

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2025. Т.23, №4

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

Издается с марта 2003 года

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольников (Россия)

Т.Н. Александрова (Россия), Ж.-Б. Вогт (Франция),
С.Е. Гавришев (Россия), О.Е. Горлова (Россия),
В.Е. Громов (Россия), Я. Грум (Словения),
И.Г. Гун (Россия), М. Дабала (Италия),
Х. 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), О.Н. Тулупов (Россия),
Ю Фенг (Китай), В.Р. Храмшин (Россия), Р. Цин (Великобритания)

РЕДАКЦИЯ

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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2025

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

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

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

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

Адрес редакции:

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

Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии
Выход в свет 25.12.2025. Заказ 383. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2025. Vol.23, no.4

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

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

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

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

Deputy Chief Editors:

A.G. Korchunov, O.S. Logunova,

V.R. Khramshin, N.N. Orekhova

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor T.V. Leontyeva

Translated into English A.R. Karaguzhina

The cover is designed by A.D. Grigorev

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2025

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

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

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

Editorial office:

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

Publisher office:

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

Printing office:

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

Publication date: 25.12.2025. Order 383. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ	5
<i>Чебан А.Ю.</i>	
Повышение эффективности освоения маломасштабных месторождений путем снижения потерь золота при промывке песков	5
<i>Калмыков В.Н., Мажитов А.М., Кравчук Т.С., Зотеев О.В.</i>	
Геомеханическая оценка устойчивости бортов карьера при подземной отработке барьерных целиков	14
ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ	23
<i>Сидельников С.Б., Загиров Н.Н., Иванов Е.В., Чукин М.В., Безруких А.И., Лопатина Е.С.</i>	
Исследование технологии получения проволоки из стружковых отходов алюминиевого сплава 1580 для использования в аддитивном производстве	23
<i>Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Субботин А.Ю., Титов А.В.</i>	
Использование измельчённых отходов силиконовых резин в качестве разупрочняющей добавки для жидкостекольных стержневых смесей теплового отверждения	31
<i>Копьёва М.А., Остапенко М.С., Тверяков А.М.</i>	
Влияние материала электродов на качество процесса водоочистки	40
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	48
<i>Горбунова В.С., Выдрин А.В.</i>	
Экспериментальное исследование процесса холодной несимметричной прокатки тонких полос из труднодеформируемых сплавов	48
<i>Харитонов В.А., Песин А.М., Усанов М.Ю., Локотунина Н.М., Мелихов Е.Д.</i>	
Применение совмещенного способа «асимметричная прокатка - волочение в монолитной волоке» при производстве проволоки с мелкозернистой структурой	54
<i>Глинских П.И., Замараева Ю.В., Яковлев С.И., Завалий Е.А.</i>	
Определение оптимальных режимов горячей прокатки плит из алюминиевого сплава АК4-1ч	61
<i>Никитина М.А., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Песин И.А., Барышникова А.М., Носов Л.В.</i>	
Влияние скоростной асимметрии на технологическую пластичность при прокатке сплава системы алюминий-магний-скандий	71
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ..	80
<i>Артамонов Е.В., Штин А.С., Тверяков А.М., Василега Д.С.</i>	
Исследование взаимосвязи свойств инструментальных материалов с процессом резания на примере токарной обработки стали 12Х18Н10Т	80
<i>Колодяжный Д.Ю., Черкашин С.О., Вороненко В.П.</i>	
Получение требуемого параметра точности формы тонких длинных деталей из стали 08Х15Н5Д2Т при последовательной обработке посредством подбора параметров режимов резания и термической обработки	87

CONTENTS

SUBSOIL USE	5
<i>Cheban A.Yu.</i>	
Increasing the Efficiency of Small-Scale Deposits Development by Reducing Gold Losses During Sand Washing	5
<i>Kalmykov V.N., Mazhitov A.M., Kravchuk T.S., Zoteev O.V.</i>	
Geomechanical Assessment of the Stability of Quarry Sides During Underground Mining of Barrier Pillars	14
RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE	23
<i>Sidelnikov S.B., Zagirov N.N., Ivanov E.V., Chukin M.V., Bezrukikh A.I., Lopatina E.S.</i>	
Research on the Technology for Producing Wire from Aluminum 1580 Alloy Chip Waste for Use in Additive Manufacturing	23
<i>Leushin I.O., Vakhidov U.Sh., Subbotin A.Yu., Titov A.V.</i>	
Using Crushed Silicone Rubber Waste as a Softening Additive for Liquid Glass Core Mixtures of Heat-Curing	31
<i>Kopyova M.A., Ostapenko M.S., Tveryakov A.M.</i>	
Influence of Electrode Materials on the Quality of the Water Treatment Process	40
METAL FORMING	48
<i>Gorbunova V.S., Vydrin A.V.</i>	
Experimental Research of the Process of Cold Asymmetric Rolling of Thin Strips of Difficult-To-Form Alloys	48
<i>Kharitonov V.A., Pesin A.M., Usanov M.Yu., Lokotunina N.M., Melikhov E.D.</i>	
Application of the Combined Method "Asymmetric Rolling - Drawing in a Monolithic Die" in the Production of Wire with Fine-Grained Structure	54
<i>Glinskikh P.I., Zamaraeva Yu.V., Yakovlev S.I., Zavaliy E.A.</i>	
Determination of the Optimal Modes for Hot Rolling of AK4-1Ch Aluminum Alloy Plates	61
<i>Nikitina M.A., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Pesin I.A., Baryshnikova A.M., Nosov L.V.</i>	
The Effect of the Speed Asymmetry on Technological Plasticity of the Aluminum-Magnesium-Scandium System Alloy During Rolling	71
MATERIAL PROCESS ENGINEERING	80
<i>Artamonov E.V., Shtin A.S., Tveryakov A.M., Vasilega D.S.</i>	
Research on the Relationship Between Tool Material Properties and the Cutting Process: a Case Study of Turning 12H18N10T Steel	80
<i>Kolodyazhny D.Yu., Cherkashin S.O., Voronenko V.P.</i>	
Obtaining the Required Shape Accuracy Parameter for Thin Long Parts Made of 08H15N5D2T Steel During Sequential Processing by Selecting the Parameters of Cutting Modes and Heat Treatment	87

Колчин П.В., Костылев К.А., Чернигин М.А. Оценка ударной вязкости, хладостойкости и структуры углеродистой стали 20, армированной сталью 12Х18Н10Т методом лазерной наплавки 94	94
Гулин А.Е., Линьков С.А., Шеметов А.Н., Кувшинов Д.А., Ефимов С.В. Расчет аддитивных электромагнитных свойств дисперсно-наполненных магнитомягких композиционных материалов для перспективных электродвигателей..... 102	102
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ..... 110	110
Панченко И.А., Дробышев В.К., Лабунский Д.Н., Коновалов С.В. Исследование влияния электронно-пучкового и ионно-плазменного воздействия на прочностные характеристики сплава АА7075 110	110
НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ 119	119
Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г., Романов Н.К. Получение высокодисперсной микро- и наноцеллюлозы методом осаждения из медно-аммиачного раствора 119	119
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА 129	129
Аронов И.З., Рыбакова А.М., Иванов А.В. Валоризация знаний с применением инструментов стандартизации: современное состояние 129	129
Столяров Ф.А., Гун И.Г., Полякова М.А. Практическое применение методов опережающей стандартизации для снижения уровня дефектности в эксплуатации на примере шаровых шарниров 139	139
Пантюхина Е.В., Богодыж А.Е., Васин С.А., Бахно А.Л. Методология обеспечения качества изделий в форме копачка, близких к равноразмерным, при автоматизации процессов загрузки 147	147
Антипов Д.В., Загидуллин Р.С. Структурно-функциональная модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства 156	156
Ивахненко А.Г., Аникеева О.В., Исламова О.В., Разумова А.И. Анализ стратегий функционирования системы метрологического обеспечения предприятий 168	168
Ермаков С.Б. Выбор материала и обеспечение качества вентиляторов из полимерных композиционных материалов для климатических условий Арктического и Субарктического регионов 175	175
ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ.. 186	186
Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжеев С.С., Буланов М.В. Исследование усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами установки ковш-печь 186	186

Kolchin P.V., Kostylev K.A., Chernigin M.A. Assessment of Impact Toughness, Cold Resistance and Structure of Carbon Steel 20, Reinforced with 12Cr18Ni10Ti Steel by Laser Cladding Method94	94
Gulin A.E., Linkov S.A., Shemetov A.N., Kuvshinov D.A., Efimov S.V. Calculation of Additive Electromagnetic Properties of Soft Magnetic Dispersed-Filled Composite Materials for Advanced Electric Motors 102	102
MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS.....110	110
Panchenko I.A., Drobyshev V.K., Labunskiy D.N., Konovalov S.V. Studying the Effect of Electron Beam and Ion Plasma Treatment on the Strength Characteristics of AA7075 Alloy 110	110
NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES.119	119
Lukuttsova N.P., Karpikov E.G., Romanov N.K. Obtaining Highly Dispersed Micro- and Nanocellulose from Copper-Ammonia Solution by Precipitation..... 119	119
PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT129	129
Aronov I.Z., Rybakova A.M., Ivanov A.V. Valorization of Knowledge Using Standardization Tools: Current State 129	129
Stolyarov F.A., Gun I.G., Polyakova M.A. Practical Application of Advanced Standardization Methods to Reduce the Defect Level in Operation Using the Example of Ball Joint..... 139	139
Pantyukhina E.V., Bogodyazh A.E., Vasin S.A., Bakhno A.L. Methodology for Ensuring the Quality of Cap-Shaped Products Close to Equidimensional During the Automation of Feeding Processes 147	147
Antipov D.V., Zagidullin R.S. Structural and Functional Model of Quality Assurance of Aerospace Engineering in Conditions of Additive Manufacturing 156	156
Ivakhnenko A.G., Anikeeva O.V., Islamova O.V., Razumova A.I. Analysis of Strategies for Functioning of the Metrological Support System of Enterprises 169	169
Ermakov S.B. Material Selection and Quality Assurance of Fans Made of Polymer Composite Materials for the Climatic Conditions of the Arctic and Subarctic Regions 175	175
METALLURGICAL POWER ENGINEERING, ENERGY SAVING AND ELECTRICAL SYSTEMS.....186	186
Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ryzhevol S.S., Bulanov M.V. Study of an Improved Algorithm for Automatic Control of Electrical Modes of a Ladle Furnace Unit 186	186



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВОЕНИЯ МАЛОМАСШТАБНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЗОЛОТА ПРИ ПРОМЫВКЕ ПЕСКОВ

Чебан А.Ю.

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

Аннотация. Актуальность исследования. Сравнительно невысокие капитальные вложения в организацию россыпной добычи золота и возможность относительно быстрой окупаемости средств позволяют работать в данной сфере значительному количеству небольших горнодобывающих предприятий. Увеличение доли мелко-го золота в песках вовлекаемых в отработку россыпей предопределяет рост потерь металла с хвостами промывки. Снизить потери металла позволяют многостадийные технологии переработки песков, но приобретение и эксплуатация специального обогащательного оборудования малыми компаниями с учетом их небольшой производительности экономически не всегда целесообразно. Уменьшить потери металла возможно за счет более частого сполоска шлюзов промывочного прибора, однако использование данного решения для переработки всего объема песков приведет к существенному увеличению простоев обогащательного оборудования. **Цель работы.** Обоснование усовершенствованной технологической схемы освоения маломасштабного россыпного месторождения золота имеющимся обогащательным оборудованием с обеспечением снижения потерь металла за счет селективной выемки и раздельной последовательной переработки разнокачественных песков продуктивного пласта. **Результаты.** В статье предлагается вести добычу песков сложноструктурного выемочного блока с применением скрепер-дозера, при этом выемка обогащенных металлом песков ведется только скреперным ковшом, а рядовых песков – скреперным ковшом и бульдозерным отвалом. Разносортные пески складываются в отдельные штабели рядом с промывочным прибором, преимущественно производится промывка рядовых песков со сполоском шлюзов один раз в сутки, по мере накопления периодически производится промывка обогащенных металлом песков со сполоском шлюзов два раза в сутки. **Выводы.** Применение предлагаемой технологической схемы позволит существенно увеличить сквозное извлечение металла при использовании имеющегося оборудования.

Ключевые слова: продуктивный пласт, оконтуривание песков, селективная выемка, скрепер-дозер, промывка, мелкое золото, извлечение металла

© Чебан А.Ю., 2025

Для цитирования

Чебан А.Ю. Повышение эффективности освоения маломасштабных месторождений путем снижения потерь золота при промывке песков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 5-13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-5-13>



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 SMALL-SCALE DEPOSITS DEVELOPMENT BY REDUCING GOLD LOSSES DURING SAND WASHING

Cheban A.Yu.

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

Abstract. Problem Statement (Relevance). Relatively low capital investments in organizing placer gold mining and the possibility of a relatively quick payback of funds allow a significant number of small mining enterprises to operate in this area. An increase in the share of fine gold in the sands involved in placer mining predetermines an increase in metal losses with rinsing tailings. Multi-stage sand processing technologies can reduce metal losses but the acquisition and operation of special enrichment equipment by small companies, given their low productivity, is not always economically feasible. It is possible to reduce metal losses by rinsing the sluices of the washing unit more frequently; however, using this solution to process the entire volume of sand will lead to a significant increase in the downtime of the enrichment equipment. **Objectives.** The research is aimed at justifying an improved technological scheme for the development of a small-scale gold placer using existing enrichment equipment, ensuring a reduction in metal losses due to selective extraction and separate sequential processing of different-quality sands of the productive formation. **Results.** The article proposes to extract sands from a complex-structured mining block using a scraper-dozer, with the extraction of metal-enriched sands being carried out only with a scraper bucket, and ordinary sands – with a scraper bucket and a bulldozer blade. Mixed-grade sands are stored in separate piles next to the washing unit; mainly, ordinary sands are washed with a sluice rinse once a day; as they accumulate, metal-enriched sands are washed periodically with a sluice rinse twice a day. **Conclusions.** The use of the proposed process flow will significantly increase the throughout recovery of metal using existing equipment.

Key words: productive formation, sand delineation, selective mining, scraper-dozer, washing, fine gold, metal recovery

For citation

Cheban A.Yu. Increasing the Efficiency of Small-Scale Deposits Development by Reducing Gold Losses During Sand Washing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 5-13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-5-13>

Введение

Россыпные месторождения многих особо ценных и стратегически важных полезных ископаемых (золото, платина, алмазы, олово, титан, редкие металлы и др.) благодаря относительно небольшой стоимости освоения (по сравнению с рудными объектами), в связи со сравнительно неглубоким залеганием продуктивных пластов, дезинтегрированному состоянию извлекаемых из недр пород и простоте процессов обогащения песков являются весьма востребованными горнодобывающей промышленностью [1-4]. Так, на крупном золотодобывающем предприятии АО «Прииск Соловьевский», где в 2023 году из россыпных и коренных месторождений было добыто более 5 т золота, на россыпи пришлось 52% добытого металла и 60% полученной прибыли [5]. Возможность быстрого вовлечения россыпных месторождений в эксплуатацию и получения промышленного продукта, с небольшими сроками окупаемости вложенных средств предопределяет их опережающее освоение.

Согласно данным [1], доля россыпей в мировой структуре запасов и добычи составляет: для титана – 33 и 70% соответственно, для ниобия – 20 и 68%, для

золота – 10,2 и 19,9%, для тантала – 4 и 15%. Относительно невысокие капитальные вложения в организацию россыпной золотодобычи позволяют работать в этой сфере значительному количеству организаций. Так, по данным за 2021 год, в России из 658 золотодобывающих предприятий 570 полностью или частично связаны с россыпями, при этом 422 из них являются небольшими артелями и компаниями с годовым объемом добычи до 100 кг [6]. В связи с активной отработкой россыпей качество минерально-сырьевой базы россыпного золота неуклонно снижается [7, 8]. Несмотря на снижение содержания золота в песках вовлекаемых в отработку месторождений, количество добываемого россыпного золота продолжает увеличиваться. Если в 2018 году в РФ из россыпей было получено 75,56 т, то в 2021 году – 82,84 т, то есть рост составил 9,6% [9].

Сохранение и увеличение добычи металла достигается прежде всего за счет ускоренного возрастания объемов перерабатываемой минеральной массы с применением все более мощного оборудования, при этом увеличение доли мелких золотин (менее 0,5 мм) в песках предопределяет рост потерь металла с хвостами промывки [10, 12]. Таким образом, на современном

этапе вопрос повышения эффективности производства за счет снижения потерь мелкого золота при разработке сложноструктурных россыпных месторождений становится все более актуальным [13, 14].

Состояние вопроса и постановка проблемы

На многих россыпных месторождениях золото в песках продуктивных пластов распределено весьма неравномерно как в плане, так и по вертикали с содержаниями от 0,04-0,05 до 3-5 г/м³, в некоторых случаях в отдельных небольших по объему особо богатых включениях содержание полезного компонента может достигать десятков граммов на кубометр. При этом основная часть продуктивного пласта представлена песками рядового качества с содержанием золота не более 0,3-0,5 г/м³. Несмотря на относительно небольшой объем, обогащенные полезным компонентом пески содержат существенную долю металла сложноструктурных месторождений [15, 16]. Так, в работе [15] указывается, что на сложноструктурных россыпях на долю обогащенных металлом включений приходится 25-40% площади и 65-80% запасов золота. Согласно исследованию [8], на месторождении Большой Кураны в 20% относительно богатых песков с содержанием золота более 0,3 г/м³ находится 62% металла россыпи.

При разработке россыпей обычно ведется валовая выемка и подача песков сложноструктурных продуктивных пластов к промывочным установкам, в результате чего минеральное сырье с различным содержанием металла промывается в одном режиме, без учета изменчивости его геолого-технологических характеристик, что отрицательно сказывается на уровне извлечения [12]. Повысить извлечение металла при промывке возможно путем применения многостадийных схем переработки песков, включающих отсадочные машины, центробежные концентраторы, винтовые сепараторы и другое оборудование [10, 17].

Так, если при использовании гидроэлеваторных шлюзовых приборов (ПГШ) потери золота крупностью менее -0,25 мм составляют до 50-70%, а металла крупностью -0,50+0,25 мм – до 30%, то при использовании в схеме отсадочных машин потери металла данных классов крупности составляют всего 10 и 5% соответственно [10]. Однако применение развитых (многостадийных) технологических схем промывки ведет к дополнительным расходам, в связи с чем многостадийная переработка всего объема минерального сырья может оказаться экономически нецелесообразной. Также необходимо отметить, что применение некоторого сложного оборудования, в частности центробежных концентраторов Knelson, требует использования относительно чистой воды и привлечения высококвалифицированного персонала [17, 18].

Очевидно, что применение сложных и затратных многостадийных схем, обеспечивающих наиболее полное извлечение металла, целесообразно прежде всего при переработке песков с повышенным содер-

жанием золота. В работах [12, 19] для освоения сложноструктурных россыпных месторождений золота предложены технологические схемы, предполагающие раздельную выемку и переработку песков с различным содержанием металла. При этом осуществляется опережающая селективная выемка богатых песков, которая ведется с применением бульдозеров или колесных скреперов небольших типоразмеров. Богатые пески, составляющие незначительную долю сложноструктурного выемочного блока, транспортируются к комплексу многостадийного обогащения, который может принимать минеральное сырье повышенного качества с нескольких добычных участков.

Выемка основного объема песков с рядовым содержанием полезного компонента ведется высокопроизводительными бульдозерами с перемещением минеральной массы на одностадийное обогащение по шлюзовой технологии. Данные схемы с применением дорогостоящего многостадийного обогащения только для богатых песков обеспечивают существенный прирост извлечения металла при небольших дополнительных затратах, поскольку предполагается, что комплекс многостадийного обогащения работает с достаточно высокой производительностью, обеспечивая переработку богатых песков с нескольких участков, это предопределяет возможность его эффективного использования на достаточно крупных предприятиях россыпной золотодобычи. Недостатком данных схем является необходимость применения на добычных работах различного оборудования относительно небольшой производительности, что усложняет организацию процесса и увеличивает себестоимость работ. Также внедрение многостадийных технологий ограничивается консерватизмом большинства недропользователей, для которых основными принципами при осуществлении добычи россыпного золота являются высокая производительность ведения работ, простота, дешевизна, низкая энерго- и водоемкость.

Необходимо отметить, что многие небольшие предприятия россыпной золотодобычи имеют на своем балансе всего один-два промывочных прибора и несколько бульдозеров. Приобретение, наладка и обслуживание оборудования для формирования схем с развитой переработкой песков для таких артелей с их ограниченными финансовыми возможностями будет затруднительна и экономически нецелесообразна. Проведенное автором исследование технического оснащения предприятий, ведущих разработку россыпных месторождений в Приамурье, показало, что из 51-й рассмотренной компании 14 имеют по одному промывочному прибору, 8 – по два, наиболее часто используются промывочные приборы типа ПГШ. Этими 22-мя предприятиями, имеющими по 1-2 промывочных прибора, суммарно добывается около 900 кг металла, при этом для каждой артели объем промываемых за сезон песков варьирует от 30 до 250 тыс. м³, объем торфов от 100 до 700 тыс. м³, количе-

ство добываемого золота от 7 до 80 кг (в среднем 30-50 кг), производительность используемых промывочных приборов составляет от 25 до 70 м³/ч. Суммарно на 22-х предприятиях задействовано 30 сверхтяжелых бульдозеров с мощностью двигателя более 300 кВт (ЧЕТРА Т35, ЧЕТРА Т25, Komatsu D-355 и др.), 41 тяжелый бульдозер с мощностью двигателя более 150 кВт (ЧЕТРА Т20, Komatsu D-155, Shantui SD-22 и др.) и 57 средних бульдозеров (Т-170, ЧЕТРА Т11, Komatsu D-65, Shantui SD-16 и др.). В небольшом количестве на данных предприятиях используются одноковшовые погрузчики и экскаваторы, а также некоторое другое оборудование.

Уменьшить затраты на ведение вскрышных и добычных работ при освоении россыпных месторождений позволяет применение нового типа выемочно-транспортирующего оборудования – бульдозерно-скреперных агрегатов (скрепер-дозеров), у которых в средней части машины между гусеницами ходовой части установлен скреперный ковш, а в передней части – бульдозерный отвал. Данный тип машин в разное время выпускался несколькими производителями: SR-280p с вместимостью ковша 8 м³ (Япония); SR-85 – ковш 8,5 м³ (Германия); Т-18 Tiger – ковш 18 м³ (Швейцария); ДЗ-194 – ковш 15 м³ (Россия) [20]. Конструкция скрепер-дозеров позволяет одновременно транспортировать породу в скреперном ковше и перед бульдозерным отвалом, в результате чего удельные энергозатраты на перемещение значительно меньше, так как около 60% перемещаемой породы находится в скреперном ковше.

Проведенные в исследовании [21] сравнительные технико-экономические расчеты работы скрепер-дозера ДЗ-194 и бульдозера ЧЕТРА Т35 (сопоставимых по массе, мощности и объему транспортируемых песков) показали, что при дальности транспортировки более 50–60 м предпочтительнее использование скрепер-дозера, в связи с чем в парк выемочно-транспортирующих машин при его формировании целесообразно наряду с бульдозерами включать и скрепер-дозеры.

Необходимо отметить, что некоторые мелкие золотодобывающие предприятия, несмотря на относительно высокое содержание золота в разрабатываемых маломасштабных россыпях, работают на грани рентабельности, это связано прежде всего с невысокой производительностью на одного работающего и значительными потерями металла при промывке [12]. Существенно снизить потери металла без приобретения нового или модернизации имеющегося обогащающего оборудования возможно за счет увеличения частоты сполоска шлюзов. В процессе промывки песков выпавшие из потока на слой разрыхленной минеральной постели крупные тяжелые зерна золота постепенно проникают на дно шлюза в соответствии с сегрегационным механизмом расслоения, а мелкие тяжелые зерна передвигаются в результате периодического взвешивания в потоке, оседания, скольжения

и опять взвешивания, они удерживаются минеральной постелью (за счет проникновения в поры минеральной постели, размер которых больше размера мелких золотин) с постепенным сегрегационным продвижением на дно шлюза. Удерживающая способность минеральной постели определяется объемом ее пор, в первоначальном состоянии пористость составляет около 40%, по мере заполнения постели тяжелыми зернами ее пористость постепенно снижается до примерно 15%, после чего она практически перестает удерживать мелкое золото.

Таким образом, при увеличении длительности интервалов между сполосками шлюзов потери металла значительно возрастают, согласно данным работы [22] при интервалах сполоска 9, 16,5 и 32 ч потери золота класса крупности -1,2+0,6 мм составляют 0,62, 3,79 и 10,6% соответственно; класса крупности -0,6+0,4 мм – 3,66, 5,04, 13,4%; -0,4+0,2 мм – 21,2, 25,3, 42,8%; а для класса крупности -0,2 мм – 24,4, 39,2 и 83,4%. В работе [23] указывается, что за первые 10-12 ч работы улавливающая способность шлюза снижается на 10-20%, а после 22 ч работы – на 50-80%, в результате чего при сполоске шлюзов один раз в сутки потери за счет сноса мелких золотин могут достигать 40-50% от объема снятого со шлюза драгметалла. В исследовании [24] выявлено, что при промывке песков на шлюзах в интервале 5-10 ч извлечение падает на 0,1-1,5% в час, а после 10 ч – на 0,4-4,2% в час, что также подтверждает прогрессирующий характер потерь металла. Таким образом, при увеличении частоты сполоска шлюзов с одного до двух раз в сутки возможно ожидать уменьшения потерь при промывке не менее чем в два раза.

Лучшие результаты по извлечению металла из песков обеспечивают схемы с частым сполоском шлюзов (2-3 раза в сутки и более), однако в связи с тем, что продолжительность каждого сполоска шлюзов составляет около 1,0-1,5 ч, это ведет к значительным простоям промприбора, а следовательно, уменьшению объема промываемых за сезон песков и количества получаемого золота. Снизить затраты времени на сполоск позволяют поворотные механические шлюзы [25], известны конструкции шлюзов с непрерывной разгрузкой концентратов, недостатками таких устройств являются более высокая сложность и стоимость, кроме того, при использовании шлюзов с непрерывной разгрузкой получается слишком бедный концентрат, что в значительной степени удорожает процессы при его последующей доводке [22].

Рациональный интервал сполоска шлюзов определяется экспериментально и зависит прежде всего от содержания металла в промываемых песках, при высоких содержаниях минеральная постель будет заполняться быстрее, при низких содержаниях – медленнее. В случае подачи на промывку песков с неконтролируемым содержанием золота и наличием в рядовых песках включений богатых песков будет происходить более быстрое заполнение минеральной

постели, в результате принятый режим сполоска не будет оптимальным и потери металла из-за переполненной минеральной постели будут выше нормативных [26].

Целью исследования является разработка усовершенствованной технологической схемы освоения маломасштабного россыпного месторождения золота имеющимся обогатительным оборудованием с обеспечением существенного снижения потерь металла за счет селективной выемки и раздельной последовательной переработки разнокачественных песков продуктивного пласта.

Результаты исследования

В Институте горного дела ДВО РАН обоснована усовершенствованная технология разработки маломасштабного сложноструктурного месторождения россыпного золота, включающая вскрытие продуктивного пласта, уточнение контуров включений песков с повышенным содержанием золота, выявленных в ходе первой стадии эксплуатационной разведки. Как показывает практика освоения россыпных месторождений, в большинстве случаев сгущение разведочной сети увеличивает количество обогащенных полезным компонентом зон при одновременном уменьшении их площади [15]. На основании уточненных данных проводится оконтуривание включений песков с повышенным содержанием металла 1 в плане и по вертикали, селективная выемка и транспортировка разнородных песков продуктивного пласта 2 осуществляется посредством скрепер-дозера 3 (см. **рисунок**).

В случае если в продуктивном пласте 2 слой песков с повышенным содержанием металла 1 покрыт песками рядового качества 4, то первоначально скре-

пер-дозером 3 производится выемка рядовых песков 4 посредством скреперного ковша 5 и бульдозерного отвала 6 с их транспортировкой в штабель 7, находящийся рядом с промывочным прибором 8, откуда одноковшовым погрузчиком 9 пески рядового качества 4 подаются на промывку, при этом сполоск шлюзов промывочного прибора 8 производится один раз в сутки.

После обнажения песков с повышенным содержанием металла 1 производится их селективная выемка скреперным ковшом 5. При движении скрепер-дозера 3 в сторону промывочного прибора 8 с заполненным скреперным ковшом 5 осуществляется выемка и перемещение рядовых песков 4 бульдозерным отвалом 6. В случае перемещения скрепер-дозером 3 разнородных песков первоначально осуществляется подача рядовых песков 4 бульдозерным отвалом 6 к штабелю 7, затем скрепер-дозер 3 перемещается к специальному штабелю 10, где из скреперного ковша 5 выгружаются пески с повышенным содержанием металла 1. В связи с тем, что в выемочном блоке преобладают пески рядового качества 4, то преимущественно осуществляется их выемка, транспортировка и промывка, с постепенным накоплением в специальном штабеле 10 минерального сырья повышенного качества, переработка которого происходит периодически (по мере накопления требуемого объема) с подачей одноковшовым погрузчиком 9 на тот же промывочный прибор 8, но со сполоском шлюзов один раз в смену (два раза в сутки). В процессе промывки песков повышенного качества скрепер-дозером 3 ведется выемка и транспортировка минерального сырья к промывочному прибору 8 из наиболее удаленных частей выемочного блока.

