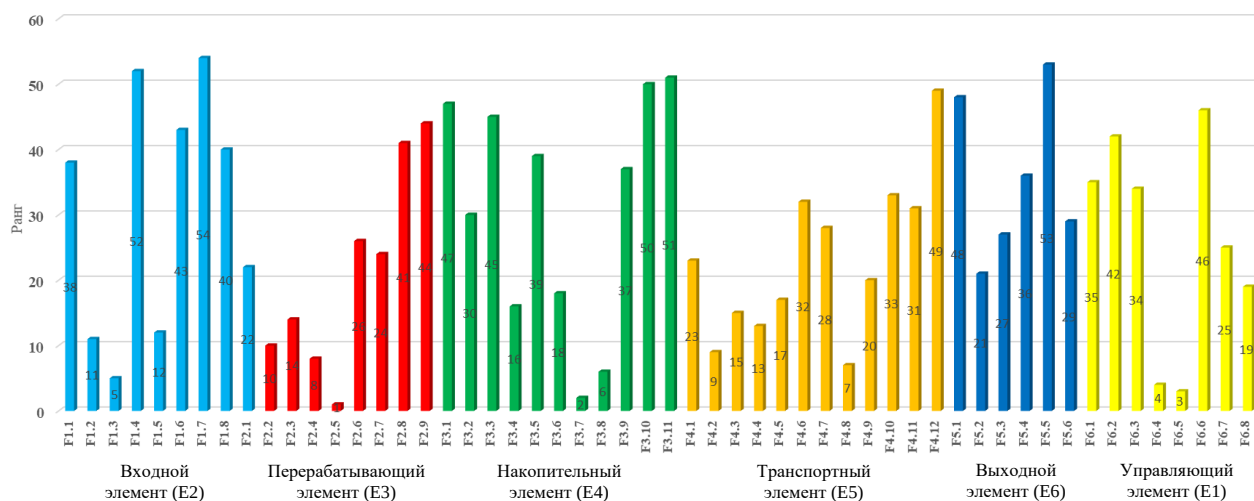
чения серого реляционного коэффициента γ для всех факторов, а по формуле (10) – серая реляционная оценка факторов δ_i (см. табл. 2).

Таблица 2. Результаты оценки факторов методом GRA
Table 2. The assessment of the factors by the GRA method