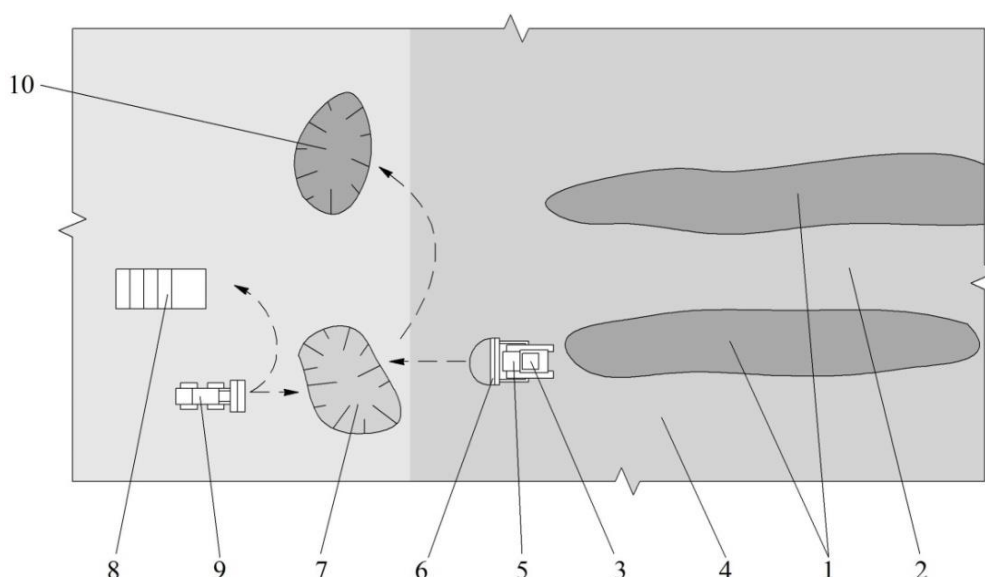


Рисунок. Схема выемки разнородных песков сложноструктурного выемочного блока
Figure. Scheme of extraction of mixed-grade sand of complex structure mine block

Автором проведены сравнительные технико-экономические расчеты предлагаемой технологии освоения сложноструктурной россыпи и традиционной технологии на примере выемочного блока одного из маломасштабных россыпных месторождений золота Амурской области. Согласно данным эксплуатационной разведки, среднее содержание металла в интервалах опробования по блоку составляет $0,41 \text{ г/м}^3$, при этом содержание золота в продуктивном пласте изменяется от $0,05 \text{ г/м}^3$ (бортовое содержание) до $3-4 \text{ г/м}^3$. Ситовый анализ золота показал следующее распределение металла по классам крупности: $+2 \text{ мм} - 2,9\%$; $-2+1 \text{ мм} - 23,4\%$; $-1+0,5 \text{ мм} - 36,8\%$; $-0,5+0,2 \text{ мм} - 29,5\%$; $-0,2 \text{ мм} - 7,4\%$. Мощность продуктивного пласта изменяется от 1,2 до 2,4 м. На основании данных эксплуатационной разведки было произведено районирование продуктивного пласта в плане и по вертикали с выделением зон песков с повышенным содержанием золота (более $0,4 \text{ г/м}^3$). Доля песков с повышенным содержанием металла составила $17,5\%$ при среднем содержании золота $1,27 \text{ г/м}^3$, при этом в них содержится $54,3\%$ металла рассматриваемого выемочного блока. Среднее содержание золота в оставшихся песках рядового качества составляет $0,23 \text{ г/м}^3$. С учетом данных по зависимости извлечения золота от его крупности [10, 19] был определен средневзвешенный коэффициент извлечения золота с традиционным интервалом сполоска шлюзов один раз в сутки, который составил $k_1^{\text{сп}} = 0,821$. Высокие потери при промывке объясняются наличием большого количества мелкого золота в песках россыпи.

Общий коэффициент извлечения золота при раздельной переработке обогащенных и рядовых песков с различными интервалами сполоска шлюзов промывочного прибора может быть определен по зависимости

$$K_{\text{общ}} = \frac{k_1^{\text{сп}} Q_p + \left[k_1^{\text{сп}} + (1 - k_1^{\text{сп}}) \left(1 - \frac{1}{K_{\text{сн}}} \right) \right] Q_{\text{об}}}{100}, \quad (1)$$

где $Q_p = 45,7\%$, $Q_{\text{об}} = 54,3\%$ – доля металла, содержащегося соответственно в рядовых и обогащенных песках; $K_{\text{сн}}$ – коэффициент, учитывающий снижение потерь металла при увеличении количества сполосков шлюзов с одного до двух раз в сутки.

С учетом снижения потерь золота в два раза при увеличении частоты сполоска шлюзов с одного до двух раз в сутки при промывке обогащенных песков извлечение золота составит $87,4\%$, что существенно выше, чем при промывке всего объема песков продуктивного пласта на промывочном приборе со сполоском шлюзов один раз в сутки. Таким образом, извлечение золота увеличится в 1,065 раза – с $82,1$ до $87,4\%$.

Необходимо отметить, что применение предлагаемой технологии приведет к уменьшению объема промываемых песков в связи с затратами времени на

дополнительный сполоск шлюзов. С учетом того, что время на один сполоск составляет 1,0-1,5 ч или 5-7% рабочего времени промывочного прибора в сутки, то при осуществлении второго сполоска шлюзов время промывки песков сократится на 5-7% с аналогичным уменьшением объема промываемых песков. Относительная величина потерь рабочего времени на сполоск шлюзов при осуществлении предлагаемой технологии может быть определена по зависимости

$$T_{\text{сп}}^{\text{нр}} = V_p t_{\text{сп}} n_p + V_{\text{об}} t_{\text{сп}} n_{\text{об}}, \quad (2)$$

где $V_p = 0,825$, $V_{\text{об}} = 0,175$ – доля рядовых и обогащенных песков соответственно в рассматриваемом выемочном блоке; $t_{\text{сп}} = 6\%$ – доля времени, затрачиваемого на один сполоск шлюзов промывочного прибора; $n_p = 1$, $n_{\text{об}} = 2$ – число сполосков шлюзов в сутки при промывке рядовых и обогащенных песков соответственно.

Расчет по предложенной зависимости показал, что относительная величина потерь рабочего времени на сполоск шлюзов составит $7,05\%$ вместо 6% при промывке всего объема песков с одноразовым сполоском шлюзов, следовательно, снижение общего объема промываемых песков составит около 1% . С учетом увеличения извлечения золота из песков в 1,065 раза, даже при снижении объема промываемых песков на 1% , количество получаемого за промывочный сезон металла будет в 1,054 раза больше, чем при традиционной технологии. Таким образом, даже если укрупненно принять, что затраты на добычу и переработку песков по традиционной и предлагаемой технологии равны между собой (хотя с учетом того, что при использовании предлагаемой технологии объем промываемых и добываемых песков снизится на 1% , соответственно, уменьшатся и затраты, в частности на топливо для выемочно-транспортирующих машин и промывочного прибора), то получается, что при тех же издержках будет получено на $5,4\%$ больше металла. Если принять, что при использовании традиционной технологии предприятие работает с рентабельностью 20% , то внедрение предлагаемой технологии позволит обеспечить рентабельность на уровне $28,6\%$, то есть увеличит данный показатель в 1,43 раза.

Выводы

Предложенная усовершенствованная технология обеспечивает повышение сквозного извлечения золота из песков россыпей. Разработка сложноструктурного выемочного блока ведется скрепер-дозером с селективной выемкой разноразмерных песков, складированных в отдельные штабели рядом с промывочным прибором, при этом выемка обогащенных металлом песков ведется только скреперным ковшом скрепер-дозера, а рядовых песков – скреперным ковшом и бульдозерным отвалом. Обогащение разноразмерных

песков, подаваемых из штабелей одноковшовым погрузчиком, осуществляется последовательно на одном и том же промывочном приборе.

Преимущественно ведется промывка рядовых песков со сполоском шлюзов один раз в сутки, по мере накопления периодически производится промывка обогащенных металлом песков со сполоском шлюзов два раза в сутки. Более частый сполоск шлюзов при переработке обогащенных металлом песков обеспечивает существенное снижение потерь золота с хвостами промывки.

В работе предложены зависимости по определению общего коэффициента извлечения металла, а также относительной величины потерь рабочего времени на сполоск шлюзов при использовании предлагаемой технологии. Проведенные расчеты по возможности использования усовершенствованной технологической схемы на одной из маломасштабных россыпей с учетом ее горно-геологических особенностей, содержания золота в песках и его ситового анализа показали, что селективная выемка разноразмерных песков с их последующей раздельной переработкой на одном промывочном приборе с различной частотой сполоска шлюзов позволит увеличить извлечение металла более чем на 5%, что обеспечит значительное повышение рентабельности работы горнодобывающего предприятия.

Список источников

1. Лаломов А.В., Бочнева А.А. Россыпные месторождения России как источник стратегических видов минерального сырья // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2024. №3. С. 5-17.
2. Oberthuer T., Melcher F., Weiser T.W. Detrital platinum-group minerals and gold in placers of southeastern Samar Island, Philippines // The Canadian Mineralogist. 2017, vol. 55, no. 1, pp. 45–62.
3. Чебан А.Ю., Секисов А.Г. Комбинированная технология разработки сложноструктурных глубокозалегающих россыпей золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 24-31.
4. Verbrugge B., Geenen S. The gold commodity frontier: A fresh perspective on change and diversity in the global gold mining economy // The Extractive Industries and Society. 2019, vol. 6, no. 2, pp. 413–423.
5. АО «Прииск Соловьевский» – современное состояние крупнейшего в России дражного флота // Золото и технологии. 2024. №2. С. 86-89.
6. Луняшин П.Д. Значение россыпной золотодобычи для России. Ч. 2 // Золотодобыча. 2023. №8. С. 49-53.
7. Батугина Н.С., Хоютанов Е.А., Ткач С.М. Оценка влияния количества горной массы на единицу металла на эффективность освоения россыпных месторождений золота // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. №12-1. С. 39-47.
8. Ermakov S.A., Burakov A.M. Complex-structure gold placer mining in Yakutia // Journal of Mining Science. 2013, vol. 49, no. 2, pp. 273-278.
9. Башмачников А. Производство золота в России – итоги 2021 года // Золото и технологии. 2022. №2. С. 18-22.
10. Замятин О.В., Маньков В.М. Мелкое золото в россыпях: проблемы оценки и извлечения // Горный журнал. 2011. №4. С. 22-26.
11. Рассказов И.Ю., Чебан А.Ю., Литвинцев В.С. Анализ технической оснащенности горнодобывающих предприятий Хабаровского края и Еврейской автономной области // Горный журнал. 2013. №2. С. 30-34.
12. Cheban A.Yu. Improvement of gold-bearing sand mining and processing at structurally complex placers // Journal of Mining Science. 2024, vol. 60, no. 3, pp. 434-442.
13. Teschner B., Smith N. M., Borrillo-Hutter T., Zira Quaghe John, Wong T.E. How efficient are they really? A simple testing method of small-scale gold miner's gravity separation systems // Minerals Engineering. 2017, vol. 105, pp. 44-51.
14. Holley E.A., Yu Ting Yu, Navarre-Sitchler A. Winter-ton J. Quantitative mineralogy and geochemistry of pelletized sulfide-bearing gold concentrates in an alkaline heap leach // Hydrometallurgy. 2018, vol. 181, pp. 130–142.
15. Батугин С.А., Черный Е.Д. Теоретические основы опробования и оценки запасов месторождений: монография. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1998. 344 с.
16. Chanderman L., Dohm C.E., Minnitt R.C.A. 3D geological modelling and resource estimation for a gold deposit in Mali // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2017, vol. 117. no. 2, pp. 189-197.
17. Qiao Chen, Hong-ying Yang, Lin-lin Tong, Hui-qun Niu, Fu-sheng Zhang et al. Research and application of a Knelson concentrator: A review // Minerals Engineering. 2020, vol. 152, 106339.
18. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modelling // Minerals Engineering. 2017, vol. 112, pp. 57-67.
19. Чебан А.Ю. Усовершенствованная технология освоения сложноструктурных россыпей с раздельной выемкой и переработкой песков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 15-22.
20. Шемякин С.А., Иванченко С.Н., Мамаев Ю.А. Ведение открытых горных пород на основе совершенствования выемки пород. М.: Горная книга, 2006. 315 с.
21. Анализ эффективности применения выемочно-транспортирующих машин на предприятиях Хабаровского края, разрабатывающих россыпные месторождения / Чебан А.Ю., Рассказов И.Ю., Шемякин С.А., Корнеева С.И. // Маркшейдерия и недропользование. 2012. №5. С. 34-37.
22. Шохин В.Н., Лопатин А.Г. Гравитационные методы обогащения. М.: Недра, 1993. 350 с.
23. Пат. на полезную модель 187582 Российская Федерация, МПК В03В 5/70. Сдвоенный линейный шлюз трапециевидного сечения для обогащения песков россыпных месторождений / Е.Д. Кулдай, С.Н. Курьшин, Л.Е. Кулдай, В.Д. Лукьянов, П.Н. Ахреев;

- заявитель и патентообладатель ООО «Градион». № 2018146170; заявл. 25.12.2018; опубл. 12.03.2019.
 24. Замятин О.В. Обогащение золотосодержащих песков на шлюзах. Основные закономерности и технологические возможности процесса // Анализ, добыча и переработка полезных ископаемых: сб. науч. тр. Иркутск: Иргиредмет, 1998.
 25. Мязин В.П. Новые технологические решения по учащенному сполоску концентрата со шлюзов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. №1. С. 238-240.
 26. Мирзеханов Г.С. Оценка потерь при отработке россыпных месторождений золота и критерий прогноза ресурсного потенциала техногенных комплексов. Хабаровск: ДВИМС МПР РФ, 2002. 100 с.
- References**
1. Lalomov A.V., Bochnova A.A. Placer deposits of Russia as a source of strategic mineral raw materials. *Mineralnye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral resources of Russia. Economy and management]. 2024;(3):5-17. (In Russ.)
 2. Oberthuer T., Melcher F., Weiser T.W. Detrital platinum-group minerals and gold in placers of southeastern Samar Island, Philippines. *The Canadian Mineralogist*. 2017;55(1):45-62.
 3. Cheban A.Yu., Sekisov A.G. Combined technology for the development of complex-structured deep-lying gold placers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(1):24-31. (In Russ.)
 4. Verbrugge B., Geenen S. The gold commodity frontier: A fresh perspective on change and diversity in the global gold mining economy. *The Extractive Industries and Society*. 2019;6(2):413-423.
 5. Priisk Solovievsky JSC: the current state of the largest dredging fleet in Russia. *Zoloto i tekhnologii* [Gold and technology]. 2024;(2):86-89. (In Russ.)
 6. Lunyashin P.D. The importance of placer gold mining for Russia. Part 2. *Zolotodobycha* [Gold mining]. 2023;(8):49-53. (In Russ.)
 7. Batugina N.S., Khoyutanov E.A., Tkach S.M. Influence of the ratio between amount of overburden and unit of gold produced on the efficiency of gold placer mining. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2021;(12-1):39-47. (In Russ.)
 8. Ermakov S.A., Burakov A.M. Complex-structure gold placer mining in Yakutia. *Journal of Mining Science*. 2013;49(2):273-278.
 9. Bashmachnikov A. Gold production in Russia: results of 2021. *Zoloto i tekhnologii* [Gold and technology]. 2022;(2):18-22. (In Russ.)
 10. Zamyatin O.V., Mankov V.M. Fine gold in placers: problems of estimation and extraction. *Gorniy zhurnal* [Mining Journal]. 2011;(4):22-26. (In Russ.)
 11. Rasskazov I.Yu., Cheban A.Yu., Litvintsev V.S. Analysis of technical equipment of mining enterprises of Khabarovsk Region and Jewish Autonomous Region. *Gorniy zhurnal* [Mining Journal]. 2013;(2):30-34. (In Russ.)
 12. Cheban A.Yu. Improvement of gold-bearing sand mining and processing at structurally complex placers. *Journal of Mining Science*. 2024;60(3):434-442.
 13. Teschner B., Smith N. M., Borrillo-Hutter T., Zira Quaghe John, Wong T.E. How efficient are they really? A simple testing method of small-scale gold miner's gravity separation systems. *Minerals Engineering*. 2017;105:44-51.
 14. Holley E.A., Yu Ting Yu, Navarre-Sitchler A. Winter-ton J. Quantitative mineralogy and geochemistry of pelletized sulfide-bearing gold concentrates in an alkaline heap leach. *Hydrometallurgy*. 2018;181:130-142.
 15. Batugin S.A., Cherny E.D. *Teoreticheskie osnovy opytovaniya i otsenki zapasov mestorozhdeniy* [Theoretical foundations of sampling and assessment of deposit reserves]. Novosibirsk: Nauka, publishing company of RAS, 1998, 344 p. (In Russ.)
 16. Chanderman L., Dohm C.E., Minnitt R.C.A. 3D geological modelling and resource estimation for a gold deposit in Mali. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2017;117(2):189-197.
 17. Qiao Chen, Hong-ying Yang, Lin-lin Tong, Hui-qun Niu, Fu-sheng Zhang et al. Research and application of a Knelson concentrator: A review. *Minerals Engineering*. 2020;152:106339.
 18. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modelling. *Minerals Engineering*. 2017;112:57-67.
 19. Cheban A.Yu. Improved technology for development of complex-structural placers with separate excavation and processing of sands. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;22(4):15-22. (In Russ.)
 20. Shemyakin S.A., Ivanchenko S.N., Mamaev Yu.A. *Vedenie otkrytyh gornyh porod na osnove sovershenstvovaniya vyemki porod* [Open pit mining based on improved rock excavation]. Moscow: Gornaya kniga, 2006, 315 p. (In Russ.)
 21. Cheban A.Yu., Rasskazov I.Yu., Shemyakin S.A., Korneeva S.I. The analysis of the effectiveness of the use of mining-and-hauling machines at the enterprises engaged in development of placer deposits in Khabarovsk Region. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Mine surveying and subsurface use]. 2012;(5):34-37. (In Russ.)
 22. Shokhin V.N., Lopatin A.G. *Gravitatsionnye metody obogasheniya* [Gravity enrichment methods]. Moscow: Nedra, 1993, 350 p. (In Russ.)
 23. Kuldai E.D., Kuryshkin S.N., Kuldai L.E., Lukyanov V.D., Akhreyev P.N. *Sdvoenniy lineiniy shlyuz trapetsievidnogo secheniya dlya obogasheniya peskov rossypnyh mestorozhdeniy* [Double linear trapezoidal sluice for enrichment of placer sands]. Patent RU, no. 187582, 2019. (In Russ.)
 24. Zamyatin O.V. Enrichment of gold-bearing sands at sluices. Basic patterns and technological capabilities of the process. *Analiz, dobycha i pererabotka poleznykh iskopaemykh: sb. nauch.tr.* [Analysis, extraction and processing of minerals: proceedings]. Irkutsk: Irgiredmet, 1998. (In Russ.)

25. Myazin V.P. New technological solutions for increased rinse of concentrate from sluices. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2003;(1):238-240. (In Russ.)
26. Mirzekhanov G.S. *Otsenka poter pri otrabotke rossypanyh mestorozhdeniy zolota i kriteriy prognoza resursnogo potentsiala tehnogennykh kompleksov* [Estimation of losses during development of placer gold deposits and criterion for forecasting the resource potential of technogenic complexes]. Khabarovsk: DVIMS MPR RF, 2002, 100 p. (In Russ.)

Поступила 06.03.2025; принята к публикации 27.05.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 06/03/2025; revised 27/05/2025; published 25/12/2025

Чебан Антон Юрьевич – ведущий научный сотрудник,
Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного
отделения Российской академии наук (ИГД ХФИЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия.
Email: chebanay@mail.ru. ORCID 0000-0003-2707-626X

Anton Yu. Cheban – Leading Researcher,
Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences (MI KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia.
Email: chebanay@mail.ru. ORCID 0000-0003-2707-626X

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

УДК 622.5

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-14-22



ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРА ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ОТРАБОТКЕ БАРЬЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ

Калмыков В.Н.¹, Мажитов А.М.¹, Кравчук Т.С.², Зотеев О.В.³

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

²Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

³Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Вариантов комбинаций открытого и подземного способов отработки одного месторождения на сегодняшний день в практике ведения горных работ существует большое количество. Эти комбинации зависят от морфологии рудных тел и их горно-геологического залегания, количества запасов, производственной мощности объекта и многих других факторов. В случае отработки запасов полезного ископаемого в бортах карьера подземными горными работами существенно изменяется геомеханическая ситуация, а следовательно, осложняется и оценка устойчивости подработанных откосов уступов. Основной сложностью при геомеханической оценке устойчивости подработанных откосов бортов является определение положения наиболее вероятной поверхности скольжения, которое будет зависеть не только от общеустановленных, классических факторов, но и от формы и конструктивных параметров барьерного целика, варианта используемой системы подземной разработки, а также размеров пригружающего навала пород. Целью исследований является разработка методики оценки устойчивости подработанных бортов карьера при подземной отработке барьерных целиков. Для этого были изучены два разных варианта подземной отработки барьерных целиков в бортах карьера. В результате использования графического и графоаналитического методов исследований были получены основные методические положения по оценке устойчивости подработанных бортов карьера при подземной отработке барьерных целиков. Анализ проведенных геомеханических расчетов показал, что потенциальная поверхность скольжения для подрабатываемого борта имеет сложную конфигурацию, в каждом случае индивидуальную и требующую учета сопряжения возможной призмы обрушения самого борта и зон сдвижения, которые дает отработка рудных тел подземным способом. Применение разработанных методических положений позволит выполнить практическую оценку устойчивости откосов бортов для месторождений, обрабатываемых открыто-подземным способом с подземной отработкой барьерных целиков.

Ключевые слова: подработанные откосы бортов, барьерные целики, поверхность скольжения, методика оценки устойчивости откосов бортов

© Калмыков В.Н., Мажитов А.М., Кравчук Т.С., Зотеев О.В., 2025

Для цитирования

Геомеханическая оценка устойчивости бортов карьера при подземной отработке барьерных целиков / Калмыков В.Н., Мажитов А.М., Кравчук Т.С., Зотеев О.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 14-22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-14-22>



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

GEOMECHANICAL ASSESSMENT OF THE STABILITY OF QUARRY SIDES DURING UNDERGROUND MINING OF BARRIER PILLARS

Kalmykov V.N.¹, Mazhitov A.M.¹, Kravchuk T.S.², Zoteev O.V.³

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

³Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. When developing steeply dipping deposits of valuable ores using the open-pit and underground methods, a barrier pillar is formed in the sides and the bottom part at the boundary and is usually extracted last. If its reserves are mined by underground mining methods, the geomechanical situation changes significantly, which complicates the assessment of the undermined ledges stability. The main problem in the geotechnical assessment of the stability of undermined slopes is the choice of the most likely sliding surface, which will be determined by the combined effect of open-pit and underground mining, the morphology and size of the barrier pillar, the extraction technology, and the state of the open-pit and underground mined-out spaces. The purpose of these studies is to develop a method for calculating the stability of undermined quarry slopes during the extraction of barrier pillars. Two typical scenarios of underground mining of barrier pillars in quarry slopes were studied. As a result of these studies, the main methodological principles for assessing the stability of undermined quarry slopes were formulated. The analysis of the conducted geomechanical calculations showed that the potential sliding surface for the undermined slope had a complex configuration, which was individual in each case and included the intersection of possible sliding surfaces of the ledges, the slope itself, and the zones of displacement formed by underground work. The application of the obtained methodological guidelines will allow for a practical assessment of the stability of the slopes for deposits developed by the open-pit and underground methods.

Keywords: undermined slopes, barrier pillars, sliding surface, methodology for assessing the stability of the sides slopes

For citation

Kalmykov V.N., Mazhitov A.M., Kravchuk T.S., Zoteev O.V. Geomechanical Assessment of the Stability of Quarry Sides During Underground Mining of Barrier Pillars. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 14-22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-14-22>

Введение

На сегодняшний день в практике ведения горных работ существует большое количество вариантов последующей доработки запасов месторождения подземным способом после окончания открытых горных работ. Причем каждый вариант отличается типом подработки откосов бортов карьера и зависит от морфологии рудных тел, ориентации углов залегания относительно борта карьера, объема запасов, производственной мощности подземного рудника и других факторов. Доработка запасов, находящихся за контуром карьера, подземным способом оказывает значительное влияние на напряженно-деформированное состояние массива горных пород вблизи бортов, что осложняет последующую эксплуатацию месторождения, снижает полноту освоения недр и безопасность ведения горных работ.

Сложностью геомеханической оценки устойчивости откосов бортов карьера при доработке запасов подземным способом является правильное определение положения наиболее вероятной общей поверхности скольжения от открытых и подземных горных работ. Точность расчетов определяется наряду с об-

щеустановленными классическими методиками также обязательным условием влияния подземных горных работ и построения общей поверхности скольжения с учетом формы и конструктивных параметров барьерного целика, варианта используемой системы подземной разработки, а также при наличии размеров пригружающего навала пород.

В статье представлен подход к комплексной оценке устойчивости подработанных бортов карьера подземными горными работами, в частности при отработке основных запасов и барьерных целиков. Предлагаемый подход служит как основа для ряда исследований зависимости формы поверхности потенциальной деформации борта от факторов техногенного воздействия подземной разработки месторождения, определяемых типом подработки откосов.

Методы и результаты исследования

Оценка устойчивости подработанных бортов основана на использовании теории предельного равновесия. Этот метод подходит для всех этапов отработки месторождения, как открытым, так и открыто-подземным способом [1-5]. Устойчивость откосов обеспечивается в том случае, если отношение удержи-

вающих сил в массиве к силам сдвигающим, действующим по наиболее слабой поверхности сдвижения, превышает нормативное значение коэффициента запаса устойчивости. Сбор, обработка и анализ исходных данных о физико-механических свойствах пород выполняется в соответствии с рекомендациями [6].

В ранее проведенных исследованиях [10, 11] установлена пространственная форма поверхности деформации. Длина трещины-закола ограничивает размеры деформации откоса по его простиранию. Призма самой деформации симметрична относительно вертикального осевого сечения. Соотношение поперечно-горизонтальных и вертикальных напряжений на различной глубине массива и различном расстоянии от откоса формирует осевую линию скольжения.

Проведение подземных работ в прикарьерной зоне, согласно результатам исследований, оказывает влияние на механизм формирования зон пластических деформаций, на конфигурацию поверхности обрушения откосов и борта в целом [7-9].

Для определения положения и формы поверхности сдвижения, как показывают исследования по данной тематике, чаще всего используются методы физического или математического моделирования, которые позволяют количественно оценить влияние процесса отработки барьерных целиков на состояние борта карьера с учетом действующих в массиве природных тектонических сил, соотношения упругих характеристик пород, геометрических размеров карьера и подземных очистных выработок. На основе анализа напряженно-деформированного состояния подработанного борта, характера деформаций, механизма разрушения откосов и несущих элементов горной конструкции от ведения открытых и подземных горных работ путем сопряжения поверхностей пластических деформаций находится совокупная поверхность скольжения [7-9].

В предлагаемой методике определения положения и формы поверхности сдвижения также используется метод вариантного моделирования, который позволяет прогнозировать интегральную конфигурацию поверхностей сдвижения при отработке барьерных целиков. Основной принцип моделирования заключается в рассмотрении возможных комбинаций схем деформирования, в которых учитываются разные механизмы разрушения откосов бортов от последовательного ведения открытых и подземных горных работ.

При моделировании оценки устойчивости подработанных бортов карьера рассматриваются два варианта выемки барьерных целиков подземным способом при отработке основных запасов за предельным контуром карьера с использованием систем разработки с закладкой:

I вариант – выемка барьерного целика производится системой разработки с обрушением руды и

вмещающих пород с обязательным пригрузом борта карьера навалом вскрышных пород, назначение которого состоит в предотвращении аэродинамических связей подземных выработок с атмосферой. Данный вариант рассматривается как оказывающий наибольшее влияние на устойчивость борта карьера. Вариант рассматривается для отработки рудных тел малой мощности при простирании барьерного целика вдоль борта карьера (рис. 1).

II вариант – выемка барьерного целика производится камерной системой разработки с твердеющей закладкой. При этом также обеспечивается создание пригрузки из скальных пород. Вариант рассматривается при отработке рудных тел малой мощности при незначительной протяженности барьерного целика вдоль борта карьера (рис. 2).

Первый вариант характеризуется широким диапазоном вариантов залегания рудных тел малой мощности относительно бортов карьера: некоторые рудные тела имеют согласное (параллельное) падение с откосом борта карьера, другие пересекают его. Расположение рудных тел по высоте также резко разнится от нижней части борта, вверх поуступно (см. рис. 1).

Полученные результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований были определены основные методические положения по оценке устойчивости подработанных бортов карьера, нарушенные подземной отработкой барьерных целиков различными вариантами. Согласно исследованиям, порядок расчета устойчивости откосов борта карьера состоит в следующем (по вариантам):

Для I варианта:

1. Выбирается наиболее опасный участок борта карьера с точки зрения устойчивости после отработки барьерного целика подземным способом.

2. Выполняется построение поверхности скольжения для опасного локального участка и рассчитывается по ней коэффициент запаса устойчивости.

3. Размеры обрабатываемых рудных тел подземным способом относительно борта карьера незначительны и поэтому влияют на общую устойчивость только в том случае, если их выемка приведет к нарушению локального участка борта, где непосредственно залегает рудное тело.

4. Соответствие запаса устойчивости локального участка нормативному значению в области отработки рудного тела означает, что деформаций в этой области не будет, а подземные горные работы не повлияют на общую устойчивость борта. Оценивать ее не требуется.

Примеры построенных поверхностей скольжения для I варианта отработки барьерных целиков представлены на рис. 3-5.