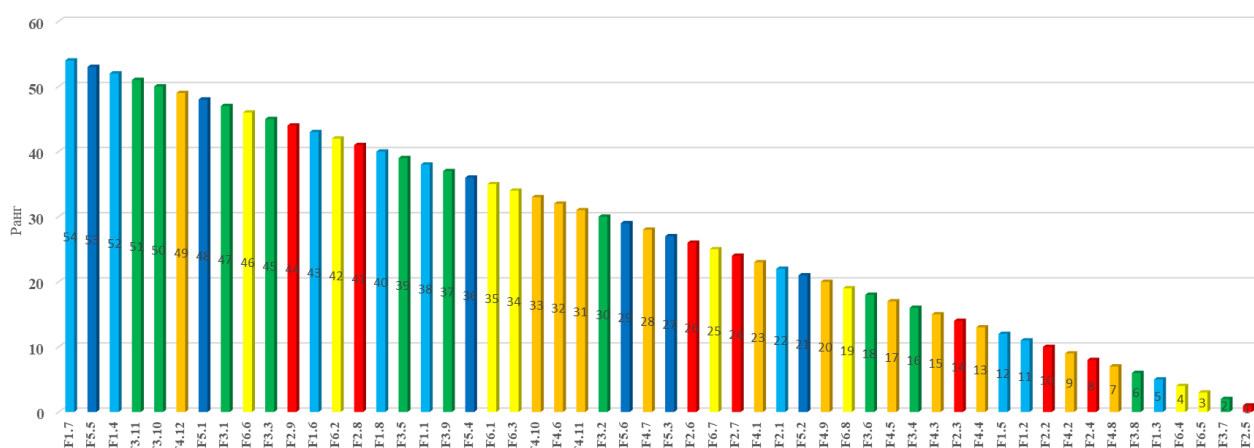
Факторы	Начальные значения оценок факторов x_{ij}			Нормализованные значения оценок факторов x_{ij}^*			Отклонения Δ_{ij}			Серый реляционный коэффициент γ			Серая реляционная оценка δ_i	Ранг
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3		
F1.1	4,742	2,491	6,787	0,428	0,067	0,759	0,571	0,932	0,240	0,466	0,349	0,675	0,496	38
F1.2	5,851	2,701	7,708	0,690	0,111	0,974	0,309	0,888	0,025	0,617	0,360	0,952	0,643	11
F1.3	6,153	6,948	5,073	0,762	1,000	0,357	0,238	0,000	0,642	0,677	1,000	0,437	0,705	5
F1.4	3,245	3,650	4,416	0,074	0,309	0,204	0,925	0,690	0,796	0,350	0,420	0,385	0,385	52
F1.5	6,153	5,524	6,407	0,762	0,702	0,670	0,238	0,298	0,329	0,677	0,626	0,602	0,635	12
F1.6	4,477	2,491	5,932	0,365	0,067	0,559	0,634	0,932	0,440	0,440	0,349	0,531	0,440	43
F1.7	3,169	3,129	3,545	0,056	0,200	0,000	0,943	0,799	1,000	0,346	0,384	0,333	0,354	54
F1.8	3,519	5,673	4,128	0,139	0,733	0,136	0,860	0,266	0,863	0,367	0,652	0,366	0,462	40
F2.1	6,433	2,885	6,710	0,828	0,149	0,741	0,171	0,850	0,258	0,744	0,370	0,658	0,591	22
F2.2	6,517	2,605	7,432	0,848	0,091	0,910	0,151	0,908	0,089	0,767	0,354	0,847	0,656	10
F2.3	5,720	2,759	7,633	0,659	0,123	0,957	0,340	0,876	0,042	0,595	0,363	0,921	0,626	14
F2.4	6,602	3,347	7,300	0,868	0,246	0,879	0,131	0,753	0,120	0,791	0,398	0,805	0,665	8
F2.5	7,159	3,816	7,815	1,000	0,344	1,000	0,000	0,655	0,000	1,000	0,432	1,000	0,810	1
F2.6	5,304	2,825	7,016	0,561	0,137	0,813	0,438	0,862	0,187	0,532	0,366	0,727	0,542	26
F2.7	6,093	2,605	6,942	0,747	0,091	0,795	0,252	0,908	0,204	0,664	0,354	0,709	0,576	24
F2.8	4,169	4,193	5,632	0,293	0,423	0,488	0,707	0,576	0,511	0,414	0,464	0,494	0,457	41
F2.9	4,128	3,936	4,967	0,283	0,369	0,333	0,716	0,630	0,667	0,410	0,442	0,428	0,427	44
F3.1	5,008	2,491	4,789	0,491	0,067	0,291	0,508	0,932	0,708	0,495	0,349	0,413	0,419	47
F3.2	6,319	4,300	4,617	0,801	0,445	0,251	0,198	0,554	0,748	0,715	0,474	0,400	0,530	30
F3.3	5,143	2,930	4,441	0,523	0,159	0,209	0,476	0,840	0,790	0,511	0,372	0,387	0,424	45
F3.4	6,608	3,519	6,759	0,869	0,282	0,752	0,130	0,717	0,247	0,793	0,410	0,669	0,624	16
F3.5	4,580	3,471	6,319	0,390	0,272	0,649	0,609	0,727	0,350	0,450	0,407	0,588	0,481	39
F3.6	5,304	3,347	7,528	0,561	0,246	0,932	0,438	0,753	0,067	0,532	0,398	0,881	0,604	18
F3.7	7,039	6,853	4,573	0,971	0,980	0,240	0,028	0,019	0,759	0,945	0,961	0,397	0,768	2
F3.8	6,608	6,490	5,073	0,869	0,904	0,357	0,130	0,095	0,642	0,793	0,839	0,437	0,690	6
F3.9	4,891	5,555	4,599	0,463	0,708	0,246	0,536	0,291	0,753	0,482	0,631	0,398	0,504	37
F3.10	4,324	2,825	5,008	0,329	0,137	0,342	0,670	0,862	0,657	0,427	0,366	0,431	0,408	50
F3.11	3,519	4,095	4,644	0,139	0,403	0,257	0,860	0,597	0,742	0,367	0,455	0,402	0,408	51
F4.1	5,223	3,393	7,432	0,542	0,256	0,910	0,457	0,743	0,089	0,522	0,401	0,847	0,590	23
F4.2	6,068	6,153	6,258	0,742	0,833	0,635	0,258	0,166	0,364	0,659	0,750	0,578	0,662	9
F4.3	5,501	6,153	6,153	0,607	0,833	0,610	0,392	0,166	0,389	0,560	0,750	0,562	0,624	15
F4.4	5,932	6,068	5,932	0,709	0,815	0,559	0,290	0,184	0,440	0,632	0,730	0,531	0,631	13
F4.5	6,093	5,618	6,153	0,747	0,721	0,610	0,252	0,278	0,389	0,664	0,642	0,562	0,623	17
F4.6	5,008	2,930	6,942	0,491	0,159	0,795	0,508	0,840	0,204	0,495	0,372	0,709	0,526	32
F4.7	5,501	2,168	6,920	0,607	0,000	0,790	0,392	1,000	0,209	0,560	0,333	0,704	0,532	28
F4.8	6,721	3,866	7,277	0,896	0,355	0,874	0,103	0,644	0,126	0,828	0,436	0,798	0,687	7
F4.9	5,705	2,992	7,378	0,656	0,172	0,897	0,343	0,827	0,102	0,592	0,376	0,830	0,599	20
F4.10	5,932	2,930	6,187	0,709	0,159	0,618	0,290	0,840	0,381	0,632	0,372	0,567	0,524	33
F4.11	4,617	5,752	5,304	0,399	0,749	0,412	0,601	0,250	0,588	0,454	0,666	0,459	0,526	31
F4.12	3,650	3,727	5,231	0,170	0,326	0,395	0,829	0,673	0,605	0,376	0,425	0,452	0,418	49
F5.1	4,682	3,866	4,020	0,414	0,355	0,111	0,585	0,644	0,888	0,460	0,436	0,360	0,419	48
F5.2	5,501	5,618	6,345	0,607	0,721	0,655	0,392	0,278	0,344	0,560	0,642	0,592	0,598	21
F5.3	5,501	3,727	6,602	0,607	0,326	0,715	0,392	0,673	0,284	0,560	0,425	0,637	0,541	27
F5.4	4,617	4,919	6,118	0,399	0,575	0,602	0,601	0,424	0,397	0,454	0,540	0,557	0,517	36
F5.5	2,930	3,898	3,866	0,000	0,361	0,075	1,000	0,638	0,924	0,333	0,439	0,350	0,374	53
F5.6	4,477	6,118	4,789	0,365	0,826	0,291	0,634	0,173	0,708	0,440	0,742	0,413	0,532	29
F6.1	4,919	3,471	6,721	0,470	0,272	0,743	0,529	0,727	0,256	0,485	0,407	0,661	0,518	35
F6.2	3,554	3,519	6,284	0,147	0,282	0,641	0,852	0,717	0,358	0,369	0,410	0,582	0,454	42
F6.3	4,617	6,093	4,128	0,399	0,821	0,136	0,601	0,179	0,863	0,454	0,736	0,366	0,519	34
F6.4	6,517	6,672	5,524	0,848	0,942	0,463	0,151	0,057	0,536	0,767	0,896	0,482	0,715	4
F6.5	6,628	6,759	6,093	0,874	0,960	0,596	0,125	0,039	0,403	0,799	0,926	0,553	0,759	3
F6.6	3,322	4,663	4,617	0,092	0,521	0,251	0,907	0,478	0,748	0,355	0,511	0,400	0,422	46
F6.7	5,578	3,727	6,759	0,626	0,326	0,752	0,374	0,673	0,247	0,572	0,425	0,669	0,555	25
F6.8	5,720	3,958	7,159	0,659	0,374	0,846	0,340	0,625	0,153	0,595	0,444	0,765	0,601	19
Мин	2,930	2,168	3,545	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	–	–	–	–	–
Макс	7,159	6,948	7,815	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	–	–	–	–	–