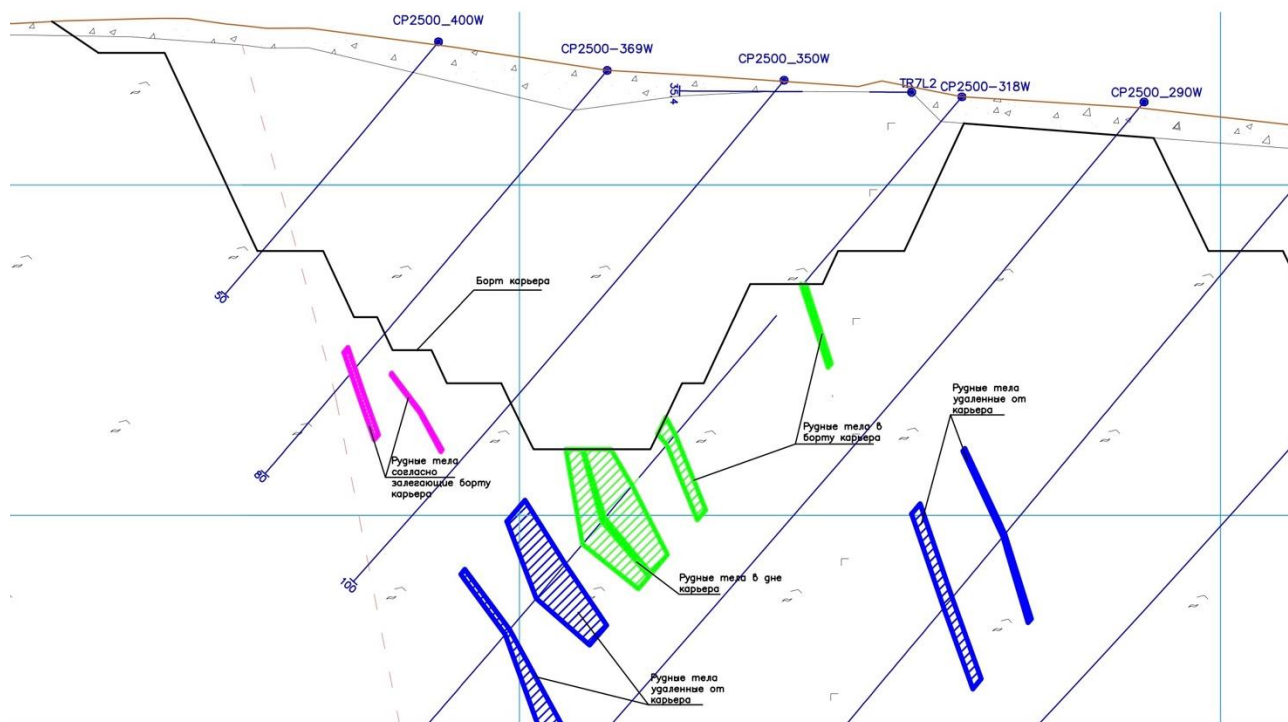


Рис. 1. Условия залегания рудных тел I варианта
Fig. 1. Occurrence conditions of ore bodies (variant I)



Рис. 2. Условия залегания рудных тел II варианта
Fig. 2. Occurrence conditions of ore bodies (variant II)

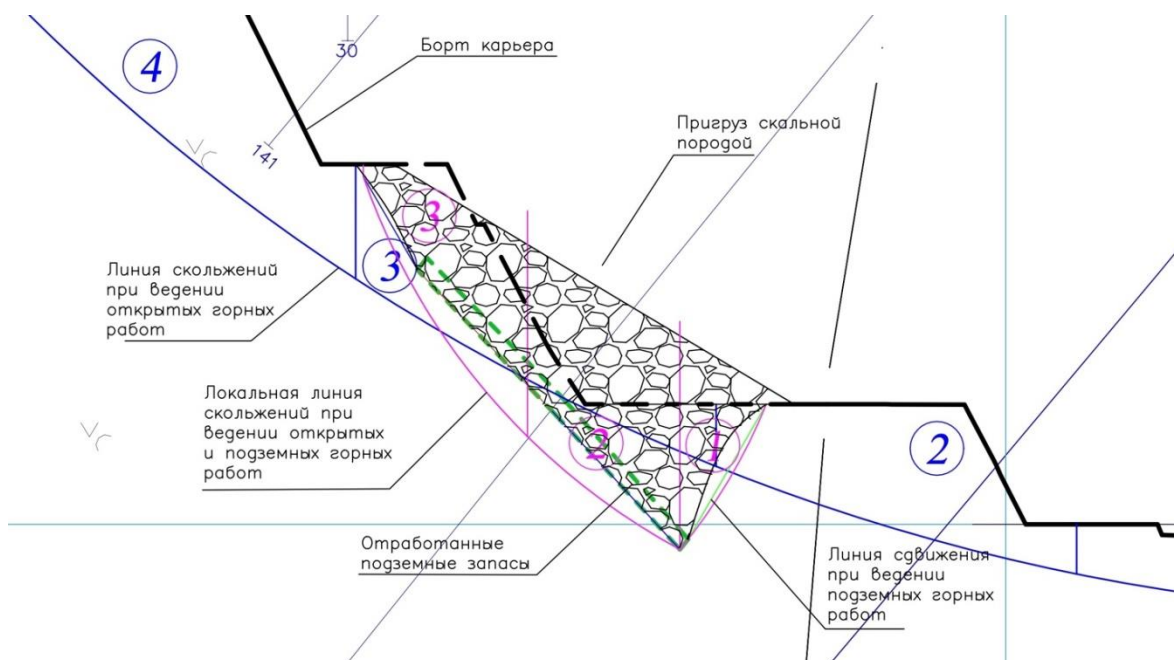


Рис. 3. Построение поверхности скольжения для I варианта при согласном падении рудного тела
Fig. 3. Development of the sliding surface for a concordant-dipping ore body (variant I)

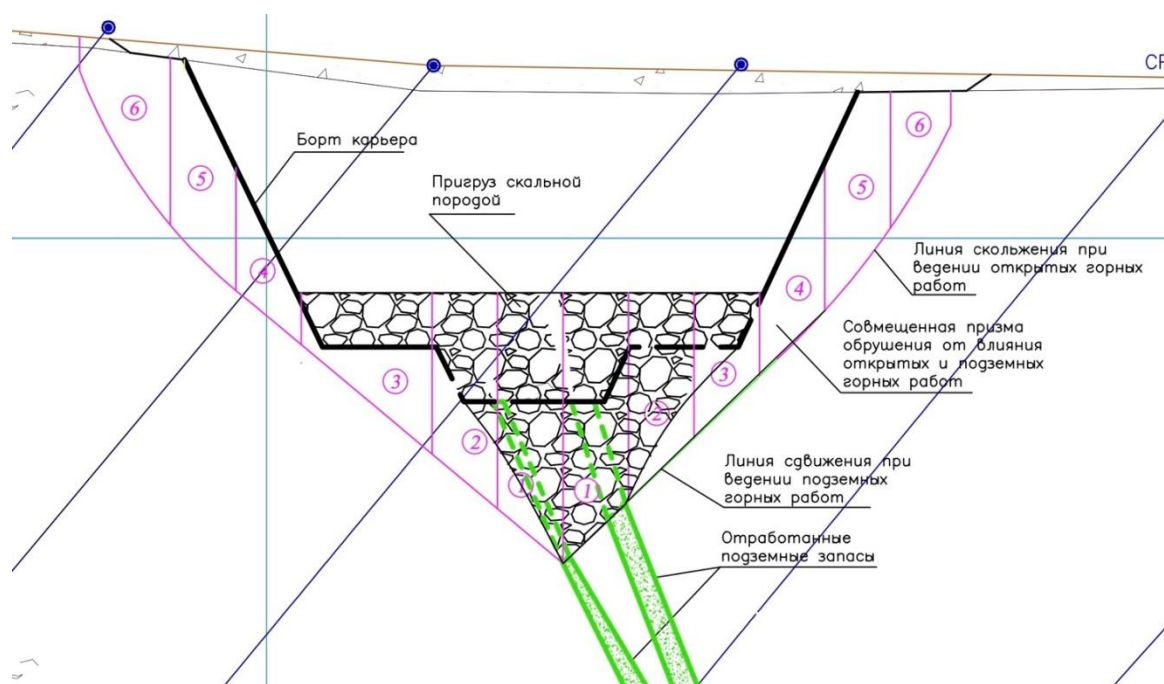


Рис. 4. Построение поверхности скольжения для I варианта при расположении рудного тела в дне карьера
Fig. 4. Development of the sliding surface when the ore body is located at the bottom of the quarry (variant I)

Для II варианта:

1. Выполняется построение поверхности скольжения для подрабатываемого локального участка и рассчитывается по ней коэффициент запаса устойчивости.
2. Соответствие запаса устойчивости локального участка нормативному значению в области отработки барьерного целика означает, что деформаций в этой области не будет, а подземные горные работы не повлияют на общую устойчивость борта. Оценивать ее

не требуется (рис. 6).

3. Выполняется построение поверхности скольжения по контакту пород пригруза и подземных выработок и рассчитывается по ней коэффициент запаса. Если построение поверхности скольжения по контакту пород пригруза и подземных выработок и расчет по ней коэффициента запаса показали, что его значение не соответствует нормативному, необходимо пересмотреть параметры пригруза.

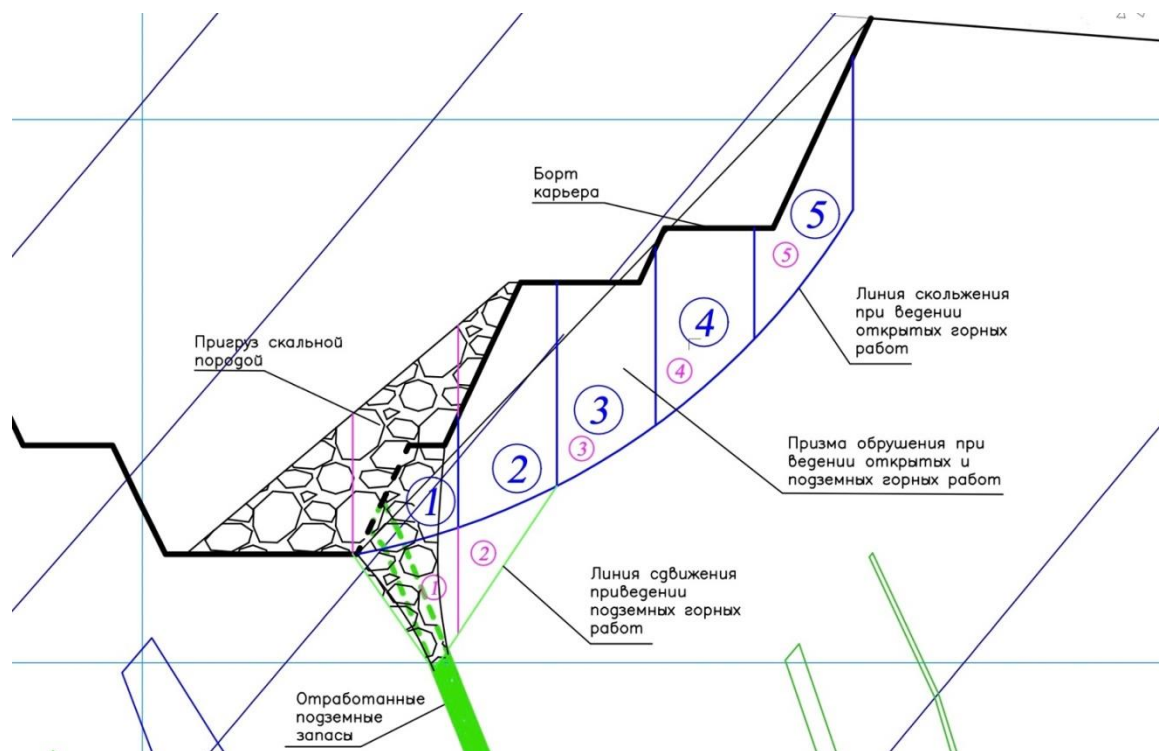


Рис. 5. Построение поверхности скольжения для I варианта при расположении рудного тела в борту карьера
Fig. 5. Development of the sliding surface when the ore body is located at the side of the quarry (variant I)

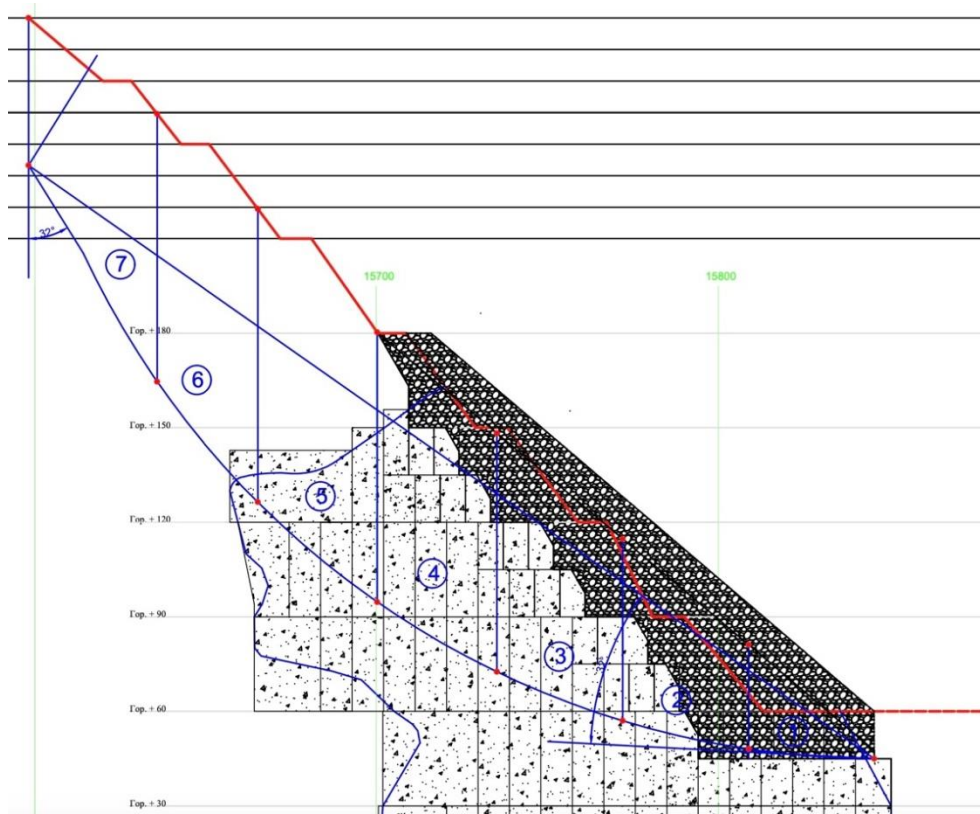


Рис. 6. Построение поверхности скольжения для II варианта
Fig. 6. Development of the sliding surface (variant II)

В первом варианте рассматривается локальная устойчивость элементов борта, а во втором – оценивается устойчивость борта карьера в целом. Основной задачей при оценке устойчивости как в первом, так и во втором варианте является определение положения поверхности скольжения.

В первом варианте построение поверхности скольжения основано на совмещении зон сдвижения от подработки рудных тел малой мощности с поверхностью сдвижения откоса, положение которой задается углом сдвига как на вертикальной площадке, так и в нижней части откоса. Сопряжение двух поверхностей позволяет построить потенциальную поверхность скольжения сложной конфигурации, по которой уже рассчитывается коэффициент запаса устойчивости классическим методом алгебраического сложения сил с учетом изменения физико-механических свойств пород в результате подработки массива.

Во втором случае поверхность скольжения строится по классической методике, основой которой является определение ширины призмы обрушения, высоты вертикального обнажения пород и углов сдвига. В том случае, когда в борту имеется ряд неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления, поверхность скольжения может быть криволинейной, переходящей в плоскую, или плоской, переходящей в криволинейную. Данное обстоятельство учитывается при построении поверхностей скольжения по контакту пород пригруза и подземных камер [12].

Заключение

Анализ результатов исследования и проведенных геомеханических расчетов оценки устойчивости откосов бортов карьера показал, что потенциальная поверхность скольжения для подрабатываемого борта имеет сложную конфигурацию, в каждом случае индивидуальную и требующую учета сопряжения возможной призмы обрушения самого борта и зон сдвижения, которые дает отработка рудных тел подземным способом.

Исследования свидетельствуют также о том, что степень влияния подземных работ на устойчивость подрабатываемого массива зависит от мощности бортового целика и его ориентации относительно борта карьера, поэтому в первом варианте рассматривается локальная устойчивость элементов борта, а во втором оценивается устойчивость борта карьера в целом.

В ранее проведенных исследованиях [9-11] установлена конфигурация пространственной формы поверхности деформации. Длина трещины-закола ограничивает размеры деформации откоса по его простирацию. Призма самой деформации симметрична относительно вертикального осевого сечения. Соотношение поперечно-горизонтальных и вертикальных напряжений на различной глубине массива и различном расстоянии от откоса формирует осевую линию скольжения, которая также является дугой окружно-

сти, формирующей поверхность в пространстве. Угол наклона хорды осевой линии скольжения и глубина трещины отрыва определяет высоту призмы скольжения, которая может быть равной высоте откоса, а также больше или меньше ее в зависимости от конкретных условий. В дальнейших исследованиях требуется рассмотреть влияние сил механизма формирования поверхностей сдвижения, проявляющихся от ведения подземных горных работ, на форму поверхности обрушения откоса борта во всех плоскостях ее развития.

В заключение следует отметить, что проделанная работа показала, что в связи с обострившейся необходимостью оценки устойчивости бортов, подработанных подземными горными выработками, возникла потребность в соответствующей методологии, базирующейся на изучении влияния морфологии, условий залегания, способа отработки рудных тел на форму поверхности скольжения подрабатываемых бортов.

Список источников

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» (Приказ Ростехнадзора от 08.12.2020 г. № 505).
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов», утв. приказом Ростехнадзора России от 13.11.2020 № 439.
3. Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Кадеров С.С. Оценка устойчивости откосов бортов с учетом реконструкции карьера Светлинского золоторудного месторождения и снижения рисков освоения открыто-подземным способом // Комбинированная геотехнология: риски и глобальные вызовы при освоении и сохранении недр: сборник трудов по итогам конференции. Магнитогорск, 2021. С. 27-28.
4. Расчет устойчивости бортов карьера Юбилейного месторождения с помощью программы для ЭВМ «Slope» / Заляднов В.Ю., Великанов В.С., Коваленко Н.В., Кадеров С.С. // Программное обеспечение для предприятий и организаций: сборник трудов Всероссийской научной конференции. Магнитогорск, 2021. С. 8-11.
5. Устойчивость деформированных бортов карьеров: тематическое исследование северного борта Светлинского карьера / Пыталев И.А., Заляднов В.Ю., Габдулхаев Р.К., Семавина Ю.О. // Недропользование и транспортные системы. 2022. Т. 12. №1. С. 33-45.
6. Методические указания по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов / Рыльникова М.В. и др.; Институт проблем комплексного освоения недр. Москва, 2022. 90 с.
7. Закладочные работы в шахтах: справочник/ под ред. Д.М. Бронникова, М.Н. Цыгалова. М.: Недра, 1989. 400 с.
8. Каплунов Д.Р., Калмыков В.Н., Рыльникова М.В. Комбинированная технология. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2003. 560 с.

9. Зинуров А.В. Разработка комбинированной технологии выемки запасов в основании бортов карьеров (на примере медноколчеданных месторождений Урала): дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 1999.
10. Калмыков В.Н., Мажитов А.М., Кравчук Т.С. Методика цифровой оценки устойчивости бортов карьеров при подземной доработке законтурных запасов // Сб. тр. конф. Москва; Екатеринбург, 2025. С. 127-129.
11. Черчинцева Т.С., Кузнецова Т.С. Геомеханические основы прогноза объемных деформаций и устойчивости откосов горных пород: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2007. 60 с.
12. Кузнецова Т.С. Обоснование параметров карьеров при комбинированной разработке крутопадающих месторождений: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2009. 112 с.
5. Pytalev I.A., Zalyadnov V.Yu., Gabdulkaev R.K., Semavina Yu.O. Stability of deformed sides of quarries: a case study of the northern side of the Svetlinsky quarry. Nedropolzovanie i transportnye sistemy [Subsoil use and transport systems]. 2022;12(1):33-45. (In Russ.)
6. Rylnikova M.V. et al. Metodicheskie ukazaniya po otsenke riskov razvitiya deformatsiy, monitoringu i upravleniyu ustoichivostyu bortov i ustupov, karerov, razrezov i otkosov otvalov. Metodicheskie ukazaniya [Methodological guidelines for assessing the risks of deformation development, monitoring and managing the stability of sides and ledges, quarries, sections and slopes of dumps. Methodological guide book]. Institute of Problems of Integrated Development of Mineral Resources. Moscow, 2022, 90 p. (In Russ.)
7. Bronnikov D.M., Tsygalov M.N. Zakladochnye raboty v shahtah: Spravochnik [Stowing works in mines: A reference book]. Moscow: Nedra, 1989, 400 p. (In Russ.)
8. Kaplunov D.R., Kalmykov V.N., Rylnikova M.V. Kombinirovannaya tekhnologiya [Combined technology]. Moscow: Ruda i Metally Publishing House, 2003, 560 p. (In Russ.)
9. Zinuurov A.V. Razrabotka kombinirovannoy tekhnologii vyemki zapasov v osnovanii bortov karerov (na primere mednokolchedannykh mestorozhdeniy Urala): dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of a combined technology for extracting reserves at the base of quarry backs (based on copper-sulfide deposits in the Urals). PhD dissertation]. Magnitogorsk, 1999.
10. Kalmykov V.N., Mazhitov A.M., Kravchuk T.S. Methodology of digital assessment of stability of quarries sides at underground refining of the reserves of the contour. Sb. trudov konf. [Proceedings of the conference]. Moscow, Yekaterinburg, 2025, pp. 127-129. (In Russ.)
11. Cherkintseva T.S., Kuznetsova T.S. Geomekhanicheskie osnovy prognoza obemnykh deformatsiy i ustoichivosti otkosov gornykh porod. Monografiya [Geomechanic foundations of forecasting volumetric deformations and stability of rock slopes. Monograph]. Magnitogorsk: NMSTU, 2007, 60 p. (In Russ.)
12. Kuznetsova T.S. Obosnovanie parametrov karerov pri kombinirovannoy razrabotke krutopadayushchikh mestorozhdeniy. Monografiya [Substantiation of quarry parameters in the combined development of steep-falling deposits. Monograph]. Magnitogorsk: NMSTU, 2009, 112 p. (In Russ.)

References

1. Federal norms and rules in the field of industrial safety "Safety rules for mining and processing of solid minerals" (Order of Rostekhnadzor No. 505 dated December 08, 2020).
2. Federal norms and rules in the field of industrial safety "Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, sections and slopes of dumps", approved by Order of Rostekhnadzor of Russia No. 439 dated November 13, 2020.
3. Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Yu., Kaderov S.S. Assessment of the stability of the sides slopes, taking into account the reconstruction of the Svetlinsky gold deposit quarry and reducing the risks of development by the open-underground method. Sb. trudov po itogam konferentsii «Kombinirovannaya geotekhnologiya: riski i globalnye vyzovy pri osvoenii i sohranении neдр [Combined geotechnology: risks and global challenges in the development and conservation of mineral resources. Proceedings]. Magnitogorsk, 2021, pp. 27-28. (In Russ.)
4. Zalyadnov V.Yu., Velikanov V.S., Kovalenko N.V., Kaderov S.S. Calculation of the stability of the sides of the mining field using the computer program "Slope". Sb. trudov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Programmnoe obespechenie dlya predpriyatiy i organizatsiy» [Proceedings of the All-Russian Scientific Conference Software for enterprises and organizations]. Magnitogorsk, 2021, pp. 8-11. (In Russ.)

Поступила 24.11.2025; принята к публикации 10.12.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 24/11/2025; revised 10/12/2025; published 25/12/2025

Калмыков Вячеслав Николаевич – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: prmpi@magtu.ru ORCID 0009-0007-8631-5343

Мажитов Артур Маратович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: artur.mazhitov@yandex.ru ORCID 0000-0001-8219-4264

Кравчук Татьяна Сергеевна – кандидат технических наук, доцент,
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет),
Челябинск, Россия.
Email: kravchukts@susu.ru. ORCID 0000-0002-2795-3843

Зотеев Олег Вадимович – доктор технических наук, профессор,
Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.
Email: zoteev.o@mail.ru. ORCID 0009-0003-8521-0372

Vyacheslav N. Kalmykov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: prmpi@magtu.ru ORCID 0009-0007-8631-5343

Artur M. Mazhitov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: artur.mazhitov@yandex.ru ORCID 0000-0001-8219-4264

Tatiana S. Kravchuk – PhD (Eng.), Associate Professor,
South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: kravchukts@susu.ru. ORCID 0000-0002-2795-3843

Oleg V. Zoteev – DrSc (Eng.), Professor,
Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.
Email: zoteev.o@mail.ru ORCID 0009-0003-8521-0372

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

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

УДК 669.715.002.68

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-23-30



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ СТРУЖКОВЫХ ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1580 ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Сидельников С.Б.¹, **Загиров Н.Н.¹**, Иванов Е.В.¹, Чукин М.В.², Безруких А.И.¹, Лопатина Е.С.¹

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

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

Аннотация. Разработка новых технологий изготовления длинномерных деформированных полуфабрикатов из вторичных отходов алюминиевых сплавов, исключаящих при их реализации плавильный передел, является актуальной задачей металлургического производства. Целью работы являлась оценка возможности получения и определения свойств деформированных полуфабрикатов из стружковых отходов алюминиевого сплава 1580. Представлены результаты исследований способа получения прутков и проволоки из стружки опытного алюминиевого сплава 1580 с содержанием скандия 0,12 мас. %. В качестве основных применены методы порошковой металлургии (брикетирование), обработки металлов давлением (прессование и волочение) и термообработки (отжиг). С использованием разработанной общей технологической схемы термомеханической обработки сыпучих стружковых отходов алюминиевых сплавов проведены экспериментальные исследования технологии получения брикетированных заготовок и горячего прессования прутков диаметром 4,9 и 6,8 мм из стружки сплава 1580. Установлено, что прочность прутков после горячей экструзии характеризуется значениями временного сопротивления 370–380 МПа, а пластичность значениями относительного удлинения 18–20%. Такой уровень механических свойств отпрессованных прутков обеспечил возможность безобрывного получения проволоки диаметром 3 мм без проведения промежуточных отжигов. Рассчитаны и экспериментально опробованы маршруты волочения проволоки диаметром до 1 мм из этих прутков. Определены механические свойства проволоки, а также изучено изменение структуры полуфабрикатов и изделий на всех технологических переделах термомеханической обработки. Исследования показали, что проволока, полученная из стружки сплава 1580, соответствует требованиям, предъявляемым к сварочной проволоке из алюминиевых сплавов, и может быть использована в качестве материала для наплавки на поверхность изделий при реализации аддитивных технологий.

Ключевые слова: аддитивное производство, сыпучие стружковые отходы, алюминиевые сплавы со скандием, прессование, волочение, проволока, структура и свойства металла

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда науки в рамках гранта № 25-19-20133.

© Сидельников С.Б., Загиров Н.Н., Иванов Е.В., Чукин М.В., Безруких А.И., Лопатина Е.С., 2025

Для цитирования

Исследование технологии получения проволоки из стружковых отходов алюминиевого сплава 1580 для использования в аддитивном производстве / Сидельников С.Б., Загиров Н.Н., Иванов Е.В., Чукин М.В., Безруких А.И., Лопатина Е.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 23-30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-23-30>



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

RESEARCH ON THE TECHNOLOGY FOR PRODUCING WIRE FROM ALUMINUM 1580 ALLOY CHIP WASTE FOR USE IN ADDITIVE MANUFACTURING

Sidelnikov S.B.¹, Zagirov N.N.¹, Ivanov E.V.¹, Chukin M.V.², Bezrukikh A.I.¹, Lopatina E.S.¹

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The development of new technologies for the manufacture of long-length deformed semi-finished products from recycled aluminum alloy waste, which exclude melting conversion during their implementation, is an urgent task of metallurgical production. The objective of the work was to evaluate the possibility of obtaining and properties of deformed semi-finished products from chip waste of aluminum 1580 alloy. The research results on a method for producing rods and wire from chips of an experimental aluminum 1580 alloy with a scandium content of 0.12 wt. % are presented. The main methods used are powder metallurgy (briquetting), metal forming (extrusion and drawing) and heat treatment (annealing). Using the developed general technological scheme for the thermal deformation treatment of bulk aluminum alloy chip waste, experimental studies have been conducted on the technology for producing briquetted blanks and hot extruded rods with diameters of 4.9 and 6.8 mm from 1580 alloy chips. It was found that the strength of the rods after hot extrusion is characterized by values of ultimate tensile strength of 370-380 MPa, and plasticity by values of elongation of 18-20 %. Such a level of mechanical properties of pressed rods ensured the possibility of continuous production of wire with a diameter of 3 mm without intermediate annealing. Drawing routes of a wire with a diameter of up to 1 mm from these rods have been calculated and experimentally tested. The mechanical properties of the wire were determined, and the change in the structure of semi-finished products and pieces at all technological stages of thermal deformation treatment were studied. Research has shown that the wire obtained from 1580 alloy chips meets the requirements for welding wire made of aluminum alloys and can be used as a material for surfacing products in the implementation of additive technologies.

Keywords: additive manufacturing, bulk chip waste, aluminum alloys with scandium, extrusion, drawing, wire, metal structure and properties

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and the Krasnoyarsk Regional Fund of Science under grant No. 25-19-20133.

For citation

Sidelnikov S.B., Zagirov N.N., Ivanov E.V., Chukin M.V., Bezrukikh A.I., Lopatina E.S. Research on the Technology for Producing Wire from Aluminum 1580 Alloy Chip Waste for Use in Additive Manufacturing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 23-30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-23-30>

Введение

Технология проволочно-дугового аддитивного производства, в международном сообществе известна как Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) [1, 2], представляет собой новый метод непосредственного изготовления компонентов путем плавления и послойного нанесения на обложку присадочной проволоки из определенного материала с дугой в качестве источника питания. Высокие скорости наплавки, низкие затраты на материалы и оборудование, возможность осуществления наплавки с максимально точными геометрическими параметрами, соответствие свойств наплавляемого материала предъявляемым к изделию требованиям по механическим свойствам и химическому составу делают эти технологии подходящей альтернативой для замены существующих методов изготовления деталей малой и средней сложности.

В целях расширения области применения технологии WAAM проводятся исследования по использо-

ванию различных материалов в качестве присадочной проволоки из сплавов на основе титана [3], никеля [4], алюминия [5], стали [6]. Доказано, что для аддитивного производства с незначительными адаптациями могут быть применены многие стандартные сварочные сплавы, из которых одним из перспективных следует признать экспериментальный магнийсодержащий алюминидный сплав 1580, для повышения прочности дополнительно легированный скандием и цирконием [7]. Данный сплав имеет широкие перспективы применения в аэрокосмической и оборонной промышленности благодаря своим свойствам, а также оптимальному соотношению прочности и веса [8, 9]. При этом, как и в большинстве случаев промышленного применения, прочность наплавленного слоя указанного сплава должна соответствовать уровню, предъявляемому к деформируемому состоянию того же сплава [10].

Твердотельная переработка отходов в настоящее время представляет собой сферу, вызывающую по-

вышенный интерес исследователей, так как позволяет снижать себестоимость продукции, в особенности по сравнению с производством первичного алюминия, поскольку при этом снижаются энергозатраты, уменьшается количество вредных выбросов в атмосферу, упрощается производственный процесс [11].

Научная новизна работы заключается в разработке новых технических и технологических решений для создания технологии получения проволоки из стружковых отходов алюминиевых сплавов.

Анализ научно-технической литературы показал также, что для исследования технологии термомеханической обработки сыпучих стружковых отходов алюминиевых сплавов, исключающих при ее реализации плавильный передел, для сплава 1580 целесообразно использовать разработанную ранее общую технологическую схему [11].