Результаты ранжирования факторов устойчивости цепей поставок представлены на **рис. 3**. Факторы обозначены номерами (F1.1-F6.8) в соответствии с **рис. 2** и цветами, которые соответствуют элементам цепи поставок: голубой – входной; красный – перерабатывающий; зелёный – накопительный; оранжевый – транспортный; синий – выходной; жёлтый – управляющий.

Ранжирование факторов производится в порядке уменьшения значений серых реляционных оценок δ_i . Фактор с наибольшим значением серой реляционной оценки будет считаться наиболее значимым, то есть его значение будет наиболее близким к эталонному значению по всем критериям.



а



б

Рис. 3. Результаты ранжирования факторов устойчивости цепей поставок: а – по элементам цепи поставок; б – в порядке убывания рангов

Fig. 3. The ranking of the supply chain sustainability factors: а is by supply chain elements; б is in a descending order of ranks

Полученные результаты оценки разработанной универсальной системы факторов устойчивости цепей поставок с использованием серого реляционного анализа показывают, что:

- тремя наиболее значимыми факторами, обладающими наибольшими значениями серой реляционной оценки по результатам GRA, являются: F2.5 «Экологически чистые производственные технологии» (значение серой относительной оценки $\delta_{2,5} = 0,801$; ранг №1); F3.6 «Соответствие транспортных средств законодательным нормам» ($\delta_{3,6} = 0,768$; ранг №2); F6.5 «Интеллектуальные транспортные системы» ($\delta_{6,5} = 0,759$; ранг №3). Наименее значимыми: F1.4 «Экологически дружественные поставщики» ($\delta_{1,4} = 0,385$; ранг №52); F5.5 «Экомаркировка (готовая продукция)» ($\delta_{5,5} = 0,374$; ранг №53); F1.7 «Экомаркировка (сырье и материалы)» ($\delta_{1,7} = 0,354$; ранг №54). Максимальное, среднее и минимальное значение серой относительной оценки δ_i составляют соответственно 0,8109; 0,5522; 0,3549. Максимальное значение дисперсии, равное 0,013, наблюдается у одного фактора – F2.5. Минимальное значение дисперсии у нескольких факторов: F2.6; F2.7; F3.2; F4.7; F5.3; F5.6; F6.7. Незначительные расхождения отклонений по цепи поставок в целом, с одной стороны, и существенное различие рангов внутри элементов, с другой, говорят о необходимости комплексной оценки устойчивости цепи поставок с учётом значимости отдельных элементов цепи поставок;

- наивысший/наименьший ранги по элементам цепи поставок распределились следующим образом: входной (5/54); перерабатывающий (1/44); накопительный (2/51); транспортный (7/49); выходной (21/53); (3/46). Такие результаты свидетельствуют о неравномерности влияния факторов как по отдельным элементам (рис. 3, а), так и по цепи поставок в целом (рис. 3, б);

- наиболее важными являются группы факторов, оказывающие влияние на устойчивость перерабатывающего (среднее значение реляционной оценки – 0,595), транспортного (0,579) и управляющего (0,568) элементов цепи поставок. Наименьшее влияние – у групп факторов, относящихся к накопительному, входному и выходному элементам (среднее значение серой реляционной оценки соответственно 0,533; 0,515 и 0,497).

Полученные результаты оценки системы факторов устойчивости цепей поставок и степени их влияния на элементы цепей являются основой формирования программ реализации методов и инструментов «зелёной» логистики [42]. Например, для снижения воздействия наиболее значимых факторов F2.5, F3.6 и F6.5 целесообразно использование следующих трёх методов и двенадцати инструментов «зелёной» логистики (табл. 3). Окончательное решение по выбору конкретного инструмента необходимо обосновывать с использованием многокритериальных методов принятия решений. Авторская методика такого выбора представлена в работе [39].

Таблица 3. Пример выбора методов и инструментов «зелёной» логистики по результатам оценки факторов устойчивости цепи поставок

Table 3. An example of choosing the green logistics methods and tools based on the assessment results of the supply chain sustainability factors

Фактор устойчивости цепи поставок	Метод «зелёной» логистики	Инструменты «зелёной» логистики [42]
Экологически чистые производственные технологии (F2.5)	Использование экологически приемлемого оборудования и технологий	– использование энерго- и ресурсосберегающего оборудования и технологий – использование оборудования с минимальным воздействием на окружающую среду – использование систем охраны окружающей среды – максимальное использование сырьевых компонентов с целью минимизации отходов производства
Соответствие транспортных средств законодательным нормам (F3.6)	Выбор экологически чистых транспортных средств	– использование транспортных средств с наименьшим воздействием на окружающую среду – выбор транспортных средств, соответствующих установленным требованиям в области экологии – выбор транспортных средств с большей грузоподъёмностью (грузовместимостью) – использование экологичных горюче-смазочных материалов (видов топлива)
Интеллектуальные транспортные системы (F6.5)	Разработка и внедрение интеллектуальных транспортных систем	– использование методов Data Mining – использование методов и моделей искусственного интеллекта – методы ситуационного управления транспортными потоками и транспортными средствами – внедрение новейших информационных технологий

Заключение

Предложена универсальная система факторов устойчивости цепей поставок и разработана методика оценки и ранжирования степени влияния этих факторов на основе серого реляционно-го анализа. Реализация методики позволяет производить выбор методов и инструментов устойчивого развития цепей поставок для достижения баланса социальных, экологических и экономических показателей их функционирования.

Оценка 54-х факторов предлагаемой системы показала, что наиболее значимыми факторами являются «Экологически чистые производственные технологии», «Соответствие транспортных средств законодательным нормам» и «Интеллектуальные транспортные системы». Наименее значимые факторы – «Экологически дружелюбные поставщики», «Экомаркировка (готовая продукция)» и «Экомаркировка (сырье и материалы)». Наиболее значимыми для повышения устойчивости элементами цепи поставок, выполняющих функции по повышению устойчивости, являются перерабатывающий, транспортный и управляющий элементы.

Значения оценок универсальной системы факторов зависят от типа и структуры конкретной цепи поставок. Кроме того, на оценки факторов оказывает влияние структура экспертной группы. В настоящем исследовании экспертная группа состояла из академических экспертов, что предполагает получение максимально объективных оценок. Однако конкретные цепи или их отдельные элементы могут функционировать в условиях преобладания определённых социально-экономических, климатических или геополитических условий. В таком случае рекомендуются в состав экспертов включать специалистов в соответствующих областях для обеспечения выбора наиболее эффективных методов и инструментов «зелёной» логистики для достижения устойчивости цепи поставок.