Такая схема была неоднократно успешно опробована при исследовании аналогичных технологий для получения деформированных полуфабрикатов из стружковых отходов различных сплавов алюминия (АД31, АК7 и др.) [11].

Целью работы являлась оценка возможности получения и определения свойств деформированных полуфабрикатов из стружковых отходов алюминиевого сплава 1580.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного сырья для изготовления деформированных полуфабрикатов использовали стружку сыпучую (с длиной витка менее 100 мм) из

алюминиевого сплава 1580, образующуюся при обработке полуфабрикатов и изделий на металлорежущих станках. Химический состав опытного сплава [12] приведен в табл. 1.

Поскольку в нашем случае при токарной обработке литых заготовок смазочно-охлаждающую жидкость не использовали, образующиеся стружковые отходы по засоренности можно отнести к категории «чистых». Поэтому перед компактированием они не подвергались дополнительной подготовке в виде промывки и очистки от посторонних примесей. Не проводилось также и разделение стружки по размерам.

В качестве основных методов для получения прутков и проволоки из стружковых отходов сплава 1580 применяли методы порошковой металлургии (брикетирование), обработки металлов давлением (прессование и волочение) и термообработки (отжиг).

Полуфабрикаты и изделия получали в соответствии с разработанной схемой (рис. 1), минуя плавильный передел. Объектом исследований и конечным продуктом служила проволока диаметром 1,0 мм, которую опробовали в качестве наплавочной при реализации аддитивных технологий.

Брикетирование стружки проводили при комнатной температуре. Рабочий диаметр контейнера составлял 42 мм. Масса одновременно засыпаемой в пресс-форму стружки принималась равной 40–50 г, что при прикладываемом давлении брикетирования 180 МПа давало возможность получать брикеты высотой 15–20 мм. Плотность их при этом составляла 1,78–1,80 г/см³.

Таблица 1. Химический состав исследуемого сплава, из которого получена стружка

Table 1. Chemical composition of the studied alloy from which the chips were obtained

Содержание элемента, мас. %											
Mg	Mn	Si	Sc	Zr	Ti	Cr	Fe	Cu	Zn	Ni	Al
5,27	0,49	0,13	0,12	0,13	0,02	0,15	0,16	0,011	0,01	0,006	Основа

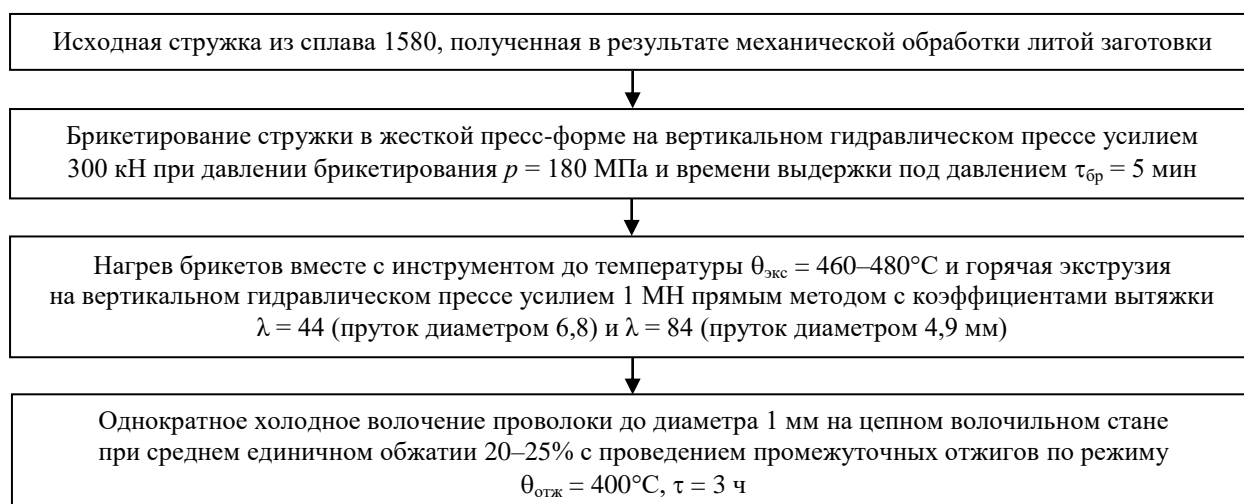


Рис. 1. Технологическая схема изготовления проволоки круглого поперечного сечения из стружки сплава 1580 с использованием традиционной схемы дискретной экструзии

Fig. 1. Flow chart for manufacturing wire of circular cross section from 1580 alloy chips using traditional discrete extrusion

Для получения экструдированных прутков применяли составные образцы, состоящие из двух брикетов, которые после нанесения на боковую контактную поверхность смазки в виде смеси графита с маслом располагали внутри контейнера инструментальной оснастки [11]. Ее, в свою очередь, размещали внутри свободного пространства установленной на столе вертикального прессы усилием 1 МН стационарной печи, нагревали до требуемой температуры, после чего производили непосредственно процесс экструзии. Диаметры рабочего отверстия матрицы были выбраны из имеющегося прессового инструмента равными 6,8 и 4,9 мм для того, чтобы оценить влияние вытяжки при экструзии на возможность осуществления процесса прессования. Коэффициенты вытяжки при экструзии варьировались от 44 до 84. Исследования показали, что в обоих случаях процесс прессования осуществим, однако получение прутка диаметром 4,9 мм позволяет снизить число операций при последующем волочении.

После окончания процесса экструзии отпрессованный пруток извлекали и отделяли от него прессостаток. Сам пруток делили на несколько частей, одна из которых служила для вытачивания образцов для проведения механических испытаний на растяжение, а другая шла на реализацию процесса холодного однократного волочения на цепном волочильном стане. При этом волочение осуществляли с диаметра прессованной заготовки 4,9 мм до диаметра 1,0 мм, с использованием промежуточных и конечного отжигов.

Методика расчета маршрутов и параметров волочения с использованием известных формул [13-16] включала следующие этапы:

1. Коэффициент вытяжки рассчитывают по формуле

$$\mu = \frac{F_0}{F_1}, \quad (1)$$

где F_0 и F_1 – площадь поперечного сечения изделия до волочения и после него соответственно.

2. Суммарное относительное обжатие ε_Σ определяют по формуле

$$\varepsilon_\Sigma = \frac{d_0^2 - d^2}{d_0^2} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где d_0 – диаметр проволоки после осуществления очередного процесса отжига; d – диаметр проволоки, фрагменты которой подвергались испытанию на растяжение после проведения очередного этапа деформирования.

3. Силу волочения определяют по формуле А.П. Гавриленко:

$$P_b = \sigma_{bc} (F_0 - F_1) \cdot (1 + f \cdot \operatorname{ctg} \alpha), \quad (3)$$

где σ_{bc} – среднее значение временного сопротивления металла в пределах деформационной зоны; f – коэффициент трения на контакте заготовки с волокой; α – угол волоки.

4. Напряжение волочения рассчитывают по формуле

$$K_b = \frac{P_b}{F_1}. \quad (4)$$

5. Коэффициент запаса прочности определяют по формуле

$$\gamma = \frac{\sigma_b}{K_b}, \quad (5)$$

где σ_b – временное сопротивление металла после волочения.

После каждого из этапов термомеханической обработки проводили отбор образцов для проведения механических испытаний на растяжение, по результатам которых находили значения временного сопротивления σ_b , и относительного удлинения δ , отражающих изменение указанных показателей по технологическим переделам.

Механические свойства прутков и проволоки определяли на универсальных машинах LFM 400 и LFM 10, а микротвердость – с помощью цифрового микротвердомера DM8.

Микроструктуру образцов проволоки исследовали в продольном и поперечном направлениях на микроскопе фирмы CARL ZEISS Axio Observer A1m при увеличениях 200, 1000 крат, а наплавленный слой на световом микроскопе Stemi 2000-C.

Полученные результаты и их обсуждение

Для составления рационального маршрута и получения проволоки диаметром 1 мм был произведен расчет технологических параметров процесса волочения. Для этого использовали кривую упрочнения, полученную в результате аппроксимации данных по свойствам сплава 1580, приведенных в работах [9, 17], в результате чего получили формулу

$$\sigma_b = 386 + 2,45\varepsilon_\Sigma - 0,014\varepsilon_\Sigma^2. \quad (6)$$

Результаты расчетов технологических параметров процесса волочения проволоки из сплава 1580 диаметром 1,0 мм из прутка диаметром 4,9 мм, выполненные с использованием формул по представленной выше методике, приведены в табл. 2.

При проведении расчетов угол волоки принимали равным 8° , коэффициент трения на контакте – 0,1. Среднее значение коэффициента вытяжки было равно 1,31, а суммарное обжатие между двумя соседними отжигами не превышало 63 % (см. табл. 2).

Таблица 2. Результаты расчета технологических и силовых параметров процесса волочения проволоки
Table 2. Calculation results of technological and power parameters of the wire drawing process

Параметры	Значения параметров по переходам волочения											
	1	2	3	4*	5	6	7*	8	9	10*	11	12
Коэффициент вытяжки μ_i	1,33	1,3	1,27	1,22	1,33	1,32	1,31	1,33	1,32	1,31	1,33	1,28
Диаметр до волочения D_{i-1} , мм	4,9	4,2	3,7	3,3	3,0	2,6	2,3	2,0	1,7	1,5	1,3	1,1
Диаметр после волочения D_i , мм	4,2	3,7	3,3	3,0	2,6	2,3	2,0	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0
Площадь поперечного сечения F_i , мм ²	14,2	10,9	8,6	7,0	5,3	4,0	3,1	2,3	1,7	1,3	1,0	0,8
Суммарное относительное обжатие до отжига ϵ_i , %	25	42	54	63	25	43	57	25	43	57	25	41
Сила волочения P_i , Н	3295	2523	1867	1273	1377	991	766	596	431	333	259	169
Напряжение волочения $K_{вi}$, МПа	232	231	217	181	260	247	250	259	247	250	259	216
Коэффициент запаса прочности γ_i	1,88	2,01	2,20	2,68	1,68	1,88	1,92	1,69	1,88	1,92	1,69	2,15

* Место проведения отжига.

Результаты испытаний на разрыв для проволоки различных диаметров в нагартованном и отожженном состоянии приведены в табл. 3. Каждая нанесенная точка соответствует среднему значению указанного показателя для трех испытанных образцов.

Таблица 3. Механические свойства деформированных полуфабрикатов из стружки сплава 1580
Table 3. Mechanical properties of deformed semi-finished products from 1580 alloy chips

Вид полуфабриката	Состояние	σ_b , МПа	δ , %
Пруток диаметром 4,9 мм	Горячепрессованное	370±5	19±1
Проволока диаметром 3,0 мм	Нагартованное	412±2	3±1
Проволока диаметром 3,0 мм	Отожженное	375±5	17±2
Проволока диаметром 1,0 мм	Отожженное	335±2	19±2

Результаты испытаний образцов на разрыв показали, что уровень механических свойств горячепрессованных прутков диаметром 4,9 мм достаточно высок (см. табл. 3) и обеспечил возможность безобрывного получения проволоки диаметром 3,0 мм без проведения промежуточных отжигов.

Исследование микроструктуры проволоки из стружки сплава 1580 (рис. 2) показало, что она представляет собой α -твердый раствор с равномерно распределенными мелкими частицами избыточных фаз. Причем микроструктура проволоки в продольном и поперечном направлениях практически идентична.

При оценке уровня механических свойств ориентировались на требования к проволоке по ГОСТ 7871-2019 [18], в котором указано, что проволока всех марок сплавов диаметром до 4 мм в нагартованном состоянии должна иметь временное сопротивление не менее 100 МПа. Из полученных данных (см. табл. 3) следует, что проволока, полученная из стружки сплава 1580, соответствует требованиям стандарта для сварочной проволоки.

В дальнейшем полученную проволоку использовали в качестве присадочного материала для его наплавки с помощью технологии холодного переноса металла на подложку из сплава АМг6 в виде пластины (рис. 3). Исследования проводились с применением роботизированного комплекса Fanuc ARC Mate 100iC со сварочным оборудованием Fronius TPS 3200 CMT. Режим наплавки был следующим: ток наплавки – 57 А; напряжение дуги – 19,5 В; скорость подачи проволоки – 800 мм/мин; защитный газ – аргон.

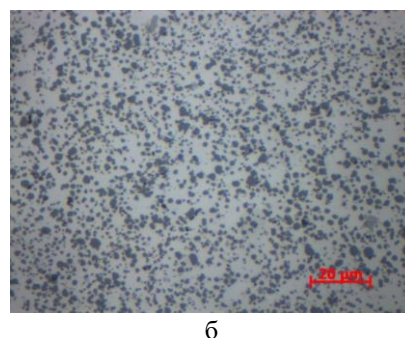
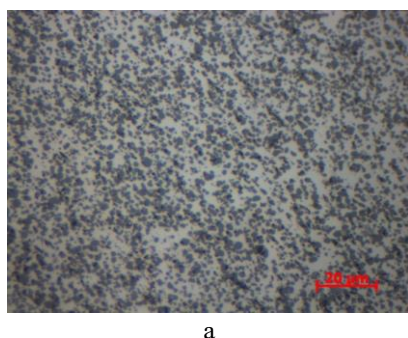


Рис. 2. Микроструктура полученной из стружки сплава 1580 проволоки диаметром 1 мм, $\times 1000$:
а – продольное сечение; б – поперечное сечение

Fig. 2. Microstructure of 1 mm diameter wire obtained from 1580 alloy chips, $\times 1000$: a is sectional view;
b is cross-sectional view

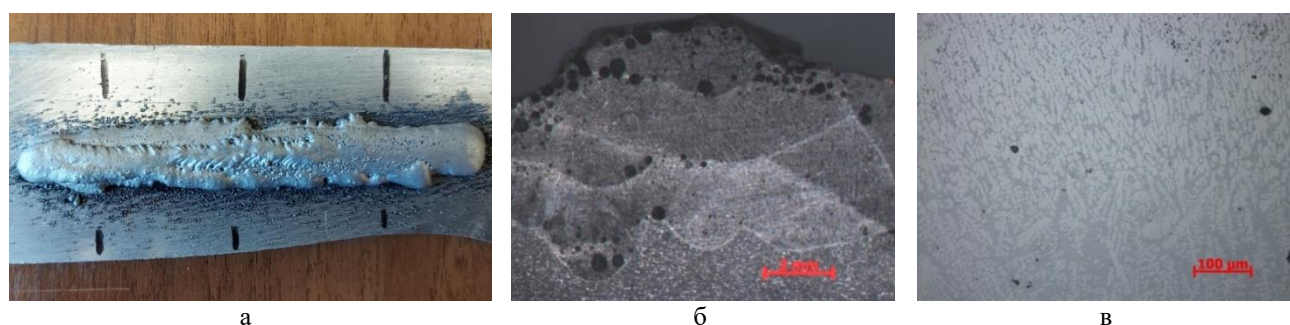


Рис. 3. Вид напавленного образца и структура напавленного слоя из проволоки, полученной из стружки сплава 1580: а – образец; б – макроструктура; в – микроструктура, $\times 200$
 Fig. 3. The view of the deposited sample and the structure of the deposited layer from wire obtained from 1580 alloy chips: a is sample, б is macrostructure; в is microstructure, $\times 200$

После проведения наплавки была изучена макро- и микроструктура полученных образцов. Исследование макроструктуры металла показало, что напавленные слои характеризуются достаточно хорошим взаимодействием друг с другом и с металлом основы (рис. 3, а). Но при этом в верхней части напавленного металла выявлено большое количество пор размерами до 0,5 мм (рис. 3, б). Единичные поры встречаются и в других частях напавленного металла. Микроструктура наплавки представляет собой литое строение сплава (рис. 3, в). Выявляются зоны как с крупным строением дендритов, так и с более мелкими размерами дендритной ячейки, что, по-видимому, связано с условиями охлаждения слоев металла при осуществлении наплавки металла.

Установлено также, что распределение механических свойств металла напавленного слоя носит достаточно равномерный характер. Таким образом, исследования показали, что проволока из стружки сплава 1580 диаметром 1 мм соответствует требованиям, предъявляемым к сварочной проволоке из алюминиевых сплавов ГОСТ 7871-2019 [18], что дает основание рекомендовать ее для использования в качестве материала для наплавки на поверхность изделий при реализации аддитивных технологий.

Заключение

Таким образом, с применением методов термомеханической обработки проведены исследования технологии изготовления длинномерных деформированных полуфабрикатов из стружки алюминиевого сплава 1580, экономно легированного скандием. Исследования возможности получения прутков прессованием из сбрикетированных из стружки заготовок дало возможность определиться с диаметром заготовки (4,9 мм) для последующего волочения проволоки диаметром от 3 до 1 мм. Исследования механических свойств показали, что проволока из стружки сплава 1580 диаметром 1 мм в отожженном состоянии соответствует требованиям, предъявляемым к сварочной проволоке из алюминиевых сплавов, и может быть использована в качестве материала для

наплавки на поверхность изделий при реализации аддитивных технологий [18].

Данная статья является последней в научной деятельности и творческой биографии доцента кафедры «Обработка металлов давлением» института цветных металлов Сибирского федерального университета Загирова Николая Наильича

Список источников

1. Huang S., Liu P., Mokasdar A., Hou I. Additive manufacturing and its societal impact a literature review // Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013, no. 5-6, pp. 1191-1203.
2. Fraizer E.W. Metal additive manufacturing: a review // Journal Mater. Eng. Perform. 2014, no. 23, pp. 1917-1929.
3. Wang F., Williams S., Colegrove H., Antonysamy A.A. Microstructure and mechanical properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ni-6Al-4V // Metallurgical and Materials Transactions A. 2012, no. 44, pp. 968-977.
4. Clark D., Bache M.R., Whittaker M.T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications // Journal of Materials Processing Technology. 2008, no. 203, pp. 439-448.
5. Panchenko O.V., Zhabrev L.A., Kurushkin D.V., Popovich A.A. Macrostructure and mechanical properties of Al-Si, Al-Mg-Si, and Al-Mg – Mn aluminum alloys produced by electric arc additive growth // Metal Science and Heat Treatment [Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov]. 2019, no. 60, pp. 749-754. (In Russ.)
6. Применение экструдированной наплавки для создания трехмерных объектов из стали / С.С. Жаткин, К.В. Никитин, В.Б. Деев и др. // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. Вып. 6. С. 443-450.
7. Белов Н. А., Алабин А. Н. Перспективные алюминиевые сплавы с добавками циркония и скандия // Цветные металлы. 2007. № 2. С. 99-106.
8. Белов Н. А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов: монография. М.: Издательский дом МИСиС, 2010. 511 с.
9. Исследование деформационного поведения алюминиевого сплава Р-1580, экономно легированного скандием, при горячей деформации / Н. Н. Довженко, С. В. Рушиц, И. Н. Довженко и др. // Цветные металлы. 2019. Вып. 9. С. 80-86.

10. Исследование влияния термообработки на микроструктуру и механические свойства образцов из алюминиевого магнийсодержащего сплава 1580, полученных способом многослойной наплавки / М.Ф. Карташев, А.Н. Юрченко, Р.Д. Гребенкин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. Вып. 2. С. 38-46.
11. Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих отходов сплавов алюминия: монография / Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Сидельников С.Б. и др. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. 204 с.
12. ГОСТ 4784-2019. Межгосударственный стандарт. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. М.: Стандартинформ, 2019. 31 с.
13. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. М.: Metallurgiya, 1971. 448 с.
14. Ерманок М.З., Ватрушин Л.С. Волочение цветных металлов и сплавов. М.: Metallurgiya, 1988. 288 с.
15. Константинов И.Л., Сидельников С. Б., Иванов Е.В. Прокатно-прессово-волочильное производство: учебник. М.: ИНФРА-М; Красноярск: СФУ, 2022. 511 с.
16. Технологические основы производства проволоки из сплавов алюминия с переходными металлами с применением совмещенных методов термометаллургической обработки: монография / Сидельников С.Б., Ворошилов Д.С., Беспалов В.М. и др. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2025. 208 с.
17. Deformation behavior during hot processing of the alloy of the Al-Mg system economically doped with scandium / Dovzhenko N. N., Rushchits S. V., Dovzhenko I. N., Sidelnikov S. B. [et al.]. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021, 115(7-8), pp. 2571-2579.
18. ГОСТ 7871-2019. Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. М.: Стандартинформ. 2019. 20 с.
- made of steel. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2020;63(6):443-450. (In Russ.)
7. Belov N.A., Alabin A.N. Promising aluminum alloys with zirconium and scandium additives. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals]. 2007;(2):99-106. (In Russ.)
8. Belov N.A. *Fazoviy sostav promyshlennyyh i perspektivnyh alyuminiyevykh splavov: monografiya* [Phase composition of industrial and promising aluminum alloys: monograph]. Moscow: MISiS Publishing House, 2010, 511 p. (In Russ.)
9. Dovzhenko N.N., Rushchits S.V., Dovzhenko I.N., Yurev P.O. Understanding the behaviour of aluminium alloy P-1580 sparingly doped with scandium under hot deformation. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals]. 2019;(9):80-86. (In Russ.)
10. Kartashev M.F., Yurchenko A.N., Grebenkin R.D. et al. Studying the effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of aluminum magnesium-containing alloy 1580 samples obtained by multi-layer surfacing. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020;18(2):38-46. (In Russ.)
11. Zagirov N.N., Loginov Yu.N., Sidelnikov S.B. et al. *Tekhnologicheskie osnovy polucheniya materialov i izdeliy iz syvuchih othodov splavov alyuminiya: monografiya* [Technological bases of obtaining materials and products from bulk aluminum alloy waste: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publishing House, 2019, 204 p. (In Russ.)
12. State standard GOST 4784-2019. Interstate standard. Aluminium and wrought aluminium alloys. Moscow: Standartinform, 2019, 31 p. (In Russ.)
13. Perlin I.L., Ermanok M.Z. *Teoriya volocheniya* [Theory of drawing]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 448 p. (In Russ.)
14. Ermanok M.Z., Vatrushin L.S. *Volochenie Tsvetnykh metallov i splavov* [Drawing of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 288 p. (In Russ.)
15. Konstantinov I.L., Sidelnikov S.B., Ivanov E.V. *Prokatno-pressovo-volochilnoe proizvodstvo: uchebnik* [Rolling, pressing and drawing production: textbook]. Moscow: INFRA-M; Krasnoyarsk: SFU, 2022, 511 p. (In Russ.)
16. Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Bepalov V.M. et al. *Tekhnologicheskie osnovy proizvodstva provoloki iz splavov alyuminiya s perekhodnymi metallami s primeneniem sovmeshchennykh metodov termodeformatsionnoy obrabotki: monografiya* [Technological bases of wire production from aluminum alloys with transition metals using combined methods of thermal deformation treatment: monograph]. Krasnoyarsk: SFU, 2025, 208 p. (In Russ.)
17. Dovzhenko N.N., Rushchits S.V., Dovzhenko I.N., Sidelnikov S.B. et al. Deformation behavior during hot processing of the alloy of the Al-Mg system economically doped with scandium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;115(7-8):2571-2579.
18. State standard GOST 7871-2019. Filler wire of aluminium and aluminium alloys. Specifications. M.: Standartinform, 2019, 20 p. (In Russ.)

References

1. Huang S., Liu P., Mokasdar A., Hou I. Additive manufacturing and its societal impact a literature review. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;(5-6):1191-1203.
2. Fraizer E.W. Metal additive manufacturing: a review. *Journal Mater. Eng. Perform*. 2014;(23):1917-1929.
3. Wang F., Williams S., Colegrove H., Antonysamy A.A. Microstructure and mechanical properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ni-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012;(44):968-977.
4. Clark D., Bache M.R., Whittaker M.T. Shaped metal deposition of a nickel alloy for aero engine applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;(203):439-448.
5. Panchenko O.V., Zhabrev L.A., Kurushkin D.V., Popovich A.A. Macrostructure and mechanical properties of Al-Si, Al-Mg-Si, and Al-Mg – Mn aluminum alloys produced by electric arc additive growth. *Metallovedenie I Termicheskaya Obrabotka Metallov* [Metal Science and Heat Treatment]. 2019;(60):749-754. (In Russ.)
6. Zhatkin S.S., Nikitin K.V., Deev V.B. et al. The use of extruded surfacing to create three-dimensional objects

Поступила 16.06.2025; принята к публикации 17.10.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 16/06/2025; revised 17/10/2025; published 25/12/2025

Сидельников Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Обработка металлов давлением», Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: sbs270359@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5611-2808

Загиров Николай Наильич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Обработка металлов давлением», Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: kafomd_1@mail.ru. ORCID 0000-0003-0144-5063

Иванов Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Обработка металлов давлением», Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: kafomd_1@mail.ru. ORCID 0000-0002-7585-6140

Чукин Михаил Витальевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, НИИ Наносталей, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: m.chukin@mail.ru. ORCID 0000-0003-0331-8105

Безруких Александр Иннокентьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Общая металлургия», Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: ai@bezru.ru. ORCID 0000-0002-0448-9793

Лопатина Екатерина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металловедение и термическая обработка металлов им. В. С. Биронта», Институт цветных металлов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: eslopatina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1604-1857

Sergey B. Sidelnikov – DrSc(Eng.), Professor, Professor of the Department of Pressure Metal Treatment, School of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: sbs270359@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5611-2808

Nikolai N. Zagirov – PhD(Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Pressure Metal Treatment, School of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: kafomd_1@mail.ru. ORCID 0000-0003-0144-5063

Evgeniy V. Ivanov – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Pressure Metal Treatment, School of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: kafomd_1@mail.ru. ORCID 0000-0002-7585-6140

Mikhail V. Chukin – DrSc(Eng.), Professor, Leading Researcher, Research Institute for Nanosteels, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: m.chukin@mail.ru. ORCID 0000-0003-0331-8105

Aleksandr I. Bezrukikh – PhD(Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Metallurgy, School of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: ai@bezru.ru. ORCID 0000-0002-0448-9793

Ekaterina S. Lopatina – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metal Science and Heat Treatment of Metals named after V.S. Biront, School of Non-Ferrous Metals, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: eslopatina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1604-1857

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

УДК 621.74

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-31-39



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗМЕЛЬЧЁННЫХ ОТХОДОВ СИЛИКОНОВЫХ РЕЗИН В КАЧЕСТВЕ РАЗУПРОЧНЯЮЩЕЙ ДОБАВКИ ДЛЯ ЖИДКОСТЕКОВЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СМЕСЕЙ ТЕПЛООВОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ

Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Субботин А.Ю., Титов А.В.

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

Аннотация. Актуальность исследования. В статье описан способ решения одной из актуальных проблем литейного производства – проблемы высокой остаточной прочности жидкостекловых смесей теплового отверждения. **Цель работы.** Практическим путём определить в составе смеси количество измельчённых отходов силиконовых резин, необходимое для её эффективного разупрочнения, и температурно-временной режим тепловой обработки стержней для снижения вероятности образования газовой пористости в отливках и сохранения на высоком уровне основных эксплуатационных свойств жидкостекловых литейных стержней. **Результаты исследования.** Путём проведения испытаний на стандартных образцах определён наилучший режим тепловой обработки жидкостекловых смесей, содержащих в своём составе измельчённые отходы силиконовых резин, состоящий из двух этапов. На первом этапе осуществляется нагрев стержней в сушильной печи при температуре 200°C в течение 15 мин. Второй этап включает в себя нагрев стержней в сушильной печи при температуре 400°C в течение 5,5 мин. Испытания также показали, что для получения наилучшего комплекса эксплуатационных свойств жидкостекловых стержней теплового отверждения для снижения остаточной прочности в смесь нужно добавлять от 2 до 4% (по массе) измельчённых отходов силиконовых резин. **Практическая значимость.** Введение в состав жидкостекловых смесей теплового отверждения измельчённых отходов силиконовых резин позволит изготавливать стержни, обладающие высокой прочностью, хорошей газопроницаемостью, низкой осыпаемостью и остаточной прочностью.

Ключевые слова: отходы производств, стержневая смесь, литейный стержень, жидкостекловная смесь, затруднённая выбиваемость, разупрочняющие добавки

© Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Субботин А.Ю., Титов А.В., 2025

Для цитирования

Использование измельчённых отходов силиконовых резин в качестве разупрочняющей добавки для жидкостекловых стержневых смесей теплового отверждения / Леушин И.О., Вахидов У.Ш., Субботин А.Ю., Титов А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 31-39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-31-39>



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

USING CRUSHED SILICONE RUBBER WASTE AS A SOFTENING ADDITIVE FOR LIQUID GLASS CORE MIXTURES OF HEAT-CURING

Leushin I.O., Vakhidov U.Sh., Subbotin A.Yu., Titov A.V.

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The article describes a solution to one of the urgent problems of foundry production – the problem of high residual strength of liquid glass mixtures of heat-curing. **Objectives.** The research is aimed at practically determining the amount of crushed silicone rubber (CSR) waste in the mixture composition required for its effective softening, and the temperature-time mode of heat treatment of the cores to reduce the likelihood of gas porosity in castings and maintain the main performance properties of liquid glass moulding cores at a high level. **Result.** By testing standard samples, the best mode of heat treatment of liquid glass mixtures containing CSR waste in their composition was determined, consisting of two stages. At the first stage, the cores are heated in a drying furnace at a temperature of 200°C for 15 minutes. The second stage includes heating the cores in a drying furnace at a temperature of 400°C for 5.5 minutes. The tests also showed that in order to obtain the best combination of operational properties of liquid glass cores of heat curing, it is necessary to add from 2 to 4% (by weight) of CSR waste to the mixture to reduce residual strength. **Practical Relevance.** The introduction of CSR waste into the composition of liquid glass heat-curing mixtures will allow the production of cores with high strength, good gas permeability, low crumbling and residual strength.

Keywords: production waste, core sand mixture, moulding core, liquid glass mixture, difficult breakdown, softening additives

For citation

Leushin I.O., Vakhidov U.Sh., Subbotin A.Yu., Titov A.V. Using Crushed Silicone Rubber Waste as a Softening Additive for Liquid Glass Core Mixtures of Heat-Curing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 31-39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-31-39>

Введение. Постановка проблемы

Прочность стержней и форм, изготовленных из жидкостекольных смесей, отверждаемых тепловой сушкой, приблизительно в 5-10 раз превышает прочность стержней из жидкостекольных смесей, отверждаемых продувкой углекислым газом [1]. Поэтому такие смеси применяются для изготовления массивных отливок, когда требуется, чтобы форма и стержни выдерживали большие механические нагрузки в процессе заливки формы и дальнейшего охлаждения отливки. Ещё одна область применения – изготовление средних и мелких отливок со стержнями, имеющими относительно тонкие сечения. В данном случае к стержневой смеси также предъявляется требование сохранять высокую прочность под воздействием усилий, возникающих во время усадки отливки.

Кроме высокой прочности, жидкостекольные смеси, отверждаемые тепловой сушкой, обладают относительно низкой осыпаемостью и хорошей газопроницаемостью. Главный недостаток таких смесей – высокая остаточная прочность и, как следствие, их затруднённая выбиваемость из отливок.

Для снижения остаточной прочности жидкостекольных смесей, отверждаемых тепловой сушкой, так же как и при использовании других способов отверждения, в их состав добавляют различные разупрочняющие компоненты [2, 3].

Например, известна смесь, содержащая 2,75–3,00 мас. % жидкостекольного связующего, 0,08–0,17 мас. %

фенолформальдегидной смолы ФСМ-1, 0,0003–0,003 мас. % сульфата алюминия (сухое вещество), 0,0027–0,027 мас. % воды технической и огнеупорный наполнитель на основе диоксида кремния [4]. После применения тепловой сушки стабилизируется живучесть смеси и улучшается её выбиваемость из отливок. Недостатком смеси является наличие в её составе фенолформальдегидной смолы, при деструкции которой во время заливки формы расплавом и в процессе остывания отливки в атмосферу цеха выделяется SO_2 и другие вредные для здоровья человека вещества.

В качестве ещё одного примера можно привести смесь, содержащую 3-4 мас. % огнеупорной глины, 6-7 мас. % жидкого стекла, 1-2 мас. % фильтропрессового осадка растительного горчичного масла и огнеупорный наполнитель на основе кремнезёма [5]. Добавка разбавленного водой фильтропрессового осадка растительного горчичного масла улучшает выбиваемость смеси из отливок. Однако при этом значительно увеличивается газотворность смеси и её осыпаемость, что повышает риск образования в отливках газовых дефектов, неметаллических включений и засоров.

Предлагаемое решение проблемы

В данной статье представлены результаты исследований, которые доказывают возможность использования измельчённых отходов силиконовых резин (ОСР) для разупрочнения жидкостекольных стержней, отверждённых тепловой сушкой. Эти отходы пред-

ставляют собой частицы силикона фракции 0,3-0,5 мм, полученные методом механического измельчения выведенных из эксплуатации силиконовых форм, использовавшихся для производства изделий из полиуретанов, искусственного декоративного камня и для литья низкотемпературных металлов и сплавов [6].

Ранее авторами статьи уже были разработаны составы жидкостекольных смесей, содержащих в качестве разупрочняющих компонентов добавки измельчённых ОСР [7, 8]. Промышленные испытания доказали их эффективность [9]. Однако эти составы рассчитаны для использования при отверждении смесей продувкой углекислым газом и дальнейшие исследования показали, что их нецелесообразно применять для изготовления жидкостекольных стержней, отверждаемых тепловой сушкой, по причине роста осыпаемости смеси и недостаточно высокого разупрочняющего эффекта. Оптимальная температура сушки жидкостекольных смесей составляет 200°C [10]. Температура начала деструкции поливинилового спирта равна 180°C [11]. Поэтому можно предположить, что причина роста осыпаемости смеси заключается в том, что эластичные плёнки поливинилового спирта, образованные на поверхности зёрен песка, в процессе нагрева смеси во время сушки разрушаются и поверхностный слой стержня частично разупрочняется.

Из литературных источников известно, что остаточная прочность жидкостекольных смесей, отверждаемых тепловой сушкой, выше остаточной прочности смесей, отверждаемых продувкой углекислым газом [12, 13]. Поэтому для эффективного разупрочнения смеси необходимо увеличить в её составе количество разупрочняющей добавки – измельчённых ОСР. Однако при этом растёт вероятность образования газовых дефектов в отливках и осыпаемости смеси.

Авторами данной статьи предлагается решение обозначенных проблем путём добавления в состав жидкостекольных смесей большего количества измельчённых ОСР и применения двухэтапного процесса тепловой обработки стержней.

На первом этапе стержень полностью отверждается при температуре 200°C. При этом частицы измельчённых отходов силиконовых резин не деструктируют (температура деструкции составляет 350°C), их деструкция происходит при прогреве стержня в процессе его заливки расплавом с образованием аморфного диоксида кремния и углекислого газа, разрушающего плёнки связующего на поверхности зёрен кварцевого песка.

На втором этапе осуществляется нагрев поверхности стержня до температуры 350°C. При данной температуре частицы измельчённых отходов силиконовых резин, находящиеся в поверхностном слое стержня, деструктируют с образованием углекислого газа и аморфного диоксида кремния. Таким образом, при дальнейшей заливке формы расплавом вероятность попадания газов в отливку из-за деструкции частиц измельчённых ОСР из более глубоких слоёв

стержня значительно снижается, поскольку на поверхности отливки успеет образоваться прочная корочка затвердевшего металла.

Известно, что температура нагрева жидкостекольных смесей выше 300°C приводит к снижению прочности стержней [14]. Поэтому второй этап тепловой обработки не должен быть слишком длительным. Необходимо, чтобы пониженная прочность поверхностного слоя стержня существенно не снижала его общей прочности.

Материалы, методы исследования, обсуждение результатов

В первой части практической работы были проведены исследования влияния различных режимов нагрева стандартных образцов на их основные эксплуатационные свойства.

Для приготовления смеси использовались следующие материалы: стекло натриевое жидкое с модулем 2,6, плотностью 1,47 г/см³ (ГОСТ 13078-81); песок кварцевый 2К₁О₂02 (ГОСТ 2138-91); глина формовочная ПЗ (ГОСТ 3226-93); измельчённые отходы силиконовых резин.

Стержневая смесь приготавливалась следующим образом. В смеситель модели 02113 загружали кварцевый песок, глину, измельчённые отходы силиконовых резин, предварительно подготовленные с помощью режущей мельницы модели Retsch SM100 (размер частиц составляет 0,5 мм), и перемешивали в течение 3 мин. Затем вводили в смесь жидкое стекло и перемешивали в течение 5 мин. Образцы изготавливались по стандартной методике.

Испытания образцов на прочность, газопроницаемость и осыпаемость проводились по ГОСТ 23409.7-78, ГОСТ 23409.6-78 и ГОСТ 23409.9-78 соответственно.

Для определения остаточной прочности образцы предварительно нагревали в печи до 800°C в течение 1 ч, затем охлаждали на воздухе до 20°C и далее испытывали по методике, определённой ГОСТ 23409.7-78. Таким образом осуществлялась имитация прогрева стержневой смеси при воздействии на неё тепла затвердевающего металла.

Для проведения испытаний использовалась стержневая смесь, содержащая 2,0% измельчённых ОСР (табл. 1, состав №1).

На первом этапе тепловой обработки образцы помещались в сушильную печь с воздушной атмосферой при температуре 200°C на 15 мин. Длительность первого этапа при проведении всех экспериментов оставалась неизменной. Данный температурный режим был выбран в качестве оптимального для достижения максимальной прочности смеси после её отверждения [10].

На втором этапе тепловой обработки образцы помещались в другую сушильную печь с более высокой температурой. Температура варьировалась от 350 до 500°C с шагом 50°C. Время выдержки образцов в

печи варьировалось от 1 до 10 мин с шагом 1 мин. Далее образцы извлекались из сушильного шкафа и охлаждались на воздухе до температуры 20°C. После извлечения образцов из печи на данном этапе они были покрыты белым налётом – тонким слоем аморфного диоксида кремния по причине деструкции

частиц силикона в поверхностном слое стержня. При этом чем выше температура нагрева и больше время выдержки, тем плотнее слой белого налёта. Для его удаления образцы обдували сжатым воздухом.

Результаты первой части практической работы показаны на **рис. 1**.

Таблица 1. Составы стержневых смесей, отверждаемых двухэтапной тепловой обработкой с добавкой измельчённых ОСР

Table 1. Compositions of core mixtures cured by two-stage heat treatment with the addition of CSR waste

Компоненты смеси	Состав смесей, мас. %							
	Базовая смесь	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
Жидкое стекло	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Формовочная глина	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Измельчённые отходы силиконовых резин (размер частиц 0,5 мм)	–	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Кварцевый песок	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.	ост.

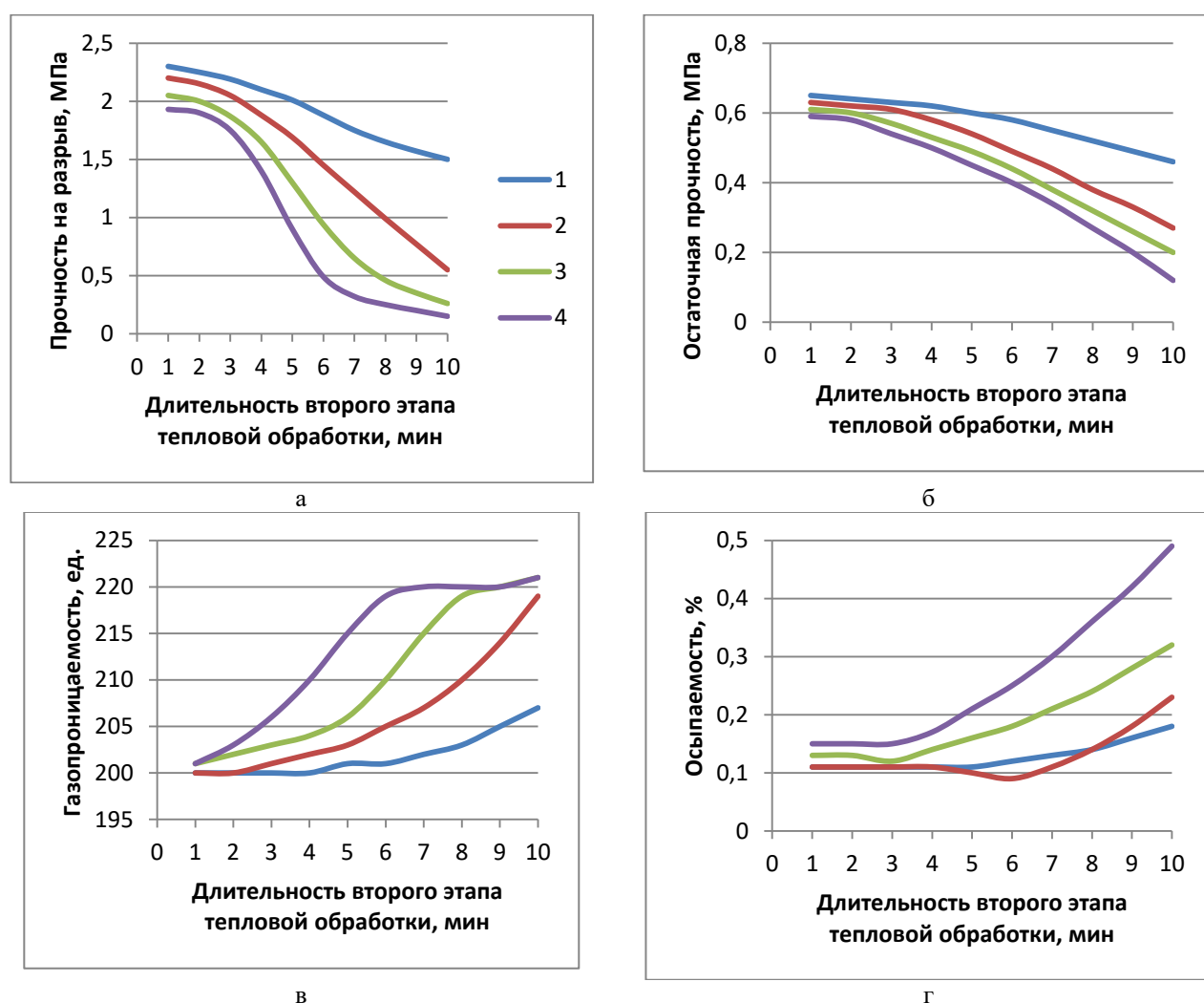


Рис. 1. Влияние температуры и длительности второго этапа тепловой обработки образцов на свойства смеси: 1 – при температуре в печи 350°C; 2 – при температуре в печи 400°C; 3 – при температуре в печи 450°C; 4 – при температуре в печи 500°C

Fig. 1. Influence of temperature and duration of the second stage of heat treatment of samples on the properties of the mixture: 1 is at a temperature in the furnace of 350°C; 2 is at a temperature in the furnace of 400°C; 3 is at a temperature in the furnace of 450°C; 4 is at a temperature in the furnace of 500°C

С ростом времени выдержки образцов в печи на втором этапе тепловой обработки их прочность на разрыв снижается (**рис. 1, а**). При использовании температуры в печи, равной 350°C, и длительности выдержки от 1 до 10 мин прочность уменьшается приблизительно в 1,5 раза. При использовании более высоких температур нагрева прочность снижается значительно быстрее и в большее количество раз. Так, при температуре 400°C прочность уменьшается в 4 раза, при температуре 450°C – в 7,9 раза, при температуре 500°C – в 12,9 раза. Причиной такого существенного падения прочности является то, что разупрочняющая добавка (измельчённые ОСР) «срабатывает» уже на втором этапе тепловой обработки. При этом чем выше температура в печи, тем на большую глубину прогревается образец до температуры «срабатывания» добавки (350°C) и тем больший слой на поверхности образца разупрочняется.

С увеличением температуры тепловой обработки временной интервал наибольшего снижения прочности смещается в сторону меньших значений (влево на **рис.1, а**). Так, при температуре в печи, равной 450°C, наибольшее падение прочности наблюдается во временном интервале от 5 до 8 мин, а при температуре 500°C – в температурном интервале от 4 до 6 мин. Наиболее вероятной причиной этого является то, что при данных температурах именно в этих временных интервалах происходит разупрочнение смеси за счёт деструкции частиц измельчённых ОСР. При дальнейшем увеличении длительности выдержки образцов в печи скорость падения прочности снижается.

С увеличением длительности второго этапа тепловой обработки с 1 до 10 мин остаточная прочность снижается (**рис. 1, б**). При температуре в печи, равной 350°C, этот процесс, вероятно, происходит в основном за счёт того, что ещё на стадии второго этапа сушки в некоторой части связующего – дегидратированного силиката натрия – в процессе усадки появляются трещины, ослабляющие связь между песчинками огнеупорного наполнителя. При этом частицы измельчённых ОСР деструктируют только в небольшом по толщине поверхностном слое образца. Их влияние на снижение остаточной прочности проявляется в полной мере только после повторного нагрева образцов до 800°C при проведении испытаний на остаточную прочность.

При температуре в печи, равной 400°C и выше, снижение остаточной прочности происходит быстрее, особенно при увеличении длительности нагрева. Это объясняется тем, что деструкция частиц разупрочняющей добавки происходит уже во время второго этапа тепловой обработки. При этом чем длительней нагрев, тем большей толщины поверхностный слой прогревается до температуры 350°C, что обеспечивает более сильное разупрочнение за счёт деструкции большего количества частиц измельчённых ОСР. Таким образом, образцы перед проведением испытаний

на остаточную прочность уже обладают малой прочностью. После повторного нагрева до 800°C и остывания образцов эффект разупрочнения усиливается.

С увеличением длительности выдержки образцов в печи на втором этапе тепловой обработки газопроницаемость возрастает (**рис. 1, в**). При использовании температуры нагрева 350°C скорость роста газопроницаемости с увеличением времени обработки невелика. Это можно объяснить тем, что повышение газопроницаемости происходит в основном за счёт роста количества трещин в связующем, образующихся из-за повышения термических напряжений в процессе его усадки.

При температуре в печи, равной 400°C, газопроницаемость с увеличением времени тепловой обработки растёт быстрее, особенно во временном диапазоне от 7 до 10 мин (газопроницаемость возрастает от 207 до 219 ед.). В данном случае это связано не только с увеличением числа микротрещин в связующем, образованных по причине его усадки, но и с тем, что часть образца прогревается до температуры 350°C и выше. Некоторая доля частиц измельчённых ОСР, содержащихся в смеси, деструктирует, под давлением выделяющихся при этом газов увеличивается количество трещин в связующем. Кроме того, в пространстве, изначально занятом частицами силикона, образуются поры, также способствующие росту газопроницаемости смеси.

При температуре в печи, равной 450°C, наблюдается рост газопроницаемости приблизительно с такой же скоростью, как и в случае нагрева образцов в печи с температурой 400°C. Однако рост газопроницаемости начинается раньше – во временном диапазоне от 5 до 8 мин. Далее скорость роста газопроницаемости значительно замедляется. Это можно объяснить тем, что при выдержке образцов в печи более 8 мин при температуре 450°C они полностью прогреваются до температуры 350°C и выше. Таким образом, при дальнейшей выдержке образцов в печи газопроницаемость может расти лишь за счёт увеличения количества трещин в связующем, а этот процесс на данном этапе протекает уже значительно медленнее.

При температуре в печи, равной 500°C, кривая роста газопроницаемости ещё сильнее смещена влево, поскольку процесс прогрева смеси происходит быстрее, что способствует более раннему началу роста газопроницаемости.

Осыпаемость стержней напрямую зависит от их поверхностной прочности. С ростом температуры обработки и с увеличением времени выдержки в печи поверхностная прочность, так же как и общая прочность образцов, снижается, что приводит к росту осыпаемости (**рис. 1, г**).

Для стержневых жидкостекольных смесей, содержащих измельчённые ОСР, на снижение массы образцов при проведении испытаний на осыпаемость оказывают влияние два основных фактора: удаление

частиц силикона, плохо смачивающихся жидким стеклом, из поверхностного слоя стержня и потеря частиц кварцевого песка, недостаточно прочно связанных с другими песчинками посредством связующего материала. Второй этап тепловой обработки необходим для того, чтобы заранее удалить из поверхностного слоя стержня частицы ОСР и тем самым снизить влияние первого фактора.

На рис. 1, г видно, что при увеличении длительности второго этапа тепловой обработки при температуре в печи 400 и 450°C наблюдается некоторое снижение осыпаемости при значениях времени выдержки, равных 6 и 3 мин соответственно. Причиной такого эффекта можно считать доминирующее воздействие первого из указанных выше факторов. При увеличении выдержки образцов в печи главную роль начинает играть второй фактор, и осыпаемость растёт. При температуре в печи, равной 350°C, снижения осыпаемости не происходит, вероятно, по причине того, что образцы за всё время проведения эксперимента (10 мин) не успевают прогреться настолько, чтобы этот эффект был замечен. При температуре в печи, равной 500°C, и выдержках времени до 3 мин осыпаемость практически не изменяется. Причиной этого может быть то, что снижение осыпаемости за счёт предварительного удаления частиц силикона с поверхности образца полностью компенсируется ростом осыпаемости за счёт потери частиц песка из-за снижения прочности связующего материала. При увеличении длительности выдержки образцов в печи их осыпаемость растёт.

Задача второго этапа тепловой обработки заключается в том, чтобы частицы силикона, расположенные в поверхностном слое стержня, разрушили, что при дальнейшем использовании стержней гарантировало бы невозможность образования газовых дефектов в отливках из-за наличия в смеси измельчённых ОСР. При этом температурно-временной режим обработки должен быть таким, чтобы общая прочность стержня оставалась на высоком уровне, а остаточная прочность и осыпаемость, наоборот, на низком.

Как уже было сказано выше, одним из главных преимуществ жидкостекольных стержневых смесей, отверждаемых тепловой обработкой, является их высокая прочность. Поэтому при выборе температурно-временного режима второго этапа тепловой обработки в качестве главного критерия оценки было выбрано условие, чтобы прочность на разрыв была не ниже 1,5 МПа. При этом осыпаемость не должна превышать 0,2%, а остаточная прочность быть ниже 0,5 МПа. Газопроницаемость в качестве критерия оценки не учитывалась, поскольку даже при минимальном времени выдержки образцов в печи её значение было вполне удовлетворительным (200 ед.) и при увеличении длительности нагрева образцов газопроницаемость только возрастала.

Прочности на разрыв, равной 1,5 МПа, и двум другим перечисленным критериям соответствуют следующие режимы тепловой обработки:

1. Температура в печи – 350°C, длительность нагрева образцов – 10 мин.
2. Температура в печи – 400°C, длительность нагрева образцов – 5,5 мин.
3. Температура в печи – 450°C, длительность нагрева образцов – 4,5 мин.
4. Температура в печи – 500°C, длительность нагрева образцов – 3,5 мин.

Остаточная прочность образцов при всех перечисленных режимах тепловой обработки приблизительно одинакова и находится на уровне 0,5 МПа. При этом наименьшей осыпаемостью обладают образцы, обработанные по второму режиму.

Таким образом, для дальнейших исследований был выбран следующий температурно-временной режим второго этапа тепловой обработки образцов: температура в печи – 400°C, длительность выдержки образцов – 5,5 мин.

Во второй части практической работы были проведены исследования влияния различных количеств измельчённых ОСР в составе жидкостекольной смеси на основные эксплуатационные свойства стандартных образцов, изготовленных по описанной выше методике и отверждённых с помощью двухэтапного процесса тепловой обработки. Первый этап – нагрев образцов при температуре в печи 200°C в течение 15 мин, второй этап – нагрев образцов при температуре в печи 400°C в течение 5,5 мин.

При проведении исследований использовались семь составов смесей, в которых варьировалось только содержание измельчённых ОСР, и базовая смесь без добавки измельчённых ОСР (см. табл. 1). Для отверждения базовой смеси применялся только первый этап тепловой обработки. Для оценки влияния добавления в состав базовой смеси различных количеств разупрочняющей добавки – измельчённых ОСР – на появление газовой пористости была изготовлена пробная партия отливок из сплава АК7ч.

Результаты исследований (табл. 2) показали, что с ростом содержания измельчённых ОСР в составе смесей их прочность на разрыв снижается в 1,5–1,7 раза по сравнению с базовой смесью, однако уровень прочности остаётся высоким (в среднем 1,5 МПа). При этом остаточная прочность образцов при добавлении в базовую смесь 2% измельчённых ОСР снижается в 5,4 раза. С увеличением количества разупрочняющей добавки до 5% остаточная прочность снижается ещё в 2,3 раза.

С повышением количества измельчённых ОСР в смеси её газопроницаемость незначительно увеличивается. Вероятно, это связано с тем, что растёт пористость поверхностного слоя образца при проведении второго этапа тепловой обработки.

Таблица 2. Характеристики стержневых смесей с добавкой измельчённых ОСР после их отверждения двухэтапной тепловой обработкой

Table 2. Characteristics of core mixtures with the addition of CSR waste after their curing by two-stage heat treatment

Характеристики смесей	Исследуемая смесь							
	Базовая смесь	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
Предел прочности на разрыв в отверждённом состоянии, МПа	2,4	1,57	1,56	1,54	1,52	1,50	1,47	1,43
Газопроницаемость, ед.	203	204	204	205	205	205	206	206
Осыпаемость, %	0,10	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,18	0,20
Остаточная прочность после прокалки образцов при температуре 800°C, МПа	2,8	0,52	0,48	0,44	0,39	0,34	0,29	0,23
Газовая пористость в отливке	нет	нет	нет	нет	нет	нет	есть	есть

Осыпаемость смеси, содержащей 2% измельчённых ОСР, увеличивается 1,4 раза по сравнению с базовой смесью. При дальнейшем повышении содержания измельчённых ОСР в смеси осыпаемость продолжает расти, но с меньшей скоростью.

Качество поверхности (шероховатость) полостей в отливках, оформляемых стержнями, заметно снижается при содержании ОСР в смеси в количестве 4,5% и выше. При этом в отливках также появляется пористость (см. табл. 2, составы №6 и 7).

Выводы

Проведённые экспериментальные работы показали, что при добавлении в состав жидкостекольной стержневой смеси от 2 до 4% измельчённых ОСР и применении двухэтапного процесса тепловой обработки удаётся значительно снизить остаточную прочность, сохранив при этом на высоком уровне другие эксплуатационные характеристики смеси.

Качество поверхности стержней, а соответственно, и качество поверхности отливок можно повысить путём применения различных стержневых красок, поскольку ОСР инертны ко многим материалам, используемым для их приготовления.

Деструкция частиц измельчённых ОСР в поверхностном слое стержня на втором этапе тепловой обработки приводит к увеличению его пористости, что, в свою очередь, может улучшить податливость стержня. С другой стороны, по той же причине на поверхности отливок может образоваться дефект – механический пригар. Проверка высказанных предположений, особенно в отношении литья высокотемпературных сплавов, требует проведения дополнительных исследований.

Список источников

1. Лясс А.М. Быстротвердеющие формовочные смеси. М.: Машиностроение, 1965. 329 с.
2. Берг П.П. Формовочные материалы. М.: Машгиз, 1963. 408 с.

3. Бречко А.А., Великанов Г.Ф. Формовочные и стержневые смеси с заданными свойствами. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. 216 с.
4. Пат. 2151018 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Смесь для изготовления литейных форм и стержней (варианты) / В.Г. Гурлев, В.А. Смолко, Ю.С. Дворяшина, Б.Н. Виноградов, В.В. Пакулев; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. № 99113003/02; заявл. 21.06.1999; опубл. 20.06.1999.
5. Пат. 2472598 Российская Федерация, МПК В22С 1/00. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / Н.А. Кидалов, Н.А. Осипова, Д.В. Шумихин, И.Е. Поташова, Д.О. Алиев, И.В. Киселев; патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет» (ВолГТУ). №2011134128/02; заявл. 12.08.2011; опубл. 20.01.2013.
6. Оценка возможности применения измельчённых отходов силиконовых резин в качестве разупрочняющей добавки для жидкостекольных стержневых смесей / И.О. Леушин, А.В. Титов, С.Р. Ракитин // Литейное производство. 2023. №1. С. 18–22.
7. Пат. 2793659 Российская Федерация, МПК В22С 1/10, 1/18. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / И.О. Леушин, А.В. Титов, С.Р. Ракитин; патентообладатель: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ). №2022132436; заявл. 12.12.2022; опубл. 04.04.2023.
8. Пат. 2813028 Российская Федерация, МПК В22С 1/10, 1/18. Смесь для изготовления литейных форм и стержней и способ её приготовления / И.О. Леушин, А.В. Титов, С.Р. Ракитин; патентообладатель: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ). №2023131183; заявл. 29.11.2023; опубл. 06.02.2024.
9. Леушин И.О., Титов А.В., Ракитин С.Р. Практические испытания легковывиваемой стержневой смеси, содержащей измельчённые отходы силиконовых резин // Литейное производство. 2024. №1. С. 20–23.
10. Изготовление отливок с применением быстротвердеющих смесей на жидком стекле // Конспекты до-

- кладов научно-производственной конференции / под ред. А.М. Лясса. М., 1958. 470 с.
11. ГОСТ 10779-78. Спирт поливиниловый. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1978. 23 с.
 12. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.
 13. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник / А.Н. Болдин, Н.И. Давыдов, С.С. Жуковский и др. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.
 14. Формовочные материалы и технология литейной формы: справочник / С.С. Жуковский, Г.А. Анисович, Н.И. Давыдов и др. М.: Машиностроение, 1993. 432 с.
- References**
1. Lyass A.M. *Bystrotverdeyushchie formovochnye smesi* [Fast-hardening molding mixtures]. Moscow: Mashinostroenie, 1965, 329 p. (In Russ.)
 2. Berg P.P. *Formovochnye materialy* [Molding materials]. Moscow: Mashgiz, 1963, 408 p. (In Russ.)
 3. Brechko A.A., Velikanov G.F. *Formovochnye i sterzhnevye smesi s zadannymi svoystvami* [Molding and core mixtures with specified properties]. Leningrad: Mashinostroenie, Leningrad Branch, 1982, 216 p. (In Russ.)
 4. Gurlev V.G., Smolko V.A., Dvoryashina Yu.S., Vinogradov B.N., Pakulev V.V. *Smes dlya izgotovleniya liteinykh form i sterzhney (varianty)* [Mixture for the manufacture of casting molds and cores (variants)]. Patent RU, no. 2151018, 1999.
 5. Kidalov N.A., Osipova N.A., Shumikhin D.V., Potashova I.E., Aliev D.O., Kiselev I.V. *Smes dlya izgotovleniya liteinykh form i sterzhney* [Mixture for the production of casting molds and cores]. Patent RU, no. 2472598, 2013.
 6. Leushin I.O., Titov A.V., Rakitin S.R. Evaluation of the possibility of using crushed silicone rubber waste as a softening additive for liquid glass core mixtures. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry production]. 2023;(1):18-22. (In Russ.)
 7. Leushin I.O., Titov A.V., Rakitin S.R. *Smes dlya izgotovleniya liteinykh form i sterzhney* [Mixture for the manufacture of casting molds and cores]. Patent RU, no. 2793659, 2023.
 8. Leushin I.O., Titov A.V., Rakitin S.R. *Smes dlya izgotovleniya liteinykh form i sterzhney i sposob eyo prigotovleniya* [Mixture for the manufacture of casting molds and cores and the method for its preparation]. Patent RU, no. 2813028, 2024.
 9. Leushin I.O., Titov A.V., Rakitin S.R. Practical tests of an easily knocked-out core mixture containing crushed silicone rubber waste. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry production]. 2024;(1):20-23. (In Russ.)
 10. Lyass A.M. Manufacturing of castings using quick-hardening mixtures on liquid glass. *Konspekty dokladov nauchno-proizvodstvennoy konferentsii* [Abstracts of reports of the scientific and production conference]. Moscow, 1958, 470 p. (In Russ.)
 11. State standard GOST 10779-78. Polyvinyl alcohol. Specifications. Moscow: Standards Publishing House, 1978, 23 p. (In Russ.)
 12. Zhukovsky S.S. *Prochnost liteinoy formy* [Strength of the casting mold]. Moscow: Mechanical engineering, 1989, 288 p. (In Russ.)
 13. Boldin A.N., Davydov N.I., Zhukovsky S.S. et al. *Liteinye formovochnye materialy. Formovochnye, sterzhnevye smesi i pokrytiya: spravochnik* [Foundry molding materials. Molding, core mixtures and coatings: reference book]. Moscow: Mechanical Engineering, 2006, 507 p. (In Russ.)
 14. Zhukovsky S.S., Anisovich G.A., Davydov N.I. et al. *Formovochnye materialy i tekhnologiya liteinoy formy: spravochnik* [Molding materials and casting mold technology: reference book]. Moscow: Mechanical Engineering, 1993, 432 p. (In Russ.)