В будущих исследованиях авторы планируют использование в качестве шкалы оценки интервальных или нечётких чисел для повышения точности оценки в условиях недостатка или неопределённости информации. Кроме того, нами предусмотрены исследования различных комбинаций GRA с методами многокритериального анализа для выбора наиболее эффективных методов и инструментов «зелёной» логистики.

Список источников

1. An evaluation of the environmental factors for supply chain strategy decisions using grey systems and composite indicators / J.-J. Alfaro-Saiz, M.C. Bas, V. Giner-Bosch [and etc.] // *Applied Mathematical Modelling*. 2020, vol. 79, pp. 490-505. DOI: 10.1016/j.apm.2019.10.048.
2. Guterres A. Carbon neutrality by 2050: the world's most urgent mission. URL: <https://www.un.org/sg/en/content/sg/articles/2020-12-11/carbon-neutrality-2050-the-world%E2%80%99s-most-urgent-mission> (дата обращения 28.05.2023).
3. Overcoming barriers to supply chain decarbonization: Case studies of first movers / A. Zhang, M.F. Alvi, Y. Gong, J.X. Wang // *Resources, Conservation and Recycling*. 2022, vol. 186, p. 106536. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106536.
4. Evaluating factors in implementation of successful green supply chain management using DEMATEL: A case study / S. Gandhi, S.K. Mangla, P. Kumar, D. Kumar // *International Strategic Management Review*. 2015, vol. 3, no. 1-2, pp. 96-109. DOI: 10.1016/j.ism.2015.05.001.
5. A state-of-the-art review and meta-analysis on sustainable supply chain management: Future research directions / S.A. Rehman Khan, Z. Yu, H. Golpira [and etc.] // *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 278, p. 123357. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123357.
6. Lazar S., Klimecka-Tatar D., Obrecht M. Sustainability orientation and focus in logistics and supply chains // *Sustainability*. 2021, vol. 13, no. 6, p. 3280. DOI: 10.3390/su13063280.
7. Meerow S., Newell J.P. Urban resilience for whom, what, when, where, and why? // *Urban Geography*. 2019, vol. 40, no. 3, pp. 309-329. DOI: 10.1080/02723638.2016.1206395.
8. Supply chain resilience initiatives and strategies: A systematic review / T. Rahman, S.K. Paul, N. Shukla [and etc.] // *Computers & Industrial Engineering*. 2022, vol. 170, p. 108317. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108317.
9. Ahi P., Searcy C. An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains // *Journal of Cleaner Production*. 2013, vol. 52, pp. 329-341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.02.018.
10. Anand K.R., Ramalingaiah, Parthiban P. Evaluation of green supply chain factors using DEMATEL // *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 592-594, pp. 2619-2627. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.2619.
11. George J., Pillai V.M. A study of factors affecting supply chain performance // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1355, no. 1, p. 12018. DOI: 10.1088/1742-6596/1355/1/012018.
12. Pimenta H.C., Ball P.D. Analysis of environmental sustainability practices across upstream supply chain management // *Procedia CIRP*. 2015, vol. 26, pp. 677-682. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.036.