Поступила 27.05.2025; принята к публикации 04.07.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 27/05/2025; revised 04/07/2025; published 25/12/2025

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

Вахидов Умар Шахидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
E-mail: umar-vahidov@mail.ru

Субботин Андрей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология электрохимических производств и химия органических веществ», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
E-mail: an_s_temp@mail.ru

Титов Андрей Вячеславович – старший преподаватель кафедры «Металлургические технологии и оборудование», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
E-mail: andavt95@rambler.ru

Igor O. Leushin – DrSc(Eng.), Professor, Head of the Department of Metallurgical Technologies and Equipment, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
E-mail: igoleu@yandex.ru

Umar Sh. Vakhidov – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Construction and Road Machines, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
E-mail: umar-vahidov@mail.ru

Andrey Yu. Subbotin – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology of Electrochemical Production and Chemistry of Organic Substances, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
E-mail: an_s_temp@mail.ru

Andrey V. Titov – Senior Lecturer of the Department of Metallurgical Technologies and Equipment, Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
E-mail: andavt95@rambler.ru

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

УДК 628.16

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-40-47



ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДОВ НА КАЧЕСТВО ПРОЦЕССА ВОДООЧИСТКИ

Копьёва М.А., Остапенко М.С., Тверяков А.М.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Аннотация. В статье рассматривается анализ материалов для электродов электролизёра в контексте управления качеством процессов водоочистки. Оценены три основных материала, применяемых для изготовления электродов: титан, сталь и алюминий. В рамках работы проведён сравнительный анализ их коррозионной стойкости, стабильности в процессе электролиза и эффективности использования в условиях длительного воздействия электрического тока. Акцент сделан на исследование влияния этих факторов на стабильность работы оборудования и качество очистки воды. В результате анализа было установлено, что алюминий демонстрирует наилучшую стабильность работы и минимальное стандартное отклонение, что делает его предпочтительным материалом для использования в электролизёре. В то же время титан может быть эффективным в специфических условиях, требующих высокой коррозионной стойкости. Сталь может применяться в слабоагрессивных условиях и демонстрировать хорошие экономические показатели. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что правильный выбор материала для электродов электролизёра способствует улучшению качества процесса водоочистки и повышению надёжности работы станций. Результаты работы, приведенные в данной статье, будут полезны для дальнейшего совершенствования технологий и разработки более эффективных решений в системах водоочистки.

Ключевые слова: управление качеством, станция водоочистки, электролизёр, материалы электродов, титан, сталь, алюминий, коррозионная стойкость, электролиз, экспериментальные исследования, математическое моделирование, стабильность процесса, выбор материалов, нанотехнологии в очистке воды, статистический анализ, стандартное отклонение

© Копьёва М.А., Остапенко М.С., Тверяков А.М., 2025

Для цитирования

Копьёва М.А., Остапенко М.С., Тверяков А.М. Влияние материала электродов на качество процесса водоочистки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 40-47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-40-47>



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

INFLUENCE OF ELECTRODE MATERIALS ON THE QUALITY OF THE WATER TREATMENT PROCESS

Kopyova M.A., Ostapenko M.S., Tveryakov A.M.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. This article presents an analysis of electrode materials used in electrolyzers in the context of quality management for water treatment processes. Three primary materials such as titanium, steel, and aluminum commonly utilized for electrode manufacturing are evaluated. The study includes a comparative assessment of their corrosion resistance, operational stability during electrolysis, and long-term performance under continuous electric current exposure. The focus is placed on examining how these factors influence equipment reliability and water purification quality. The analysis revealed that aluminum provides the best operational stability and the lowest standard deviation, making it the most suitable material for electrolyzer electrodes. At the same time, titanium may be effective under specific conditions that require high corrosion resistance, while steel can be used in mildly aggressive environments and offers favorable economic characteristics. The findings suggest that selecting the appropriate electrode material significantly enhances the quality of water treatment processes and the reliability of treatment plants. The results presented in this study will be valuable for further advancement of technologies and the development of more efficient water purification solutions.

Keywords: quality management, water treatment plant, electrolyzer, electrode materials, titanium, steel, aluminum, corrosion resistance, electrolysis, experimental research, mathematical modeling, process stability, material selection, water purification nanotechnology, statistical analysis, standard deviation

For citation

Kopyova M.A., Ostapenko M.S., Tveryakov A.M. Influence of electrode materials on the quality of the water treatment process. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 40-47. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-40-47>

Введение

Управление качеством в процессе разработки и эксплуатации станций водоочистки играет ключевую роль в обеспечении их эффективности, долговечности и экологической безопасности. Важнейшим аспектом этого процесса является выбор материалов для составных частей оборудования, которые напрямую влияют на стабильность работы и конечный результат очистки воды. Одним из таких элементов является электрод электролизёра – компонент, участвующий в процессе электролиза воды.

Применение метода электролиза в водоочистных станциях требует использования материалов, которые обладают высокой устойчивостью к коррозии и долговечностью в условиях постоянного электрического воздействия. Кроме того, стабильность работы электродов напрямую влияет на эффективность очистки, так как от их состояния зависит стабильность процессов, таких как осаждение металлов, удаление загрязняющих веществ и другие химические реакции, происходящие в ходе электролиза. Важно понимать, что при длительном использовании электродов материалы подвергаются разрушению, что приводит к снижению их эффективности и, как следствие, ухудшению качества очистки воды. Это обуславливает применение материалов, свойства которых в течение длительного времени обеспечивают стабильность характеристик.

Для обеспечения качества необходимо учитывать не только химические и физические свойства материалов, но и их влияние на общую производительность и экономическую эффективность установки. Технология выбора материалов для электродов электролизёра включает в себя несколько важных факторов, среди которых ключевыми являются скорость коррозии, стабильность электродных характеристик в процессе работы, а также экономичность использования материалов с учётом их стоимости и срока службы. Важно, чтобы материал, используемый для электродов, не только обеспечивал эффективный процесс очистки воды, но и минимизировал затраты на его обслуживание и замену, а также гарантировал высокую экологичность при эксплуатации.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа таких материалов, как титан, сталь и алюминий, для их использования в качестве электродов в процессах водоочистки. Исследование направлено на оценку коррозионной стойкости, стабильности работы и эффективности этих материалов при длительном воздействии электрического тока в агрессивной среде электролиза. Особое внимание уделяется вопросам стабильности работы электродов и их долговечности, так как эти факторы напрямую влияют на стабильность процесса очистки и качество воды, получаемой в результате обработки.

Для реализации цели работы был проведён комплексный анализ теоретических и эксперименталь-

ных данных. В исследовании рассматриваются как основные теоретические аспекты, связанные с использованием электродов в процессе электролиза, так и результаты экспериментальных испытаний, в ходе которых были изучены характеристики различных материалов, их поведение при длительном воздействии в условиях электролиза. В результате на основе полученных данных будут даны рекомендации по выбору материалов электродов, обеспечивающих требуемый уровень стабильности работы станций и качество очистки воды.

Важность исследования заключается не только в теоретическом осмыслении выбора материалов для электродов, но и в практическом применении полученных данных для оптимизации работы водоочистных станций, улучшения их экономической эффективности и обеспечения высокой степени очистки воды, что способствует безопасному и экологичному водоснабжению.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является материал электродов электролизёра станции очистки воды. Исходя из условий работы электродов, в настоящее время используются титан, сталь и алюминий. Каждый из этих материалов обладает уникальными физико-химическими свойствами, которые влияют на эффективность процесса очистки воды.

Титан был выбран в качестве одного из материалов для исследования, поскольку он обладает высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, что делает его идеальным для использования в системах водоочистки, где вода может содержать различные кислоты, соли и другие химические вещества. Титановые электроды имеют продолжительный срок службы и стабильную работу даже при высоких значениях напряжения, что делает их крайне эффективными в процессе электролиза. Однако их высокая стоимость и сложность производства ограничивают их массовое применение.

Нержавеющая сталь была выбрана из-за доступности данного материала. Хотя сталь подвержена коррозии, она все же применяется в некоторых системах водоочистки благодаря своей прочности и долговечности в менее агрессивных условиях. Стальные электроды могут эффективно работать в средах с умеренным содержанием загрязнителей, однако их срок службы ограничен из-за повышенной склонности к коррозии (в 2-3 раза меньше титановых), что может существенно снизить эффективность очистки.

Алюминий был выбран из-за невысокой стоимости и хорошей проводимости. Несмотря на то, что алюминий более подвержен коррозии по сравнению с титаном, его использование в некоторых водоочистных установках может быть экономически оправдано. Алюминиевые электроды также часто используются в сочетании с другими материалами для повышения их долговечности и эффективности.

Для оценки эффективности электролиза с использованием различных типов электродов в данном исследовании используются теоретические и экспериментальные методы.

Теоретические методы. В рамках данного исследования теоретический подход направлен на моделирование процессов, происходящих в системе электролиза, с учетом различных типов электродов (титан, сталь, алюминий). Моделирование основано на известных математических законах, описывающих химические реакции и физические явления, связанные с электролизом воды. Для оценки влияния различных факторов на эффективность процесса очистки воды использовались математические модели, а также теоретические вычисления, основанные на законах Фарадея и других физических принципах.

Статистический анализ. Для статистического анализа можем использовать методы, такие как среднее значение, стандартное отклонение и дисперсия, чтобы оценить вариации в результатах для каждого материала. Для этого нужно иметь несколько повторных измерений (в нашем случае были проведены пять экспериментов для каждого материала).

Если мы проведем пять экспериментов для титана, получим следующие результаты по массе меди, выделяющейся на катоде:

– среднее значение массы меди для титана

$$M_{\text{ср}} = \frac{23,70 + 23,72 + 23,71 + 23,69 + 23,73}{5} = 23,71 \text{ г};$$

– стандартное отклонение массы меди для титана

$$\sigma = \sqrt{\frac{(23,70 - 23,71)^2 + (23,72 - 23,71)^2 + (23,71 - 23,71)^2 + (23,69 - 23,71)^2 + (23,73 - 23,71)^2}{5 - 1}} = 0,021 \text{ г}.$$

Сталь:

– среднее значение массы меди 23,57 г;

– стандартное отклонение 0,021 г.

Алюминий:

– среднее значение массы меди 23,61 г;

– стандартное отклонение 0,014 г.

Анализ стабильности. Титан и сталь имеют одинаковое стандартное отклонение (0,021 г), что свидетельствует о высокой стабильности результатов и минимальной вариативности в процессе электролиза.

Алюминий имеет меньшее стандартное отклонение (0,014 г), что указывает на ещё более низкую вариативность и более стабильные результаты по сравнению с титановыми и стальными электродами.

Таким образом, алюминий продемонстрировал наиболее стабильные результаты в процессе электролиза, что делает его предпочтительным с точки зрения стабильности, несмотря на то, что его коррозионная стойкость может быть ниже по сравнению с титаном [6].

Математическое моделирование процессов электролиза. Процесс электролиза воды с загрязняющими веществами можно описать с помощью уравнений, основанных на законе Фарадея, который связывает количество выделенного вещества с количеством электрического заряда:

$$m = \frac{MIt}{nF}, \quad (1)$$

где m – масса вещества, выделяющегося на электроде, г; M – молекулярная масса вещества, г/моль; I – сила тока, А; t – время электролиза, с; n – количество электронов, участвующих в реакции (для каждого вещества); F – постоянная Фарадея (96,485 Кл/моль).

Для разных типов загрязнителей (например, тяжёлых металлов, органических веществ) моделирование проводится с учетом их химических свойств, что позволяет предсказать их удаление в зависимости от времени воздействия и силы тока.

Система уравнений для описания процесса может включать следующие дополнительные аспекты:

- уравнения для расчета плотности тока на поверхности электродов;
- модели, учитывающие диффузию загрязняющих веществ и их реакцию на поверхности электродов;
- уравнения, учитывающие влияние температуры и pH раствора на скорость реакции.

В рамках математического моделирования также учитывается тип электродного материала и его проводимость, что существенно влияет на эффективность процесса.

Результаты математического моделирования.

Исходные экспериментальные данные:

Материал	Средняя масса меди, г	Стандартное отклонение, г
Титан	23,71	0,021
Сталь	23,57	0,021
Алюминий	23,61	0,014

Расчёт коэффициента вариации CV производится по формуле

$$CV = \left(\frac{\sigma}{M} \right) \cdot 100\%. \quad (2)$$

Титан:

$$CV = \left(\frac{0,021}{23,71} \right) \cdot 100\% = 0,0886\%.$$

Сталь:

$$CV = \left(\frac{0,021}{23,57} \right) \cdot 100\% = 0,0891\%.$$

Алюминий:

$$CV = \left(\frac{0,014}{23,61} \right) \cdot 100\% = 0,0593\%.$$

Доверительный интервал рассчитывается по формуле

$$CI = M \pm t_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3)$$

Титан:

$$CI = 23,71 \pm 2,776 \cdot \frac{0,021}{\sqrt{5}} = 23,71 \pm 0,026.$$

Сталь:

$$CI = 23,57 \pm 2,776 \cdot \frac{0,021}{\sqrt{5}} = 23,57 \pm 0,026.$$

Алюминий:

$$CI = 23,61 \pm 2,776 \cdot \frac{0,014}{\sqrt{5}} = 23,61 \pm 0,026.$$

Все три материала обеспечивают высокую стабильность процесса осаждения меди, при этом титан и сталь практически совпали по величине коэффициента вариации (около 0,089%).

Алюминий показал наименьший коэффициент вариации (0,0593%) и самый узкий доверительный интервал, что указывает на высочайшую стабильность и воспроизводимость результатов.

С точки зрения математической надёжности, алюминиевые электроды обеспечивают минимальные колебания массы осаждённой меди, что делает их предпочтительными в системах, где критически важна стабильность процесса [1].

Расчет коррозионной стойкости электродов.

Коррозионная стойкость материалов определяется их скоростью коррозии, которая описывает, как быстро материал разрушается в определённых условиях (например, в растворе электролита) [2, 7].

Основные параметры, влияющие на коррозионную стойкость, включают:

- ток коррозии I_{corr} — ток, который протекает через поверхность материала в процессе коррозии [5];
- плотность тока коррозии j_{corr} — плотность тока, ассоциированного с процессом коррозии;
- скорость коррозии V_{corr} — скорость разрушения материала (например, в мкм в год).

Для расчёта скорости коррозии алюминия и титана используют формулу

$$V_{corr} = \frac{I_{corr} \cdot M}{n \cdot F \cdot \rho}. \quad (4)$$

Сталь:

Ток коррозии $I_{corr} = 1,0$ мА.

Молекулярная масса стали $M \approx 55,85$ г/моль.

Количество электронов для реакции коррозии $n = 2$.

Постоянная Фарадея $F = 96,485$ Кл/моль.
Плотность стали $\rho = 7,85$ г/см.
Скорость коррозии для стали 0,0055 мм/год.

Алюминий:

Ток коррозии $I_{corr} = 0,5$ мА.
Молекулярная масса $M = 26,98$ г/моль.
Количество электронов для реакции коррозии $n = 3$.
Постоянная Фарадея $F = 96,485$ Кл/моль.
Плотность алюминия $\rho = 2,70$ г/см³.
Скорость коррозии для алюминия 0,0173 мм/год.

Титан:

Ток коррозии $I_{corr} = 0,1$ мА.
Молекулярная масса $M = 47,87$ г/моль.
Количество электронов для реакции коррозии $n = 2$.
Постоянная Фарадея $F = 96,485$ Кл/моль.
Плотность титана $\rho = 4,506$ г/см³.
Скорость коррозии для титана 0,0055 мм/год.

Эти результаты предполагают, что токи коррозии для алюминия и титана составляют 0,5 и 0,1 мА соответственно и что материалы подвергаются коррозии в условиях, аналогичных тем, которые мы использовали для стали [12].

Алюминий имеет меньшую скорость коррозии по сравнению с титаном.

Титан является очень коррозионностойким материалом, но в данном расчёте его скорость коррозии (в наших условиях) всё-таки немного больше, чем у алюминия. Причина этого может быть связана с условиями, в частности с типом электролита, который может по-разному воздействовать на материалы [5].

Результаты теоретических расчетов. На основе проведенного математического моделирования и расчетов можно выделить несколько ключевых результатов.

Влияние материала электрода на эффективность процесса очистки:

- Титановые электроды продемонстрировали наибольшую эффективность в удалении тяжелых металлов и органических веществ благодаря высокой коррозионной стойкости и стабильности в течение длительного времени эксплуатации. Однако их высокая стоимость ограничивает их применение в массовых установках.

- Стальные электроды, несмотря на более низкую стоимость, продемонстрировали значительно худшие результаты по долговечности, с более быстрым развитием коррозии, что снижает эффективность очистки с течением времени.

- Алюминиевые электроды показали хорошее сочетание доступности и эффективности, но они потребовали более строгого контроля за эксплуатационными условиями, чтобы минимизировать коррозию.

Экспериментальные методы. Мы сосредоточим внимание на измерении эффективности электролиза воды с различными электродами (титан, сталь, алюминий) и оценке их свойств, таких как коррозионная стойкость, проводимость и масса выделяющегося вещества.

Оборудование и материалы:

- электролизёр с возможностью регулирования силы тока и времени работы;

- электроды: титановые, стальные и алюминиевые;

- электролит: раствор меди (CuSO_4), концентрация 1 моль/л;

- источник питания с регулируемой силой тока (10 А);

- время электролиза 2 ч (7200 с);

- концентратор загрязняющих веществ: медь (Cu), в качестве примера загрязнителя;

- весы для измерения массы меди, выделяющейся на электроде;

- амперметр и вольтметр для контроля тока и напряжения в процессе электролиза.

Подготовка эксперимента: для начала приготовим раствор меди с концентрацией 1 моль/л. Для этого растворяем 63,55 г медного купороса (CuSO_4) в 1 л дистиллированной воды. Это обеспечит нам необходимую концентрацию меди в растворе для проведения эксперимента.

Установка электродов: устанавливаем три пары электродов в электролизёр: титановый, стальной и алюминиевый электроды. Все электроды имеют одинаковую площадь поперечного сечения (0,01 м²) и длину (0,2 м).

Установка условий: устанавливаем следующие параметры для эксперимента:

- сила тока 10 А;

- время электролиза 7200 с (2 ч);

- концентрация раствора 1 моль/л CuSO_4 .

Экспериментальная установка и проведение эксперимента: запускаем электролиз с силой тока 10 А и фиксируем время (7200 с).

В процессе электролиза медь будет выделяться на катодах каждого из электродов. Мы будем измерять массу меди, выделяющейся на электроде, с использованием точных весов.

Для расчета массы меди, выделяющейся на катоде, используется формула Фарадея:

$$m = \frac{MI}{nF}, \quad (5)$$

где M – молекулярная масса меди (63,55 г/моль); I – сила тока (10 А); t – время электролиза (7200 с); n – количество электронов, участвующих в реакции (для меди $n = 2$); F – постоянная Фарадея (96 485 Кл/моль).

Подставляем данные:

$$m = \frac{63,55 \cdot 10 \cdot 7200}{2 \cdot 96485} = 23,71 \text{ г.}$$

Таким образом, масса меди, выделяющаяся на катодах каждого из электродов, составит 23,71 г для всех типов электродов (титан, сталь, алюминий).

Во время эксперимента будем измерять электрическое сопротивление материалов с помощью амперметра и вольтметра. Сопротивление для каждого типа электрода рассчитывается по формуле

$$R = \frac{\rho L}{A}, \quad (6)$$

где ρ – удельное сопротивление материала; L – длина материала (0,2 м); A – площадь поперечного сечения (0,01 м²).

Для титана

$$R_T = \frac{0,000057 \cdot 0,2}{0,01} = 0,00114 \text{ Ом.}$$

Для стали

$$R_S = \frac{0,00089 \cdot 0,2}{0,01} = 0,0178 \text{ Ом.}$$

Для алюминия

$$R_{Al} = \frac{0,000026 \cdot 0,2}{0,01} = 0,00052 \text{ Ом.}$$

Во время эксперимента также будем фиксировать напряжение и ток для каждого типа электрода с помощью амперметра и вольтметра. Эти данные позволят оценить, как изменяется напряжение и ток в процессе электролиза для каждого материала.

После завершения эксперимента каждый электрод будет осмотрен на наличие коррозионных повреждений. Мы оценим степень коррозии для каждого материала, что поможет в дальнейшем анализе долговечности электродов.

Масса меди, выделяющаяся на катоде, как мы уже рассчитали, составит 23,71 г для каждого типа материала.

Электрическое сопротивление:

- титан: 0,00114 Ом;
- сталь: 0,0178 Ом;
- алюминий: 0,00052 Ом.

Для анализа данных, полученных в ходе эксперимента, можно использовать несколько статистических и математических методов, чтобы провести всестороннюю оценку эффективности работы различных материалов (титан, сталь и алюминий) в процессе электролиза. Рассмотрим основные этапы анализа данных с конкретными цифрами:

– *Оценка эффективности электролиза.* Масса выделяющегося вещества: мы уже рассчитали массу меди, выделяющуюся на катодах каждого из электродов. Теперь проведем анализ этого параметра, чтобы оценить его эффективность для разных типов электродов. Масса меди m для всех материалов была рассчитана по формуле Фарадея. Таким образом, масса меди, выделяющаяся на катодах, одинакова для всех электродов и составляет 23,71 г. Это подтверждает, что процесс электролиза зависит от силы тока, времени и числа электронов, а не от материала электрода. Но для оценки эффективности электролиза нам также нужно учесть другие факторы, такие как проводимость и коррозия.

– *Анализ электрического сопротивления.* Как мы рассчитали ранее, сопротивление для каждого материала отличается:

- титан: 0,00114 Ом;

- сталь: 0,0178 Ом;
- алюминий: 0,00052 Ом.

Эти данные о сопротивлении можно проанализировать с точки зрения эффективности электролиза. Меньшее сопротивление означает большую проводимость и, соответственно, меньшую потерю энергии в виде тепла, что может привести к более эффективно процессу электролиза.

Для анализа мы можем рассчитать потери мощности, используя формулу

$$P = I^2 R, \quad (7)$$

где P – мощность, теряемая на сопротивлении, Вт; I – сила тока (10 А); R – сопротивление материала, Ом.

Теперь рассчитаем потери мощности для каждого материала:

– Титан:

$$P_T = 10^2 \cdot 0,00114 = 0,114 \text{ Вт.}$$

– Сталь:

$$P_S = 10^2 \cdot 0,0178 = 1,78 \text{ Вт.}$$

– Алюминий:

$$P_{Al} = 10^2 \cdot 0,00052 = 0,052 \text{ Вт.}$$

Таким образом, потери мощности для различных материалов следующие:

- титан: 0,114 Вт;
- сталь: 1,78 Вт;
- алюминий: 0,052 Вт.

Из этих данных видно, что титан и алюминий имеют меньшие потери мощности, чем сталь, что делает их более эффективными с точки зрения электролиза. Однако, если принять во внимание коррозионную стойкость, титан будет наилучшим выбором для длительного использования.

Анализ полученных результатов

В ходе проведенных экспериментов было исследовано поведение трёх материалов – титана, стали и алюминия – в процессе электролиза, с целью оценки их коррозионной стойкости, стабильности результатов и эффективности работы в условиях воздействия электрического тока.

Титан оказался одним из наиболее стойких материалов с точки зрения коррозии, однако его скорость коррозии была немного выше по сравнению с алюминием. В процессе экспериментов была зафиксирована высокая стабильность работы титана, что подтверждается относительно небольшими отклонениями в изменении массы меди, осаждающейся на катодах. В то же время, хотя титан и обладает хорошей стойкостью, его стабильность в долгосрочных процессах электролиза требует дополнительных исследований.

Сталь, в свою очередь, показала ещё более высокую скорость коррозии, что делает её менее предпочтительным материалом для использования в электро-

лизных установках, особенно в условиях длительного воздействия агрессивных сред. Несмотря на это, сталь также демонстрировала неплохую стабильность в процессе электролиза, однако её способность к износу значительно снижает её практическую применимость.

Алюминий продемонстрировал наилучшие результаты по стабильности: его отклонения в изменении массы меди были минимальными, что свидетельствует о высокой точности и стабильности в процессе электролиза. Хотя алюминий в некоторых средах может проявлять большую склонность к коррозии, в рамках проведённых экспериментов его результаты оказались лучшими с точки зрения стабильности. Это делает алюминий предпочтительным материалом для катодов в электролизных процессах, где важна высокая стабильность и минимальная вариативность результатов.

Таким образом, анализ проведённых исследований показал, что, несмотря на некоторые различия в коррозионной стойкости, алюминий является оптимальным выбором для использования в электролизных установках, где важна стабильность и минимальная вариативность работы. В то время как титан и сталь могут быть использованы в специфических условиях, где важна высокая коррозионная стойкость, алюминий остаётся лучшим выбором для большинства практических приложений, где требуется долговечность и точность работы оборудования.

Заключение

Исследования, проведённые в рамках данной работы, позволяют сделать выводы о важности выбора материалов для составных частей электролизёра в контексте управления качеством процессов водоочистки. Эффективность и стабильность работы электродов напрямую влияют на результаты очистки, а значит, на общее качество функционирования станций водоочистки.

Результаты экспериментов показали, что титан, несмотря на свою высокую коррозионную стойкость, имеет более высокую скорость коррозии по сравнению с алюминием. Это может приводить к уменьшению срока службы оборудования, что важно учитывать при проектировании и эксплуатации водоочистных станций. Тем не менее стабильность работы титана в процессе электролиза остаётся на высоком уровне, что подтверждается минимальной вариативностью в его показателях.

Сталь показала наибольшую скорость коррозии среди исследованных материалов, что негативно сказывается на её долговечности и стабильности работы в длительных процессах очистки. Это также подчеркивает необходимость более тщательного выбора материала для электродов, ориентируясь на условия эксплуатации и требования к срокам службы оборудования.

Алюминий, в свою очередь, продемонстрировал наилучшие результаты по стабильности, с минимальной вариативностью и высокими показателями точности. Несмотря на его склонность к коррозии в некоторых

агрессивных средах, алюминий остаётся наиболее стабильным материалом, что делает его оптимальным выбором для многих применений, где важна высокая точность и долговечность работы системы.

Таким образом, для эффективного управления качеством разработки и эксплуатации станций водоочистки крайне важно учитывать не только коррозионную стойкость материалов, но и их стабильность и долговечность в процессе работы. Алюминий, благодаря своей высокой стабильности, является наиболее предпочтительным материалом для катодов в электролизёре, что способствует улучшению качества очистки и повышению надёжности работы станции. В то же время выбор титана или стали может быть оправдан в специфических случаях, где приоритетом является высокая коррозионная стойкость либо стоимость станций.

Для дальнейшего улучшения качества процессов водоочистки в будущем необходимо продолжить исследования по подбору материалов электродов, а также внедрению технологий, направленных на повышение их устойчивости к коррозии и увеличению срока службы.

Список источников

1. Мохрачева Л.П. Типовые математические схемы моделирования. Примеры и задачи: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 144 с.
2. Основы электрохимических методов анализа: учеб. пособие. Ч. 1 / И.И. Жерин, Г.Н. Амелина, А.Н. Страшко, Ф.А. Ворошилов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 101 с.
3. Электрохимические процессы. (Коррозия металлов): методические указания для самостоятельной работы студентов всех специальностей заочной формы обучения / Иван. гос. архит.-строит. ун-т; сост.: В.Е. Румянцев, Г.Л. Кокурина, М.Д. Чекунова. Иваново, 2006. 23 с.
4. Коррозия и защита металлов: учеб.-метод. пособие (для студентов IV курса химического факультета) / сост. доц. В.А. Мухин. Омск: Омск. гос. ун-т., 2004. 112 с.
5. Фонтана М., Стейл Р. Достижения науки о коррозии и технологии защиты от неё. М.: Машиностроение, 1980. 215 с.
6. Gazizulina A.Y., Krasulina O.Y., Borremans A.D., Tveryakov A.M., Ostapenko M.S., Vasilyeva S.E. Reducing the risk of staff failures // Proceedings of 2017 IEEE VI Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations), SPUE 2017. 2017. С. 199–202.
7. Основы электрохимической коррозии металлов и сплавов: учеб. пособие / Л.Г. Петрова, Г.Ю. Тимофеева, П.Е. Демин, А.В. Косачев; под общ. ред. Г.Ю. Тимофеевой. М.: МАДИ, 2016. 148 с.
8. ГОСТ ISO 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1. Основные положения и определения. Введ. 2003-01-01. М.: Стандартинформ, 2002.
9. Zhang Z., Li Y., Wang X. Electrochemical performance of Ti and Al electrodes in seawater-based capacitive deionization // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2021, vol. 895, pp. 115422.

10. Kötzt R., Carlen M. Principles and applications of electrochemical capacitors // *Electrochimica Acta*. 2000, vol. 45, no. 15–16, pp. 2483–2498.
11. ГОСТ 11844-1-2014. Оборудование для очистки воды. Ч. 1. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2014.
12. Fontana M. Corrosion engineering. Нью Йорк, 1987. 576 p.
13. Кеше Г. Коррозия металлов. Физико-химические принципы и актуальные проблемы. М.: Металлургия, 1984. 400 с.
5. Fontana M., Staley R. *Dostizheniya nauki o korrozii i tekhnologii zashchity ot neyo* [Advances in the science of corrosion and protection technologies]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1980, 215 p. (In Russ.)
6. Gazizulina A.Y., Krasulina O.Y., Borremans A.D., Tveryakov A.M., Ostapenko M.S., Vasilyeva S.E. Reducing the Risk of Staff Failures. Proceedings of the 2017 IEEE VI Forum "Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations)", SPUE 2017. 2017:199-202.
7. Petrova L.G., Timofeeva G.Yu., Demin P.E., Kosachev A.V. *Osnovy elektrokhimicheskoy korrozii metallov i splavov: ucheb. posobie* [Fundamentals of electrochemical corrosion of metals and alloys: Textbook]. Moscow: MADI, 2016, 148 p. (In Russ.)
8. State standard GOST ISO 5725-1-2002. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1. General principles and definitions. Moscow: Standartinform, 2002. (In Russ.)
9. Zhang Z., Li Y., Wang X. Electrochemical Performance of Ti and Al Electrodes in Seawater-Based Capacitive Deionization. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2021;895:115422.
10. Kötzt R., Carlen M. Principles and Applications of Electrochemical Capacitors. *Electrochimica Acta*. 2000;45(15-16):2483-2498.
11. State standard GOST 11844-1-2014. Equipment for Water Treatment. Part 1. General Requirements. Moscow: Standartinform, 2014. (In Russ.)
12. Fontana M.G. Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill, 1987, 576 p.
13. Keshe G. Korroziya metallov. *Fiziko-khimicheskie printsipy i aktualnye problemy* [Metal corrosion. Physicochemical principles and current problems]. Moscow: Metallurgy, 1984, 400 p. (In Russ.)