13. Chakraborty A., Al Amin M., Baldacci R. Analysis of internal factors of green supply chain management: An interpretive structural modeling approach // *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2023, vol. 7, p. 100099. DOI: 10.1016/j.clscn.2023.100099.
14. Sureeyatanapas P., Poophiukhok P., Pathumnakul S. Green initiatives for logistics service providers: An investigation of antecedent factors and the contributions to corporate goals // *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 191, pp. 1-14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.206.
15. Diabat A., Govindan K. An analysis of the drivers affecting the implementation of green supply chain management // *Resources, Conservation and Recycling*. 2011, vol. 55, no. 6, pp. 659-667. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.12.002.
16. Khan S., Chaabane A. A., Dweiri F.T. Multi-criteria decision-making methods application in supply chain management: A systematic literature review // *Multi-criteria methods and techniques applied to supply chain management*. Ed. V. Salomon, IntechOpen: 2018, pp. 3-31. DOI: 10.5772/intechopen.74067.
17. Wiśniewski T., Tundys B. Comparative analysis of sustainability factors in supply chain links. Evidence of empirical research // *Procedia Computer Science*. 2022, vol. 207, pp. 3358-3366. DOI: 10.1016/j.procs.2022.09.394.
18. Behavioral factors on the adoption of sustainable supply chain practices / A. Kumar, M.A. Moktadir, S.A.R. Khan [and etc.] // *Resources, Conservation and Recycling*. 2020, vol. 158, no. 2, p. 104818. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104818.
19. Nilsson F., Göransson M. Critical factors for the realization of sustainable supply chain innovations: Model development based on a systematic literature review // *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 296, p. 126471. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126471.
20. Critical success factors of sustainable supply chain management and organizational performance: An exploratory study / D.S. Prasad, R.P. Pradhan, K. Gaurav, A.K. Sabat // *Transportation Research Procedia*. 2020, vol. 48, pp. 327-344. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.027.
21. Analyzing supply chain risk factors in the small and medium enterprises under fuzzy environment: Implications towards sustainability for emerging economies / C.L. Karmaker, R.A. Aziz, T. Palit, A.B.M. Maniul Bari // *Sustainable Technology and Entrepreneurship*. 2023, vol. 2, no. 1, p. 100032. DOI: 10.1016/j.stae.2022.100032.
22. Prioritising visibility influencing factors in supply chains for resilience / F. Sunmola, P. Burgess, A. Tan [and etc.] // *Procedia Computer Science*. 2023, vol. 217, pp. 1589-1598. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.359.
23. Apeji U.D., Sunmola F. Principles and factors influencing visibility in sustainable supply chains // *Procedia Computer Science*. 2022, vol. 200, pp. 1516-1527. DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.353.
24. The ABCDE of supply chain visibility: A systematic literature review and framework / R. Kalaiarasan, J. Olhager, T.K. Agrawal, M. Wiktorsson // *International Journal of Production Economics*. 2022, vol. 248, p. 108464. DOI: 10.1016/j.ijpe.2022.108464.
25. Pradeep C.C. Assessment and analysis of GSCM barriers using AHP // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017, vol. 4, no. 6, pp. 1777-1782.
26. Govindan K., Bouzon M. From a literature review to a multi-perspective framework for reverse logistics barriers and drivers // *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 187, pp. 318-337. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.040.
27. Lamba N., Thareja P. Modelling of barriers pertaining to implementation of green supply chain management using ISM approach // *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 43, pp. 9-16. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.488.
28. Minguito G., Banluta J. Risk management in humanitarian supply chain based on FMEA and grey relational analysis // *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023, vol. 87, Part B, p. 101551. DOI: 10.1016/j.seps.2023.101551.
29. Phate M., Toney S., Phate V. Optimistic implementation of supply chain management in small & medium enterprise: Approach using Grey Relational Analysis (GRA) // *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*. 2021, vol. 32, no. 1, pp. 65-77. DOI: 10.22068/ijiepr.32.1.65.
30. Sharma Y. K., Sharma S. IT success factors in sustainable food supply chain management // *Materials Today: Proceedings*. 2022, vol. 56, Part 1, pp. 43-45. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.597.
31. Fan L., Yi H. The influence factors analysis on response speed of agile supply chain // *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 472-475, pp. 3269-3272. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.472-475.3269.
32. Ju-Long D. Control problems of grey systems // *Systems & Control Letters*. 1982, vol. 1, no. 5, pp. 288-294. DOI: 10.1016/S0167-6911(82)80025-X.
33. Liu S., Lin Y. *Grey Information*. London: Springer-Verlag, 2006, 508 p. DOI: 10.1007/1-84628-342-6.
34. Cao X., Deng H., Lan W. Use of the grey relational analysis method to determine the important environmental factors that affect the atmospheric corrosion of Q235 carbon steel // *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 2015, vol. 62, no. 1, pp. 7-12. DOI: 10.1108/ACMM-10-2013-1308.
35. Javed S.A., Gunasekaran A., Mahmoudi A. DGRA: Multi-sourcing and supplier classification through Dynamic Grey Relational Analysis method // *Computers & Industrial Engineering*. 2022, vol. 173, p. 108674. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108674.
36. Zardari N. H., Ahmed K., Shirazi S. M., Yusop Z. B. Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management. Cham: Springer International