References

1. Mokhracheva L.P. *Tipovye matematicheskie skhemy modelirovaniya. Primery i zadachi: ucheb. posobie* [Typical mathematical modeling schemes. Examples and problems: textbook]. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural University, 2018, 144 p. (In Russ.)
2. Zherin I.I., Amelina G.N., Strashko A.N., Voroshilov F.A. *Osnovy elektrokhimicheskikh metodov analiza: ucheb. posobie. Ch. 1* [Fundamentals of electrochemical methods of analysis: Textbook. Part 1]. Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University, 2013, 101 p. (In Russ.)
3. Rumyantseva V.E., Kokurina G.L., Chekunova M.D. *Elektrokhimicheskie protsessy. (Korroziya metallov): metodicheskoe ukazaniye dlya samostoyatelnoy raboty studentov vseh spetsialnostey zaочноy formi obucheniya* [Electrochemical Processes (Metal Corrosion): Methodological guidelines for independent study for students of external study mode]. Ivanovo: Ivanovo State University of Architecture and Civil Engineering, 2006. 23 p. (In Russ.)
4. Mukhin V.A. *Korroziya i zashchita metallov: ucheb.-metod. posobie (dlya studentov IV kursa khimicheskogo fakulteta)* [Corrosion and protection of metals: Educational methodological guide (for 4th year Chemistry Faculty students)]. Omsk: Omsk State University, 2004, 112 p. (In Russ.)

Поступила 16.04.2025; принята к публикации 21.05.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 16/04/2025; revised 21/05/2025; published 25/12/2025

Копьёва Мария Александровна – аспирант,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: aleks_philizz@mail.ru

Остапенко Мария Сергеевна – кандидат технических наук, доцент,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: ostapenkoms@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-3838-3815

Тверяков Андрей Михайлович – кандидат технических наук, доцент, директор Нефтегазового института,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: tverjakovam@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-6444-2559

Maria A. Kopyova – Postgraduate Student,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: aleks_philizz@mail.ru

Maria S. Ostapenko – PhD (Eng.), Associate Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: ostapenkoms@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-3838-3815

Andrey M. Tveryakov – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Oil and Gas Institute,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: tverjakovam@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-6444-2559

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

METAL FORMING

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

УДК 621.771.016

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-48-53



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ ТОНКИХ ПОЛОС ИЗ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ

Горбунова В.С., Выдрин А.В.

Южно-Уральский государственный университет (научный исследовательский университет), Челябинск, Россия

Аннотация. В настоящее время тонкие биметаллические полосы, состоящие из труднодеформируемых сплавов, являются востребованной продукцией в современных высокотехнологических отраслях промышленности. Именно поэтому вопрос производства таких полос является актуальным и подлежит рассмотрению с технологической точки зрения. На основании чего данная статья посвящена экспериментальному исследованию процесса несимметричной холодной прокатки биметаллических полос, полученных сваркой взрывом и состоящих из слоя алюминия марки Д16 и слоя титана марки ВТ-1-0. Главной целью исследования является получение биметаллической полосы из указанных материалов толщиной 0,3 мм путем внедрения в процесс прокатки кинематической несимметрии, выраженной в рассогласовании окружных скоростей вращения рабочих валков. В свою очередь, научная новизна работы заключается в изучении факторов, влияющих на процесс деформирования таких полос. Результаты исследования выявили деформационные особенности при прокатке композита алюминий–титан, полученного сваркой взрывом. В частности, к данным особенностям относятся: послойная деформация, кривизна полос, условия захвата при несимметричной прокатке с индивидуальным приводом валков и с одним приводным валком. Дальнейшее рассмотрение данного вопроса, а также решение оптимизационной задачи позволит в будущем сформировать сначала опытную технологию получения подобных полос, а затем усовершенствовать её до производственной.

Ключевые слова: несимметричная прокатка, холодная прокатка, тонкие полосы, кривизна, труднодеформируемые сплавы, биметаллическая полоса алюминий-титан, качество поверхности, сварка взрывом

Исследования выполнены за счет гранта Виктора Христенко «Шаг в будущее» (договор пожертвования №240425 от 25.04.2024)

© Горбунова В.С., Выдрин А.В., 2025

Для цитирования

Горбунова В.С., Выдрин А.В. Экспериментальное исследование процесса холодной несимметричной прокатки тонких полос из труднодеформируемых сплавов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 48-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-48-53>



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

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE PROCESS OF COLD ASYMMETRIC ROLLING OF THIN STRIPS OF DIFFICULT-TO-FORM ALLOYS

Gorbunova V.S., Vydrin A.V.

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Abstract. Currently, thin bimetallic strips consisting of difficult-to-form alloys are in demand products in modern high-tech industries. That is why the issue of the production of such strips is relevant and should be considered from a technological point of view. Based on this, this article is devoted to an experimental study of the process of asymmetric cold rolling of bimetallic strips obtained by explosion welding and consisting of an aluminum layer of D16 grade and a titanium layer of VT-1-0 grade. The central objective of the study is to obtain a bimetallic strip made of mentioned materials with a thickness of 0.3 mm by introducing kinematic asymmetry into the rolling process, expressed in a mismatch of the circumferential rotational speeds of the working rolls. In turn, the scientific novelty of the work lies in the study of the factors influencing the deformation of such strips. The results of the study revealed deformation features during rolling of the aluminum-titanium composite obtained by explosion welding. In particular, these features include: layer-by-layer deformations, strip curvature, and capture conditions during asymmetric rolling with individual roller drive and with one drive roller. Further consideration of this issue, as well as solving the optimization problem, will make it possible in the future to first form an experimental technology for producing such strips, and then improve it to production.

Keywords: asymmetric rolling, cold rolling, thin strips, curvature, difficult-to-form alloys, bimetallic strip aluminum-titanium, surface quality, explosion welding

The research was carried out at the expense of Viktor Khristenko's "Step into the Future" grant (donation agreement No.240425 dated April 25, 2024)

For citation

Gorbunova V.S., Vydrin A.V. Experimental Research of the Process of Cold Asymmetric Rolling of Thin Strips of Difficult-To-Form Alloys. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 48-53. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-48-53>

Введение

Несимметричная прокатка является перспективным направлением в развитии производства тонколистового проката [1, 2]. В частности, это относится к тонколистовому прокату из труднодеформируемых сплавов [3-5], которые могут входить в том числе в структуру биметаллических полос.

Полосовая биметаллическая заготовка, состоящая из разнородных материалов, имеет несимметричную структуру и может быть получена разными способами. По этой причине процесс получения готовой полосовой продукции из подобных заготовок с помощью симметричной прокатки может привести к наличию дефектов готовой полосы из-за различной послойной деформации [6, 7]. Вариативность различных видов несимметрии, применяемых в прокатке, позволяет решить эту проблему. Так, например, кинематическая несимметрия, вызванная рассогласованием окружных скоростей прокатных валков, создает смещение нейтральных углов на контактных поверхностях полосы, что позволяет уменьшить неравномерность деформации при прокатке биметаллических полос. Кроме этого, рассогласование окружных скоростей валков приводит к снижению усилия прокатки

[8]. В свою очередь, снижение усилия прокатки способствует интенсификации режима деформаций и позволяет прокатывать более тонкие полосы, состоящие из разнородных материалов [9, 10].

Целью данного исследования является исследование процесса получения полос из труднодеформируемых сплавов, в частности биметаллических полос, имеющих в качестве компонентов алюминий Д16 и титан ВТ-1-0 путем холодной несимметричной прокатки.

Материалы и оборудование

В качестве образцов для проведения исследований использовались полосы, состоящие из алюминиевого и титанового слоев, полученные сваркой взрывом (рис. 1) [11, 12]. Образцы имели различное соотношение толщин слоев. Исходные размеры исследуемых образцов представлены в табл. 1.

В ряде экспериментов применялись смазочные материалы: аэрозольная молибденовая смазка и сульфид молибдена в виде порошка [13]. Варианты осуществления процесса несимметричной прокатки алюмотитановых образцов представлены в табл. 2.

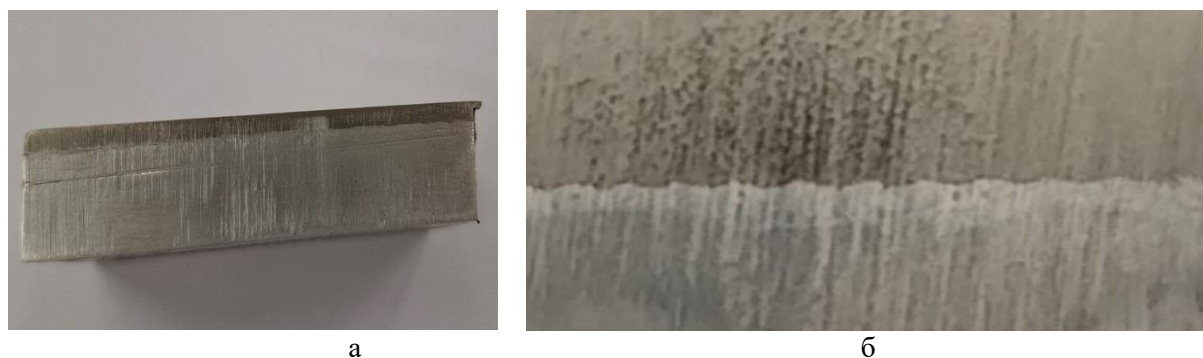


Рис. 1. Общий вид алюмотитанового образца (а) и вид линии сплавления (б)
Fig. 1. General view of the aluminum-titanium sample (a) and view of the fusion line (б)

Таблица 1. Геометрические параметры алюмотитановых образцов
Table 1. Geometric parameters of aluminum-titanium samples

Номер образца	Материалы		Размер образца				Количество
	Титановый слой	Алюминиевый слой	$h_{\text{оTi}}$, мм	$h_{\text{оAl}}$, мм	b , мм	l , мм	
1	BT-1-0	Д16	8,0	2,0	40,0	60,0	1
2			5,0	5,0	40,0	60,0	3
3			2,0	8,0	40,0	60,0	3

Таблица 2. Условия проведения эксперимента
Table 2. Experimental conditions

Номер образца	$h_{\text{оTi}}$, мм	$h_{\text{оAl}}$, мм	Тип смазки	Кинематика валков	Кривизна, мм	Примечание
1	8,0	2,0	Без смазки	Один приводной валок	26	
2	5,0	5,0	Без смазки	Один приводной валок	25	
3	5,0	5,0	Без смазки	Рассогласование скоростей валков 1,3	31	До толщины 1,5 мм
			Аэрозольная молибденовая смазка	Один приводной валок	30	Прокатан до толщины 1,0 мм
4	5,0	5,0	Без смазки	Рассогласование скоростей валков 1,3	27	До толщины 1,5 мм
			Дисульфид молибдена	Один приводной валок	16	Прокатан до толщины 0,3 мм
5	2,0	8,0	Без смазки	Один приводной валок		
6	2,0	8,0	Аэрозольная молибденовая смазка	Один приводной валок		

Исследования проведены с использованием прокатного стана с индивидуальным приводом валков МГТУ им. Г.И. Носова и прокатного стана Дуо-200 ЮУрГУ. При прокатке всех образцов титановый слой контактировал с ведомым (более медленным) или неведомым валком, имеющим меньшую окружную скорость. Все образцы после суммарной деформации 50% подвергались разупрочняющему отжигу в течение 15 мин при температуре 400–450°C [14].

По результатам экспериментальных исследований оценивались кривизна полосы на выходе из очага деформации и степень деформации каждого слоя биметаллической полосы.

Кривизна полосы на выходе из очага деформации. В процессе прокатки исследуемые полосы прокатывались до толщины 1,5 мм. В качестве критерия кривизны в данном исследовании принималось мак-

симальное отклонение изогнутого образца от горизонтальной поверхности, на которую образец опирался своими концами. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Анализируя данные о кривизне, приведенные в табл. 2, можно заметить, что при прокатке образцов на стане с одним приводным валком кривизна образцов на выходе из очага деформации меньше, чем у образцов, прокатанных на стане с индивидуальным приводом валков. Также стоит отметить, что наилучший эффект по снижению кривизны замечен при прокатке полос с минимальной толщиной титанового слоя и максимальной толщиной алюминиевого слоя в клети с одним приводным валком.

Отношение толщин слоев в исходном образце и степень деформации каждого слоя. В серии экспериментов выяснилось, что допустимая суммарная

степень деформации биметаллической заготовки зависит от соотношения исходных толщин алюминиевого и титанового слоев. Было замечено, что при одинаковой толщине слоев биметаллической заготовки удалось получить готовую алюмотитановую полосу толщиной 0,3 мм без разрывов. В то же время при некоторых отличных соотношениях толщин слоев наблюдался разрыв титанового слоя при прокатке до толщины 1,5 мм (рис. 2). Однако при одинаковых исходных толщинах титанового и алюминиевого слоев, как было отмечено выше, наблюдается максимальная кривизна конечного продукта.

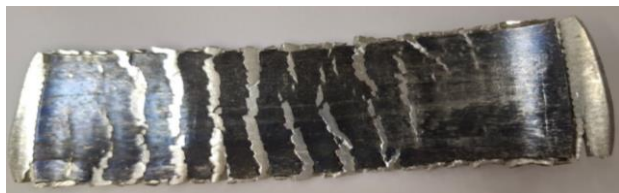


Рис. 2. Образец с разрывами титанового слоя
Fig. 2. A sample with fractures of the titanium layer

Исследование закономерностей изменения толщин титанового и алюминиевого слоев показало, что пластическая деформация титанового слоя заметна при исходном отношении толщины титанового слоя к толщине алюминиевого 1/1 и выше. В тех случаях, когда толщина титанового слоя меньше, чем алюминиевого, происходит деформация преимущественно алюминиевого слоя. При исходном соотношении

толщин слоев $\frac{1}{4}$ титановый слой практически не деформируется (рис. 3).

Заключение и выводы

Результаты эксперимента показали, что применение процесса прокатки с одним приводным валком способствует уменьшению кривизны биметаллических полос при прокатке. При этом чем меньше толщина более твердого – титанового слоя, тем меньше кривизна полосы. С другой стороны, уменьшение толщины титанового слоя затрудняет его деформацию при прокатке. Кроме того, было отмечено, что при определенных степенях деформации может происходить нарушение целостности титанового слоя, что ограничивает конечную толщину биметаллической полосы. Наиболее благоприятные условия с точки зрения получения минимальных толщин полос имеют место при прокатке биметаллической заготовки с одинаковой толщиной алюминиевого и титанового слоев.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что для определения наиболее эффективных условий прокатки биметаллических полос необходимо решать оптимизационную задачу, в которой в качестве управляющего параметра является исходное отношение толщин титанового и алюминиевого слоев, в качестве ограничения – целостность биметаллической полосы, а в качестве целевой функции – кривизна полосы.

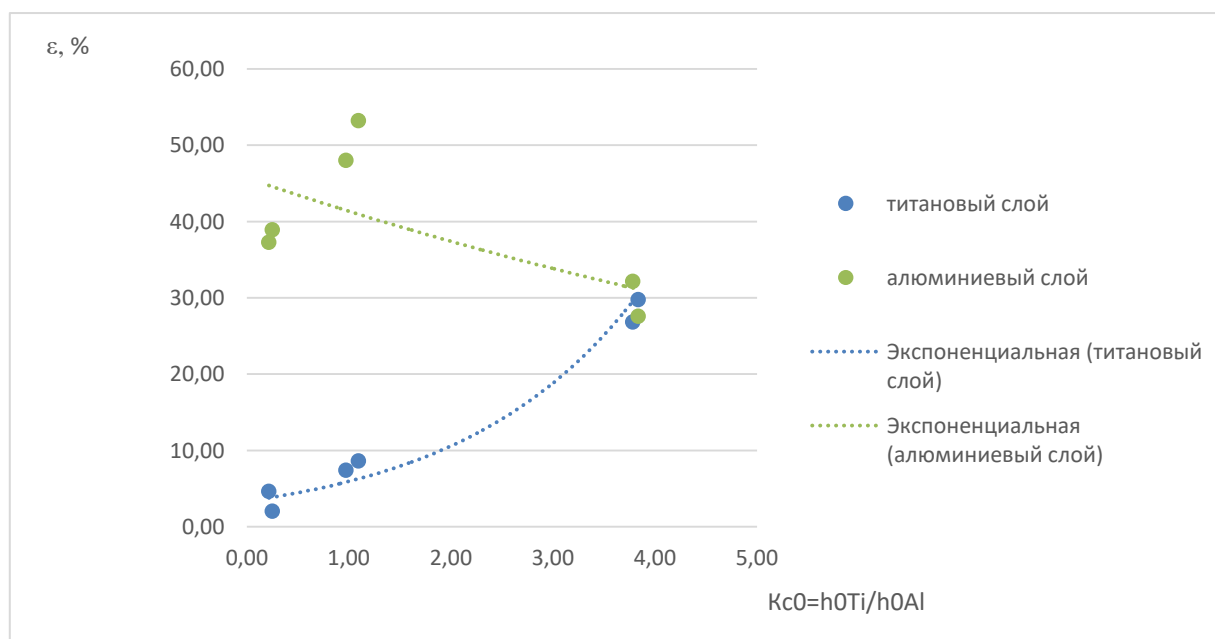


Рис. 3. Влияние исходного соотношения толщин слоев алюмотитанового образца на степень деформации слоев
Fig. 3. Effect of the initial thickness ratio of the aluminum-titanium sample layers on the degree of deformation of the layers

Список источников

1. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20, №3. С. 81-96
2. Смирнов В.М., Кондратенко В.А. Теория и технология несимметричной прокатки. М.: Metallurgiya, 1986. 160 с.
3. Алхимов В.И., Михайлов В.И. Технология и оборудование для прокатки титановых сплавов. М.: Metallurgiya, 1985. 280 с.
4. Селиванов О.Г., Решетов Д.С. Особенности холодной прокатки тонких полос из алюминиевых сплавов // Цветные металлы. 2018. № 5. С. 77-82.
5. Лапшин В.П., Коротков А.А., Суханов А.В. Особенности деформации труднодеформируемых алюминиевых сплавов при совмещенных способах обработки давлением // Цветные металлы. 2021. № 3. С. 88-94.
6. Гудков А.А., Матвеев И.А., Муравьев В.В. Прокатка биметаллических полос в условиях несимметричного нагружения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 4 (44). С. 29-31.
7. Петренко С.П., Назаренко В.А. Особенности прокатки биметаллических заготовок // Обработка металлов давлением. 2015. № 1 (30). С. 45-52.
8. Рыжков А.А., Смирнов С.В. Моделирование процесса несимметричной прокатки для оценки снижения энергосиловых параметров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». 2022. Т. 22, № 1. С. 45-54.
9. Полухин В.П., Скороходов В.Н., Поляков М.Г. Эффективность несимметричного процесса прокатки тонких полос // Теория и технология деформации металлов: сборник научных трудов Московского института стали и сплавов. М., 1978. №110. С. 71-77.
10. Analysis of asymmetric rolling of Ti/Al composite plate considering tension and shear stress / Guan L., Bao Y., Wang X., Zhao J. // Journal of Materials Processing Tech. 2022, vol. 299, p. 117327.
11. Использование сварки взрывом для получения многослойных металлических композитов / Курбаналиев Р.К., Батаев В.А., Батаев А.А. и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87, № 2. С. 45-54.
12. Findik F. Recent developments in explosive welding // Materials & Design. 2021, vol. 201, p. 109540.
13. Смирнов С.В., Рыжков А.А., Иванов Д.А. Влияние условий трения на силовые параметры и неравномерность деформации при несимметричной прокатке // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19, № 2. С. 67-75.
14. Киселева Е.С., Аникин А.Ю., Горелик С.С. Режимы разупрочняющего отжига деформированных биметаллических материалов системы алюминий-титан // Металловедение и термическая обработка металлов. 2020. № 8. С. 32-38.

References

1. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Biryukova O.D., Kozhemyakina A.E. Asymmetric rolling of sheets and tapes: history and prospects of development. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Metallurgiya»* [Bulletin of SUSU. The Metallurgy series]. 2020;20(3):81-96. (In Russ.)
2. Smirnov V.M., Kondratenko V.A. *Teoriya i tekhnologiya nesimmetrichnoy prokatki* [Theory and technology of asymmetric rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 160 p. (In Russ.)
3. Alkhimov V.I., Mikhailov V.I. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya prokatki titanovykh splavov* [Technology and equipment for rolling titanium alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 280 p. (In Russ.)
4. Selivanov O.G., Reshetov D.S. Features of cold rolling of thin strips of aluminum alloys. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals]. 2018;(5):77-82. (In Russ.)
5. Lapshin V.P., Korotkov A.A., Sukhanov A.V. Features of deformation of hard-to-form aluminum alloys with combined pressure treatment methods. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals]. 2021;(3):88-94. (In Russ.)
6. Gudkov A.A., Matveev I.A., Muravyev V.V. Rolling of bimetallic strips under asymmetric loading conditions. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013;(44):29-31. (In Russ.)
7. Petrenko S.P., Nazarenko V.A. Features of rolling bimetallic blanks. *Obrabotka metallov davleniem* [Metal processing by pressure]. 2015;(1(30)):45-52. (In Russ.)
8. Ryzhkov A.A., Smirnov S.V. Modeling of the process of asymmetric rolling to assess the reduction of energy-strength parameters. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Mashinostroenie»* [Bulletin of the South Ural State University. The series "Mechanical Engineering"]. 2022;22(1):45-54. (In Russ.)
9. Polukhin V.P., Skorokhodov V.N., Polyakov M.G. Efficiency of the asymmetric process of rolling thin strips. *Teoriya i tekhnologiya deformatsii metallov: sbornik nauchnykh trudov Moskovskogo instituta stali i splavov* [Theory and technology of metal deformation: collection of scientific papers of the Moscow Institute of Steel and Alloys]. Moscow, 1978;(110):71-77. (In Russ.)
10. Guan, L., Bao, Y., Wang, X., Zhao, J. Analysis of asymmetric rolling of Ti/Al composite plate considering tension and shear stress. *Journal of Materials Processing Tech.* 2022;299:117327.
11. Kurbanaliev R.K., Bataev V.A., Bataev A.A. et al. The use of explosion welding to produce multilayer metal composites. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory Laboratory. Diagnostics of materials]. 2021;87(2):45-54. (In Russ.)
12. Findik F. Recent developments in explosive welding. *Materials & Design.* 2021;201:109540.
13. Smirnov S.V., Ryzhkov A.A., Ivanov D.A. Influence of friction conditions on force parameters and unevenness of deformation during asymmetric rolling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(2):67-75. (In Russ.)

14. Kiseleva E.S., Anikin A.Yu., Gorelik S.S. Modes of softening annealing of deformed bimetallic materials of the aluminum-titanium system. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment of metals]. 2020;(8):32-38. (In Russ.)

Поступила 26.08.2025; принята к публикации 17.10.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 26/08/2025; revised 17/10/2025; published 25/12/2025

Горбунова Виктория Сергеевна – аспирант кафедры «Процессы и машины обработки металлов давлением», Южно-Уральский государственный университет (научный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Email: vika.salkova6039@gmail.com

Выдрин Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессы и машины обработки металлов давлением», Южно-Уральский государственный университет (научный исследовательский университет), Челябинск, Россия.
Email: vydrinav@susu.ru

Victoria S. Gorbunova – Postgraduate Student, Department of Processes and Machines of Metal Forming, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: vika.salkova6039@gmail.com

Alexander V. Vydrin – DrSc(Eng.), Professor, Head of the Department of Processes and Machines of Metal Forming, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.
Email: vydrinav@susu.ru

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

УДК 621.77

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-54-60



ПРИМЕНЕНИЕ СОВМЕЩЕННОГО СПОСОБА «АСИММЕТРИЧНАЯ ПРОКАТКА - ВОЛОЧЕНИЕ В МОНОЛИТНОЙ ВОЛОКЕ» ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОВОЛОКИ С МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ

Харитонов В.А., Песин А.М., Усанов М.Ю., Локотунина Н.М., Мелихов Е.Д.

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

Аннотация. Организация конкурентоспособного производства проволоки различного назначения с мелкозернистой структурой является в настоящее время актуальной задачей метизного передела отечественной металлургии. В статье описан новый способ, позволяющий без изменения действующей технологической схемы повысить эффективность производства проволоки. Было выполнено моделирование в программном комплексе Deform-3d трех вариантов получения проволоки из стали марки 80P: волочение в монолитной волоке; совмещенный процесс «холодная прокатка - волочение в монолитной волоке» и новый процесс – «холодная асимметричная прокатка - волочение в монолитной волоке». Оценивалось распределение накопленной степени деформации в проволоке, полученной данными способами. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что наименьшие значения накопленной степени деформации имеет проволока, протянутая в монолитной волоке. При совмещенном процессе плющения (прокатки круглой заготовки в валках с гладкой бочкой) – волочение в монолитной волоке – уровень накопленной степени деформации значительно растет благодаря прокатке. Применение асимметричной прокатки с соотношением скоростей вращения верхнего и нижнего валков, равным 2 или 5, еще больше повышает величину накопленной степени деформации. Показано, что способ «холодная асимметричная прокатка – волочение в монолитной волоке» позволяет без замены оборудования и другой инфраструктуры повысить степень накопленной деформации в проволоке и тем самым обеспечить получение мелкозернистой структуры. Показаны также широкие возможности управления режимами деформации как в прокатной клети, так и в монолитной волоке, что открывает широкие возможности для совершенствования процесса волочения.

Ключевые слова: проволока, волочение, прокатка, асимметричная прокатка, совмещение, моделирование, накопленная степень деформации

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20026, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>

© Харитонов В.А., Песин А.М., Усанов М.Ю., Локотунина Н.М., Мелихов Е.Д., 2025

Для цитирования

Применение совмещенного способа «асимметричная прокатка - волочение в монолитной волоке» при производстве проволоки с мелкозернистой структурой / Харитонов В.А., Песин А.М., Усанов М.Ю., Локотунина Н.М., Мелихов Е.Д. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 54-60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-54-60>



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

APPLICATION OF THE COMBINED METHOD “ASYMMETRIC ROLLING - DRAWING IN A MONOLITHIC DIE” IN THE PRODUCTION OF WIRE WITH FINE-GRAINED STRUCTURE

Kharitonov V.A., Pesin A.M., Usanov M.Yu., Lokotunina N.M., Melikhov E.D.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The organization of a competitive production of wires for various applications with a fine-grained structure is currently a crucial task for the hardware manufacturing sector of domestic metallurgy. This paper describes a novel method that enables increasing the efficiency of wire production without changing the existing technological scheme. Numerical simulations were performed in the Deform-3D software package for three variants of wire manufacturing from 80R steel: drawing in a monolithic die; the combined process of “cold rolling – drawing in a monolithic die”; and a new process such as “cold asymmetric rolling – drawing in a monolithic die”. The distribution of accumulated strain in the wire obtained by these methods is evaluated. A comparative analysis of the results shows that the lowest accumulated strain values are obtained in wire drawn only in a monolithic die. In the combined process of flattening (rolling of a round blank with smooth rolls) followed by drawing in a monolithic die, the accumulated strain level increases significantly due to rolling. The application of asymmetric rolling with a ratio of the rotation speeds of the upper and lower rolls equal to 2 or 5 further increases the level of accumulated strain. It is demonstrated that the process of “cold asymmetric rolling – drawing in a monolithic die” allows for increasing the accumulated strain in the wire and thus producing a fine-grained structure without replacement of the existing equipment or infrastructure. Additionally, wide opportunities for controlling deformation modes in both the roll mill stand and monolithic die are revealed, which opens up promising ways for further improvement of the drawing process.

Keywords: wire, drawing, rolling, asymmetric rolling, combined processes, modeling, accumulated strain.

The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant No. 24-19-20026 (Available at: <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>)

For citation

Kharitonov V.A., Pesin A.M., Usanov M.Yu., Lokotunina N.M., Melikhov E.D. Application of the Combined Method “Asymmetric Rolling - Drawing in a Monolithic Die” in the Production of Wire With Fine-Grained Structure. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 54-60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-54-60>

Введение

Волочение в монолитных волоках на протяжении многих веков является основной операцией технологического процесса изготовления проволоки различного назначения как из черных, так и цветных металлов и их сплавов. Широкое применение волочения в монолитных волоках как способа обработки металлов давлением объясняется простотой применяемого инструмента по конструкции, изготовлению и эксплуатации, хорошей теоретической изученностью и наличием всей необходимой инфраструктуры (оборудование, инструмент, технологические смазки и т.п.). Однако при этом схема ввода энергии в очаг деформации (через передний концевой, реактивное трение, неблагоприятная схема напряженного состояния металла при деформации значительно снижают качество проволоки и повышают затраты на ее изготовление. Этому же способствует неравномерность деформации по сечению проволоки, присущая этому способу. Схема деформации при волочении – схема истечения, эффективная при формоизменении, затрудняет получение мелкодисперсной равновесной микроструктуры.

Введение при производстве проволоки в качестве основной операции нового способа обработки металлов давлением, например, протяжки в роликовых волоках, холодной (теплой) сортовой прокатки в двух- и многовалковых калибрах, требует разработки и реализации новых технологических схем, что очень сложно, дорого и на сегодня просто нецелесообразно.

На наш взгляд, волочение нужно сохранить в качестве основной операции, а эффективность производства проволоки повысить разработкой новых комбинаций совмещенных процессов обработки металлов давлением. При этом, наряду с устранением недостатков волочения в монолитной волоке, нужно поставить дополнительную задачу получения ультрамелкодисперсных структур. Для решения этих задач необходимо применять совмещение волочения с методами интенсивной пластической деформации. Например, совмещенный способ деформирования прессование-волочение, который обладает существенным преимуществом по сравнению с ранее известными способами получения металла с ультрамелкозернистой структурой. Данный способ деформиро-

вания за счет совмещения двух способов – интенсивной пластической деформации в равноканальной ступенчатой матрице и процесса волочения – позволяет получать проволоку требуемых размеров и формы поперечного сечения, обладающую ультрамелкозернистой структурой. В этом направлении известны работы Карагандинского государственного индустриального университета и других университетов [1, 2].