- Publishing, 2015. 166 p. DOI: 10.1007/978-3-319-12586-2.
 37. Корнилов С., Рахмангулов А., Шаульский Б. Основы логистики. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. 302 с.
 38. Осинцев Н. Концепция системы управления логистическими потоками в «зелёных» цепях поставок // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2020. №2. С. 81-92. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-2-81-92.
 39. Осинцев Н. Многокритериальные методы принятия решений в «зелёной» логистике // Мир транспорта. 2021. № 5. С. 105-114. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-5-13.
 40. Осинцев Н.А., Казармщицкова Е.В. Факторы устойчивого развития транспортно-логистических систем // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2017. Т. 7. № 1. С. 13-21. DOI: 10.18503/2222-9396-2017-7-1-13-21.
 41. Osintsev N., Rakhmangulov A., Baginova V. Evaluation of logistic flows in green supply chains based on the combined DEMATEL-ANP method // Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 473-498. 10.22190/FUME210505061O
 42. Green logistics: a system of methods and instruments – Part 2 / A. Rakhmangulov, A. Sladkowski, N. Osintsev, D. Muravev // Nase More. 2018, vol. 65, no. 1, pp. 49-55. DOI: 10.17818/NM/2018/1.7.
- ### References
1. Alfaro-Saiz J.-J., Bas M.C., Giner-Bosch V. et al. An evaluation of the environmental factors for supply chain strategy decisions using grey systems and composite indicators. *Applied Mathematical Modelling*. 2020;79:490-505. DOI: 10.1016/j.apm.2019.10.048
 2. Guterres A. Carbon neutrality by 2050: the world's most urgent mission. Available at: <https://www.un.org/sg/en/content/sg/articles/2020-12-11/carbon-neutrality-2050-the-world%E2%80%99s-most-urgent-mission> (Accessed on May 28, 2023).
 3. Zhang A., Alvi M.F., Gong Y., Wang J.X. Overcoming barriers to supply chain decarbonization: Case studies of first movers. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022;186:106536. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106536
 4. Gandhi S., Mangla S.K., Kumar P., Kumar D. Evaluating factors in implementation of successful green supply chain management using DEMATEL: A case study. *International Strategic Management Review*. 2015;3(1-2):96-109. DOI: 10.1016/j.ism.2015.05.001
 5. Rehman Khan S.A., Yu Z., Golpira H. et al. A state-of-the-art review and meta-analysis on sustainable supply chain management: Future research directions. *Journal of Cleaner Production*. 2021;278:123357. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123357
 6. Lazar S., Klimecka-Tatar D., Obrecht M. Sustainability orientation and focus in logistics and supply chains. *Sustainability*. 2021;13(6):3280. DOI: 10.3390/su13063280
 7. Meerow S., Newell J.P. Urban resilience for whom, what, when, where, and why? *Urban Geography*. 2019;40(3):309-329. DOI: 10.1080/02723638.2016.1206395
 8. Rahman T., Paul S.K., Shukla N. et al. Supply chain resilience initiatives and strategies: A systematic review. *Computers & Industrial Engineering*. 2022;170:108317. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108317
 9. Ahi P., Searcy C. An analysis of metrics used to measure performance in green and sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*. 2013;52:329-341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.02.018
 10. Anand K.R., Ramalingaiah, Parthiban P. Evaluation of green supply chain factors using DEMATEL. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;592-594:2619-2627. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592-594.2619
 11. George J., Pillai V.M. A study of factors affecting supply chain performance. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1355(1):12018. DOI: 10.1088/1742-6596/1355/1/012018
 12. Pimenta H.C., Ball P.D. Analysis of environmental sustainability practices across upstream supply chain management. *Procedia CIRP*. 2015;26:677-682. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.036
 13. Chakraborty A., Al Amin M., Baldacci R. Analysis of internal factors of green supply chain management: An interpretive structural modeling approach. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2023;7:100099. DOI: 10.1016/j.clscn.2023.100099
 14. Sureeyatanapas P., Poophiukhok P., Pathumnakul S. Green initiatives for logistics service providers: An investigation of antecedent factors and the contributions to corporate goals. *Journal of Cleaner Production*. 2018;191:1-14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.206
 15. Diabat A., Govindan K. An analysis of the drivers affecting the implementation of green supply chain management. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011;55(6):659-667. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.12.002
 16. Khan S., Chaabane A.A., Dweiri F.T. Multi-criteria decision-making methods application in supply chain management: A systematic literature review. Multi-criteria methods and techniques applied to supply chain management. Ed. V. Salomon, IntechOpen: 2018:3-31. DOI: 10.5772/intechopen.74067
 17. Wiśniewski T., Tundys B. Comparative analysis of sustainability factors in supply chain links. Evidence of empirical research. *Procedia Computer Science*. 2022;207:3358-3366. DOI: 10.1016/j.procs.2022.09.394
 18. Kumar A., Moktadir M.A., Khan S.A.R. et al. Behavioral factors on the adoption of sustainable supply chain practices. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020;158(2):104818. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104818

19. Nilsson F., Göransson M. Critical factors for the realization of sustainable supply chain innovations: Model development based on a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*. 2021;296:126471. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126471
20. Prasad D.S., Pradhan R.P., Gaurav K., Sabat A.K. Critical success factors of sustainable supply chain management and organizational performance: An exploratory study. *Transportation Research Procedia*. 2020;48:327-344. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.027
21. Karmaker C.L., Aziz R.A., Palit T., Maniul Bari A.B.M. Analyzing supply chain risk factors in the small and medium enterprises under fuzzy environment: Implications towards sustainability for emerging economies. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*. 2023;2(1):100032. DOI: 10.1016/j.stae.2022.100032
22. Sunmola F., Burgess P., Tan A. et al. Prioritising visibility influencing factors in supply chains for resilience. *Procedia Computer Science*. 2023;217:1589-1598. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.359
23. Apeji U.D., Sunmola F. Principles and factors influencing visibility in sustainable supply chains. *Procedia Computer Science*. 2022;200:1516-1527. DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.353
24. Kalaiarasan R., Olhager J., Agrawal T.K., Wiktorsson M. The ABCDE of supply chain visibility: A systematic literature review and framework. *International Journal of Production Economics*. 2022;248:108464. DOI: 10.1016/j.ijpe.2022.108464
25. Pradeep C.C. Assessment and analysis of GSCM barriers using AHP. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017;4(6):1777-1782.
26. Govindan K., Bouzon M. From a literature review to a multi-perspective framework for reverse logistics barriers and drivers. *Journal of Cleaner Production*. 2018;187:318-337. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.040
27. Lamba N., Thareja P. Modelling of barriers pertaining to implementation of green supply chain management using ISM approach. *Materials Today: Proceedings*. 2021;43:9-16. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.488
28. Minguito G., Banluta J. Risk management in humanitarian supply chain based on FMEA and grey relational analysis. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023;87(Part B):101551. DOI: 10.1016/j.seps.2023.101551
29. Phate M., Toney S., Phate V. Optimistic implementation of supply chain management in small & medium enterprise: Approach using grey relational analysis (GRA). *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*. 2021;32(1):65-77. DOI: 10.22068/ijiepr.32.1.65
30. Sharma Y.K., Sharma S. IT success factors in sustainable food supply chain management. *Materials Today: Proceedings*. 2022;56(Part 1):43-45. DOI: 10.1016/j.matpr. 2021.11.597
31. Fan L., Yi H. The influence factors analysis on response speed of agile supply chain. *Advanced Materials Research*. 2012;472-475:3269-3272. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.472-475.3269
32. Ju-Long D. Control problems of grey systems. *Systems & Control Letters*. 1982;1(5):288-294. DOI: 10.1016/S0167-6911(82)80025-X
33. Liu S., Lin Y. *Grey information*. London: Springer-Verlag, 2006, 508 p. DOI: 10.1007/1-84628-342-6
34. Cao X., Deng H., Lan W. Use of the grey relational analysis method to determine the important environmental factors that affect the atmospheric corrosion of Q235 carbon steel. *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 2015;62(1):7-12. DOI: 10.1108/ACMM-10-2013-1308
35. Javed S.A., Gunasekaran A., Mahmoudi A. DGRA: Multi-sourcing and supplier classification through Dynamic Grey Relational Analysis method. *Computers & Industrial Engineering*. 2022;173:108674. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108674
36. Zardari N.H., Ahmed K., Shirazi S.M., Yusop Z.B. Weighting methods and their effects on multi-criteria decision making model outcomes in water resources management. Cham: Springer International Publishing, 2015. 166 p. DOI:10.1007/978-3-319-12586-2
37. Kornilov S.N., Rakhmangulov A.N., Shaulskii B.F. *Osnovy logistiki* [Basics of logistics]. Moscow: Training and Methodology Centre for Railway Transport, 2016, 302 p. (In Russ.)
38. Osintsev N. A concept of the management system of logistic flows in "green" supply chains. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Herald of Ural State University of Railway Transport]. 2020;(2):81-92. (In Russ.) DOI: 10.20291/2079-0392-2020-2-81-92
39. Osintsev N. Multi-criteria decision-making methods in green logistics. *Mir transporta* [World of Transport and Transportation]. 2021;(5):105-114. (In Russ.) DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-5-13
40. Osintsev N.A., Kazarmshchikova E.V. Factors of sustainable development of transport and logistics systems. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern Problems of Russian Transport Complex]. 2017;7(1):13-21. (In Russ.) DOI: 10.18503/2222-9396-2017-7-1-13-21
41. Osintsev N., Rakhmangulov A., Baginova V. Evaluation of logistic flows in green supply chains based on the combined DEMATEL-ANP method. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. 2021;19(3):473-498. DOI: 10.22190/FUME2105050610
42. Rakhmangulov A., Sladkowski A., Osintsev N., Muravev D. Green logistics: a system of methods and instruments – Part 2. *Naše More*. 2018;65(1):49-55. DOI: 10.17818/NM/2018/1.7

Поступила 16.07.2023; принята к публикации 24.08.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 16/07/2023; revised 24/08/2023; published 25/09/2023

Осинцев Никита Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и управления транспортными системами, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: osintsev@magtu.ru. ORCID 0000-0003-1168-6725

Рахмангулов Александр Нельевич – доктор технических наук, профессор кафедры логистики и управления транспортными системами, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: ran@magtu.ru. ORCID 0000-0001-7862-4743

Nikita A. Osintsev – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Logistics and Transportation Systems Management, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: osintsev@magtu.ru. ORCID 0000-0003-1168-6725

Aleksandr N. Rakhmangulov – DrSc (Eng.), Professor, Department of Logistics and Transportation Systems Management, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ran@magtu.ru. ORCID 0000-0001-7862-4743