Разработанный учеными Донецкого физико-технического института совмещенный способ прокатки со сдвигом и традиционного волочения позволяет получить проволоку малых сечений без промежуточного отжига, благодаря большому запасу пластичности, что обеспечивается формированием специфической структуры с мелким, однородным, изотропным, равноосным зерном с преимущественно большеугловыми границами и низкой плотностью дислокаций в теле зерна [3, 4].

В Магнитогорском государственном техническом университете еще в 50-х годах прошлого века под руководством профессора М.И. Бояршинова были начаты исследования по применению многовалковых калибров для изготовления сортового проката и проволоки. В 80-е годы прошлого века на Белорецком металлургическом комбинате был смонтирован и пущен в эксплуатацию пятиклетьевого прокатный стан. Развитие этого направления показало эффективность нового процесса «прокатка - волочение» и пути его реализации [5].

Как показали проведенные нами исследования, волочение круглой проволоки в овальной монолитной волоке приводит к изменению распределения накопленной степени деформации по сечению проволоки. Применение в маршруте волочения круглых и овальных монолитных волок дает возможность управлять характером распределения накопленной степени деформации проволоки, повышая тем самым ее качество [6].

За рубежом также проводились работы по исследованию влияния диаметра валков на распределение деформации, изменение формы, контактное давление и значение повреждаемости заготовки при плоской прокатке проволоки с целью управления свойствами. Показано, что неравномерность деформации в плющенной проволоке возрастает с увеличением диаметра валков. Данные различия в распределениях деформации, изменении формы и значениях повреждаемости обусловлены изменением длины контактного участка, напрямую зависящим от диаметра валков при плоской прокатке проволоки [7]. Сравнительный анализ механических свойств проволоки, полученной волочением в монолитных волоках и сортовой прокаткой, посвящены работы [8, 9]. Было выявлено большое различие в механических свойствах. Однако в данных работах рассматриваются отдельно способы только волочения или только прокатки круглой заготовки.

Асимметричная прокатка в настоящее время применяется в основном при листовой холодной и горячей прокатке различных металлов и их сплавов.

При этом обеспечивается получение градиентных мелкодисперсных микроструктур, обеспечивающих повышение прочности и пластичности [10–12]. Таким образом, значительный исследовательский интерес представляет оценка возможности этого процесса при производстве других изделий, включая проволоку.

Целью данной работы является оценка распределения накопленной деформации в высокоуглеродистой проволоке, полученной волочением в монолитных волоках и совмещенными способами «прокатка-волочение» на основе моделирования.

Материалы и методы исследования

Для исследования процесса «асимметричная прокатка - волочение» было выполнено моделирование в программном комплексе Deform-3d. Задача принималась пластическая, изотермическая. Температура заготовки 20°C. Диаметр исходной заготовки 16,00 мм, длина 150 мм, сталь марки 80P. При постановке задачи заготовка разбивалась на 68569 конечных элементов. Тип сетки – абсолютная, коэффициент отношения равен 1. Размер ячеек при данных условиях составил 1 мм. В начале заготовка обжимается на плоский овал в прокатной кассете, затем проходит через монолитную волоку. На выходе проволоки из волоки к ее переднему концу приложено тянущее усилие и осуществляется процесс волочения (рис. 1).

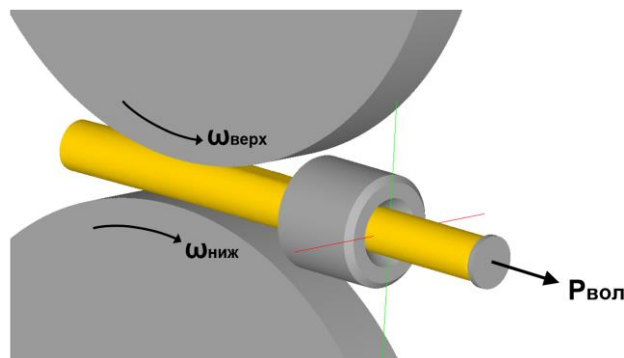


Рис. 1. Модель процесса «прокатка - волочение»
Fig. 1. Model of the rolling-drawing process

Валки прокатной кассеты принимались диаметром 200 мм, обжатие составляло 1 мм на сторону (то есть получался плоский овал высотой 14,0 мм). При этом нижний валок всегда оставался скоростным и вращался со скоростью 10 рад/с. Скорость верхнего валка менялась и его скорость в разных экспериментах составляла соответственно 10, 5 и 2 рад/с.

Монолитная волока имеет диаметр 13,76 мм, рабочий угол – $2\alpha = 12^\circ$.

Коэффициент трения при прокатке и волочении задавался в соответствии с законом Кулона. Для прокатки значение коэффициента трения составляло 0,3 [10], а для волочения в монолитной волоке он принимался равным 0,08.

Полученные результаты и их обсуждение

Для сравнения результатов моделирования прокатки и волочения был смоделирован процесс волочения в монолитной волоке одной протяжки с диаметра 16,00 мм на диаметр 13,76 мм со скоростью 1000 мм/с. Измеренное усилие волочения при этом составило 84,22 кН.

Затем выполнено моделирование с валками, вращающимися с одинаковой скоростью 10 рад/с. При этом передний конец проволоки на выходе из роликов подходит к монолитной волоке и фактически начинается процесс прессования. Однако усилия от прокатки не хватает, чтобы полностью «продавить» заготовку через монолитную волоку, и валки начинают буксовать по поверхности проволоки. Данное усилие можно измерить, оно составило 31 кН. Для измерения скорости перемещения заготовки на ее передний и задний торец были нанесены точки и с помощью инструмента «Point Tracking» были получены скорости переднего и заднего концов заготовки в процессе прокатки и они составили соответственно 1012,2 и 972,1 мм/с. Зная исходный диаметр заготовки, из условия постоянства секундных объемов ($F_0 V_0 = F_n V_n$) определяем площадь полученного плоского овала 193,1 мм². Вычисляем скорость готовой проволоки на выходе из монолитной волоки, которая составила 1313,7 мм/с.

Аналогичным образом были получены данные для других экспериментов, которые сведены в таблицу.

Исходя из полученных данных о скоростях проволоки после прокатки и проволоки на выходе из монолитной волоки, возможно несколько вариантов их синхронизации:

- скорости проволоки после прокатки и на выходе из волоки совпадают с учетом вытяжки в монолитной волоке;
- скорость проволоки на выходе из монолитной волоки с учетом вытяжки меньше скорости после прокатки, таким образом реализуется режим волочения с подпором;
- скорость проволоки на выходе из монолитной волоки с учетом вытяжки больше скорости после прокатки, в данном случае реализуется режим волочения с натяжением.

В данной статье рассматривается случай, когда скорости проволоки после прокатки и на выходе из

волоки совпадают с учетом вытяжки в монолитной волоке. Для данного варианта было оценено распределение накопленной степени деформации [6]. Методика оценки заключается в следующем: на исходную заготовку в поперечном сечении наносится 360 точек, распределённых по нескольким концентрическим окружностям. Затем строятся графики с развертками полученных данных. Отсчет точек начинается с левой боковой поверхности, если смотреть, что проволока движется на нас. Точка 90 находится сверху заготовки под верхним валком, точка 180 – на правой боковой поверхности и точка 270 – снизу заготовки, над нижним валком (рис. 2).

Из данных на рис. 2 видно, что накопленная степень деформации при волочении только в монолитной волоке имеет значение от 0,31 на оси проволоки до 0,37 на ее поверхности. Применение прокатной клетки с равными скоростями вращения приводит к увеличению накопленной степени деформации в центре до 0,38 и до величины 0,70 на ее поверхности в тех зонах, которые находились при прокатке под валками. Применение асимметрии приводит к перераспределению значений накопленной степени деформации. Со стороны верхнего «медленного» валка наблюдается ее снижение до значения 0,65, в то время как со стороны более «скоростного» валка значение накопленной степени деформации увеличивается до 0,85 и до 0,89 для соотношения скоростей 2 и 5 соответственно.

Заключение

1. В программном комплексе Deform-3d впервые выполнено моделирование совмещенного процесса «асимметричная прокатка – волочение в монолитных волоках».

2. Сравнительный анализ показал, что степень накопленной деформации в проволоке, полученной способом «прокатка – волочение», в 1,9 раза выше, чем у волоченой проволоки. Применение асимметричной прокатки повышает это значение до 2,2 и 2,4 в зависимости от соотношения скоростей валков.

3. Процесс «прокатка – волочение» является «чувствительным» к изменению соотношения асимметрии при прокатке и режимов волочения, что позволяет управлять значением накопленной степени деформации в проволоке, тем самым обеспечивая получение необходимых ее свойств.

Таблица. Параметры процесса прокатки с различным соотношением скоростей валков

Table. Rolling process parameters for different roll-speed ratios

Скорость верхнего валка, рад/с	Скорость нижнего валка, рад/с	Скорость переднего конца проволоки после прокатки, мм/с	Рассчитанная скорость переднего конца проволоки после монолитной волоки, мм/с
10	10	1012,2	1313,7
5	10	522,1	678,6
2	10	200,4	270,8

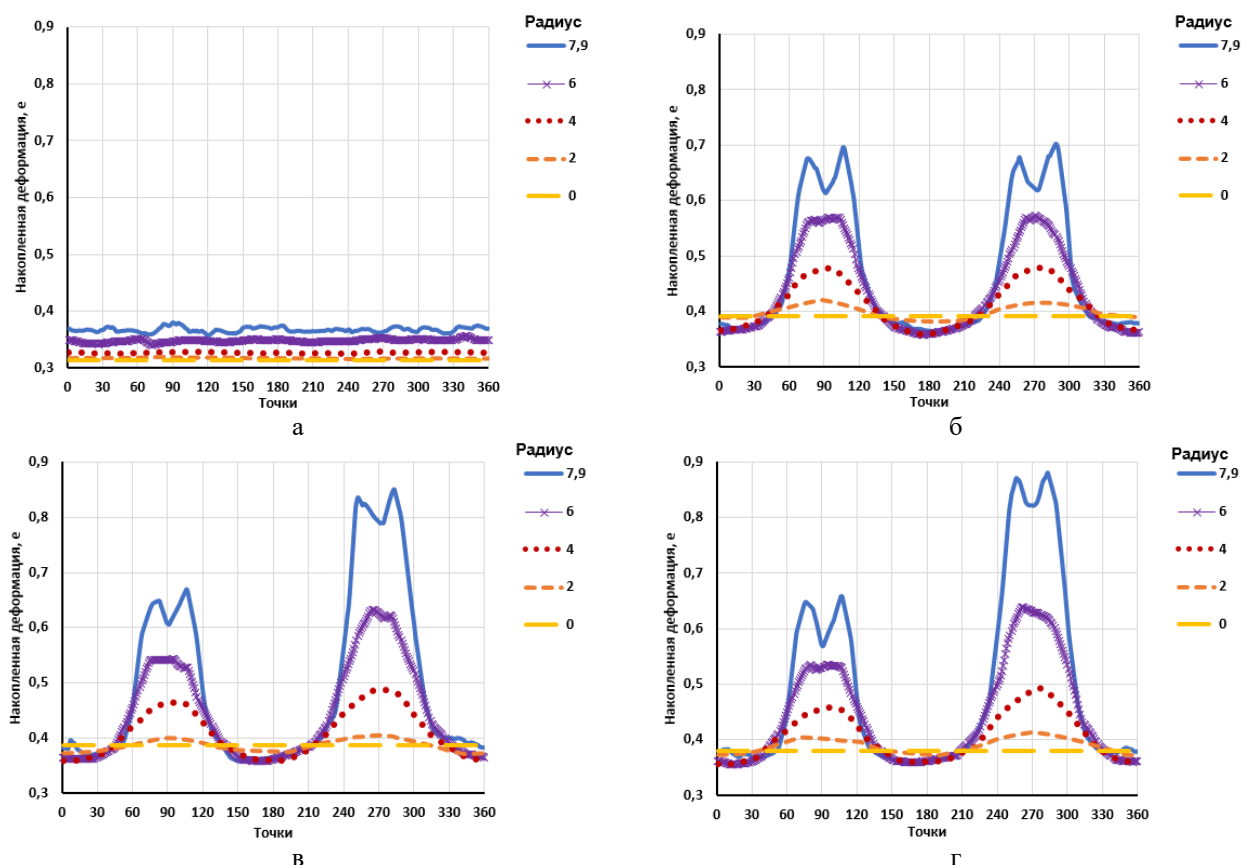


Рис. 2. Распределение накопленной степени деформации по сечению заготовки после прокатки - волочения с соотношением скоростей валков: а – волочение в монолитной волоке с 16,00 на 13,76 мм; б – $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 1$; в – $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 2$; г – $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 5$

Fig. 2. Distribution of accumulated strain over the cross-section of the workpiece after rolling-drawing with different roll-speed ratios: а is drawing in a monolithic die from 16.00 to 13.76 mm; б is $V_{\text{low}}/V_{\text{top}} = 1$; в is $V_{\text{low}}/V_{\text{top}} = 2$; г is $V_{\text{low}}/V_{\text{top}} = 5$

Список источников

1. Разработка и исследование совмещенного процесса равноканального углового прессования / А.А. Богатов, А.Б. Найзабеков, С.Н. Лежнев, И.В. Лещев, В.Г. Козлов // Производство проката. 2016. № 3. С. 33–38.
2. Влияние процесса прессование-волочение на изменение структуры и механических свойств стали / С.Н. Лежнев, И.Е. Волокитина, А.В. Волокитин // Сталь. 2017. № 3. С. 44–48.
3. Пашинская Е.Г., Завдоев А.В. Применение прокатки со сдвигом и традиционного волочения для формирования структуры и свойств малоуглеродистых сталей // Физика и техника высоких давлений. 2012. Т. 22. № 3. С. 113–124.
4. Нетривиальные изменения физико-механических свойств и структуры малоуглеродистой проволоки, полученной прокаткой со сдвигом и холодным волочением / Е.Г. Пашинская, А.В. Завдоев, Л.С. Метлов, Ю.И. Непочатых, А.А. Максакова, В.М. Ткаченко // Materials Physics and Mechanics. 2015. Т. 24. № 2. С. 163–177.
5. Харитонов В.А., Таранин И.В. Исследование эффективности изготовления проволоки совмещенным способом «прокатка-волочение в монолитной волоке с подпором» // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 10. С. 24–28.
6. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Исследование процесса волочения круглой высокоуглеродистой проволоки в овальной монолитной волоке // Теория и технология металлургического производства. 2022. № 1 (40). С. 37–40.
7. Hwang J.-K., Kim S.-J., Kim K.-J. Influence of Roll Diameter on Material Deformation and Properties during Wire Flat Rolling // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 18, p. 8381.
8. Hwang J.-K. Hardening and Softening Behavior of Caliber-Rolled Wire // Materials (Basel, Switzerland). 2022. vol. 15, no.8, p. 2939.
9. Comparison of reduction ability between multi-stage cold drawing and rolling of stainless steel wire – Experimental and numerical investigations of damage / T.-S. Cao, C. Vachey, P. Montmitonnet, P.-O. Bouchard // Journal of Materials Processing Tech. 2015, vol. 217, pp. 30–47.
10. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // Вестник

- ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20. № 3. С. 81–96.
- Effect of asymmetry on microstructure and mechanical behavior of as-rolled AZ31 magnesium alloy medium plates during coiling at warm temperatures / C. Zhou, Q. Le, T. Wang, Q. Liao, Y. Zhu, D. Zhao, L. Bao, W. Jia // Materials Science and Engineering: A. 2024, vol. 894, p. 146174.
 - Effects of asymmetric rolling with tilted material entry on texture and mechanical properties of aluminium / D. Byrska-Wójcik, M. Ostachowska, J. Gibek, K. Wierzbowski, M. Wróbel, R. Błoniarz, A. Baczmański, M. Kopyściański, I. Kalembe-Rec // Journal of Materials Processing Tech. 2025, vol. 338, p. 118796.
 - Kharitonov V.A., Taranin I.V. Study of the efficiency of producing wire by the combined method «rolling-drawing in a monolithic die with back-tension». Kuznechno-shtampovoechnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem [Forging and stamping production. Metal forming]. 2014;(10):24-28. (In Russ.)
 - Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. Research of round high-carbon wire drawing in oval one-piece drawing die. Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva [Theory and technology of metallurgical production]. 2022;1(40):37-40. (In Russ.)
 - Hwang J.-K., Kim S.-J., Kim K.-J. Influence of Roll Diameter on Material Deformation and Properties during Wire Flat Rolling. Applied Sciences. 2021;11(18):8381.
 - Hwang Joong-Ki. Hardening and Softening Behavior of Caliber-Rolled Wire. Materials (Basel, Switzerland). 2022;15(8):2939.
 - Cao T.-S., Vachey C., Montmitonnet P., Bouchard P.-O. Comparison of reduction ability between multi-stage cold drawing and rolling of stainless steel wire – Experimental and numerical investigations of damage. Journal of Materials Processing Tech. 2015;217:30-47.
 - Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Kozhemyakina A.E. Asymmetric rolling of sheets and strips: history and development prospects. Vestnik YuUrGU. Seriya «Metallurgiya» [Vestnik of SUSU. Metallurgy Series]. 2020;20(3):81-96. (In Russ.)
 - Zhou C., Le Q., Wang T., Liao Q., Zhu Y., Zhao D., Bao L., Jia W. Effect of asymmetry on microstructure and mechanical behavior of as-rolled AZ31 magnesium alloy medium plates during coiling at warm temperatures. Materials Science and Engineering: A. 2024;894:146174.
 - Byrska-Wójcik D., Ostachowska M., Gibek J., Wierzbowski K., Wróbel M., Błoniarz R., Baczmański A., Kopyściański M., Kalembe-Rec I. Effects of asymmetric rolling with tilted material entry on texture and mechanical properties of aluminium. Journal of Materials Processing Tech. 2025;338:118796

References

- Bogatov A.A., Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Leshchev I.V., Kozlov V.G. Development and study of the combined process of equal-channel angular pressing. Proizvodstvo prokata [Rolled products manufacturing]. 2016;(3):33-38. (In Russ.)
- Lezhnev S.N., Volokintina I.E., Volokitin A.V. Influence of the pressing-drawing process on structural evolution and mechanical properties of steel. Stal [Steel]. 2017;(3):44-48. (In Russ.)
- Pashinskaya E.G., Zavdoveev A.V. Application of shear rolling and conventional drawing to form the structure and properties of low-carbon steels. Fizika i tekhnika vysokikh davlenii [High pressure physics and technology]. 2012;22(3):113-124. (In Russ.)
- Pashinskaya E.G., Zavdoveev A.V., Metlov L.S., Nepchatykh Yu.I., Maksakova A.A., Tkachenko V.M. Nontrivial changes in the physical and mechanical properties and structure of low-carbon wire produced by shear rolling and cold drawing. Materials Physics and Mechanics. 2015;24(2):163-177. (In Russ.)

Поступила 18.11.2025; принята к публикации 05.12.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 18/11/2025; revised 05/12/2025; published 25/12/2025

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

Песин Александр Моисеевич – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pesin@bk.ru. ORCID 0000-0002-5443-423X

Усанов Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: barracuda_m@mail.ru. ORCID 0000-0002-5920-3449

Локотунина Наталья Михайловна – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: nml76@mail.ru. ORCID 0000-0002-9917-5550

Мелихов Егор Дмитриевич – студент магистратуры,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: melihovegor77@gmail.com. ORCID 0009-0002-7628-8859

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

Alexander M. Pesin – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: pesin@bk.ru. ORCID 0000-0002-5443-423X

Mikhail Yu. Usanov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: barracuda_m@mail.ru. ORCID 0000-0002-5920-3449

Natalia M. Lokotunina – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: nml76@mail.ru ORCID 0000-0002-9917-5550

Egor D. Melikhov – Master's Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: melihovegor77@gmail.com ORCID 0009-0002-7628-8859

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

УДК 621.771

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-61-70



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ПЛИТ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК4-1Ч

Глинских П.И.^{1,2}, Замараева Ю.В.^{1,3}, Яковлев С.И.¹, Завалий Е.А.^{1,2}

¹ АО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия

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

³ Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Катаные высокие плиты из сплава АК4-1ч являются одними из распространенных полуфабрикатов авиационного назначения. Одной из проблем их производства является низкий уровень относительного удлинения и неоднородность структуры в высотном направлении плиты. Цель данной работы – получение стабильного уровня механических свойств, а также повышение значений относительного удлинения и уменьшение неоднородности структуры в высотном направлении плит толщиной 40-80 мм из сплава АК4-1ч посредством корректировки режимов горячей прокатки в условиях АО «Каменск-Уральский металлургический завод». В результате исследования механических свойств плит толщиной 40-80 мм, изготовленных по традиционной технологии, выявлено, что средние значения прочностных свойств независимо от направления отбора образцов имеют значительный запас относительно требований стандарта. Средние значения относительного удлинения в поперечном и продольном направлениях для данных плит также имеют значительный запас. В высотном направлении среднее значение относительного удлинения превышает требование стандарта только на 20%. Посредством исследования макроструктуры образца с пониженным значением относительного удлинения в центре его поперечного сечения обнаружена светлая область. Посредством исследования микроструктуры данного образца установлено, что светлая область имеет более крупный размер зерна, чем периферия (разница 20%). Оптимизация горячей прокатки, а именно корректировка схемы обжатий и величины относительного обжатия в каждом проходе, привела к повышению уровня механических свойств плит, в том числе и относительного удлинения в высотном направлении, а также к уменьшению неоднородности структуры.

Ключевые слова: сплав АК4-1ч, прокатка плит, механические свойства, относительное удлинение, структура

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

© Глинских П.И., Замараева Ю.В., Яковлев С.И., Завалий Е.А., 2025

Для цитирования

Определение оптимальных режимов горячей прокатки плит из алюминиевого сплава АК4-1ч / Глинских П.И., Замараева Ю.В., Яковлев С.И., Завалий Е.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 61-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-61-70>



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

DETERMINATION OF THE OPTIMAL MODES FOR HOT ROLLING OF AK4-1CH ALUMINUM ALLOY PLATES

Glinskikh P.I., Zamaraeva Yu.V., Yakovlev S.I., Zavaliy E.A.

¹JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia

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

³M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Rolled high-strength plates made from AK4-1ch alloy are a common semi-finished product for aviation purposes. However, one of the challenges of their production is the low relative elongation level and structural heterogeneity in the height direction of the plates. The aim of this study is to achieve a stable level of mechanical properties while increasing the relative elongation and reducing structural heterogeneity in plates with a thickness between 40 and 80 millimeters made from the AK4-1ch alloy, by adjusting the hot rolling conditions at JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works. After examining the mechanical properties of plates with a thickness between 40 and 80 millimeters produced using traditional methods, it was found that the average strength values, regardless of sampling direction, significantly exceed the standard requirements. The average values of transverse and longitudinal elongation for these plates also show a significant margin. In terms of height, the average elongation value is only 20% above the standard requirement. By examining the macrostructure of a sample with reduced elongation, a light area was found in the center of its cross-section. Examining the microstructure, it was determined that the light area had a larger grain size compared to the periphery, with a difference of 20%. Optimization of hot rolling process, such as adjusting the compression scheme and relative compression in each pass, has led to an improvement in mechanical properties, including relative elongation in height, as well as a reduction in structural heterogeneity.

The research was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for the Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Keywords: AK4-1ch alloy, plate rolling, mechanical properties, relative elongation, structure

For citation

Glinskikh P.I., Zamaraeva Yu.V., Yakovlev S.I., Zavaliy E.A. Determination of the Optimal Modes for Hot Rolling of AK4-1CH Aluminum Alloy Plates. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 61-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-61-70>

Введение

В настоящее время с целью получения высококачественных изделий из алюминиевых сплавов актуальна оптимизация технологических режимов изготовления полуфабрикатов [1], при этом достаточно большая часть работ направлена на повышение уровня механических свойств и актуализацию производства полуфабрикатов из жаропрочного сплава АК4-1 и его модификаций (АК4-1ч, АК4-2ч и др.) [2–5], относящихся к системе Al–Cu–Mg–Fe–Ni, по химическому и фазовому составам близким к дуралюминам, но вместо марганца в качестве легирующего элемента содержат железо и никель.

Особенность АК4-1ч – способность работать длительное время при повышенных температурах и эксплуатационных нагрузках без существенной остаточной деформации и разрушения [6, 7]. Данный сплав обладает оптимальным комплексом механических, коррозионных и технологических свойств, а также ресурсных характеристик и применяется как основной конструкционный материал в виде листов, плит, поковок и штампов, а также прессованных профи-

лей в авиастроении и автомобильной промышленности (головки цилиндров, поршни и т.д.) [8–11].

Производство плит из сплава АК4-1ч регламентировано стандартом ОСТ 1 90117-83 [12]. Данный стандарт предусматривает производство плит толщиной от 11 до 100 мм.

Одной из особенностей производства плит из сплава АК4-1ч толщиной 40-80 мм в состоянии поставки Т1 в условиях АО «Каменск-Уральский металлургический завод» (АО «КУМЗ») является низкий уровень относительного удлинения в высотном направлении и неоднородность структуры по толщине плиты. Аналогичная тема, а именно ухудшение качества проработки массивных катаных плит из сплава АК4-1 по их толщине, поднята авторами работ [13, 14].

В работе [15] показана возможная причина вышеуказанной проблемы – структура исходной заготовки, обладающая измененным характером распределения частиц основной избыточной фазы Al₃FeNi в различных зонах по ее толщине. В центре по толщине заготовки существует локальная область зональной ликвации с пониженным содержанием легирующих компонентов и грубыми эвтектическими колониями

фазы Al_9FeNi , что обусловлено условиями охлаждения при ее литье. Эта структурная неоднородность наследуется катаной плитой и приводит к получению на ее макроструктуре в центре по толщине более светлой области с укрупненным зерном, что влечет за собой пониженный уровень механических свойств в центральной зоне плиты.

Цель данной работы – получение стабильного уровня механических свойств, а также повышение значений относительного удлинения в высотном направлении и уменьшение неоднородности структуры по толщине высоких плит из сплава АК4-1ч посредством корректировки режимов горячей прокатки в условиях АО «КУМЗ».

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования произведена выборка из 633 плит из сплава АК4-1ч, изготовленных в производственных условиях АО «КУМЗ» по технологической схеме, включающей в себя литье слитка, его гомогенизацию и резку на заготовки, их фрезерование, нагрев и горячую прокатку, термообработку плит на твердый раствор, правку растяжением и искусственное старение. Из 633 плит 251 – толщиной до 12–40 мм включительно, 372 плиты – толщиной 40–80 мм.

Химический состав сплава АК4-1ч, соответствующий ОСТ 1 90048-90 [16], представлен в табл. 1.

Выбор химического состава сделан на основе работы [17], где для получения высокого уровня механических свойств плит из АК4-1 рекомендовано обеспечивать содержание кремния не ниже 0,15%, а содержание железа и никеля поддерживать близким к 1,0% для каждого. При этом допускается превышение на 0,05–0,20% содержание железа над содержанием никеля.

Механические свойства, а именно временное сопротивление (σ_b), условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительное удлинение (δ) в долевом (L), поперечном (LT) и для плит толщиной свыше 40 мм высотном (ST) направлении, определены посредством испытания на растяжение образцов диаметром 5,0 мм и расчетной длиной $l_0 = 5d_0$. Для осуществления испытания по стандарту ГОСТ 1497-73 [18] использовали

Таблица 1. Химический состав сплава АК4-1ч, мас. %
Table 1. Chemical composition of AK4-1ch alloy, wt. %

Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti	Ni	Другие элементы	Прочие элементы		Алюминий
								каждый	сумма	
0,15–0,25	0,9–1,2	1,9–2,7	1,3–1,8	max 0,10	0,04–0,10	0,9–1,2	-	max 0,05	max 0,15	основа

Таблица 2. Средние значения σ_b , $\sigma_{0,2}$ и δ в зависимости от толщины плиты и направления вырезки образцов
Table 2. Average values of σ_b , $\sigma_{0,2}$ and δ depending on the thickness of the plate and testing direction

Толщина плиты, мм	Направление вырезки образцов	σ_b , МПа	Требование ОСТ 1 90117, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Требование ОСТ 1 90117, МПа	δ , %	Требование ОСТ 1 90117, %
До 40 мм вкл.	L	433	410	392	315	11	6
	LT	434	390	380	325	9,7	6
Свыше 40 мм	L	420	410	394	315	10	6
	LT	425	390	386	325	8,9	6
	ST	401	375	380	295	4,8	4

универсальную испытательную машину INSTRON 5585H, оснащенную навесным и видеоэкстензометрами, гидравлическими захватами, устройствами для центрования захватов и программным обеспечением, позволяющим проводить испытания образцов из алюминиевых сплавов.

Анализ химического состава сплава проводился на оптико-эмиссионном спектрометре «SpectroLab» фирмы «Spectro».

Полученные результаты и их обсуждение

Средние значения временного сопротивления, условного предела текучести и относительного удлинения в зависимости от толщины плиты и направления вырезки образцов представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что средние значения вышеуказанных механических свойств для плит толщиной 12–40 мм включительно соответствуют требованиям [12], имея при этом технологический запас (для прочностных свойств превышение требований стандарта составляет 5,5–24%, для относительного удлинения – 61–83%). Для плит толщиной 40–80 мм независимо от направления вырезки образцов средние значения прочностных свойств также имеют технологический запас (2,5–28%). Средние значения относительного удлинения в направлении L и LT для данных плит имеют значительный запас относительно требований стандарта (48–66%), при этом в направлении ST среднее значение относительного удлинения является низким и превышает требования стандарта на 20%.

Дальнейшая работа направлена на повышение уровня относительного удлинения в высотном направлении плит толщиной 40–80 мм. В качестве объекта исследования выбрана плита из сплава АК4-1ч размером 70×1200×3000 мм в состоянии поставки Т1 с низким значением относительного удлинения.

Для определения причин низкого значения относительного удлинения в высотном направлении принято решение осуществить анализ макроструктуры исследуемой плиты.

Темплет для изучения макроструктуры, отобранный от вышеуказанной плиты, имеет размеры 70×50×250 мм. Схема отбора темплета для исследования макроструктуры представлена на рис. 1.

На макроструктуре темплета в центре поперечного сечения обнаружена светлая область (рис. 2).

Следующим этапом осуществлен анализ микроструктуры исследуемой плиты (схема отбора темплета соответствует рис. 1, размеры образца 70×50×50 мм). Исследование микроструктуры темплета осуществлено на уровне $\frac{1}{4}$ (рис. 3, а) и $\frac{1}{2}$ (рис. 3, б) его толщины.

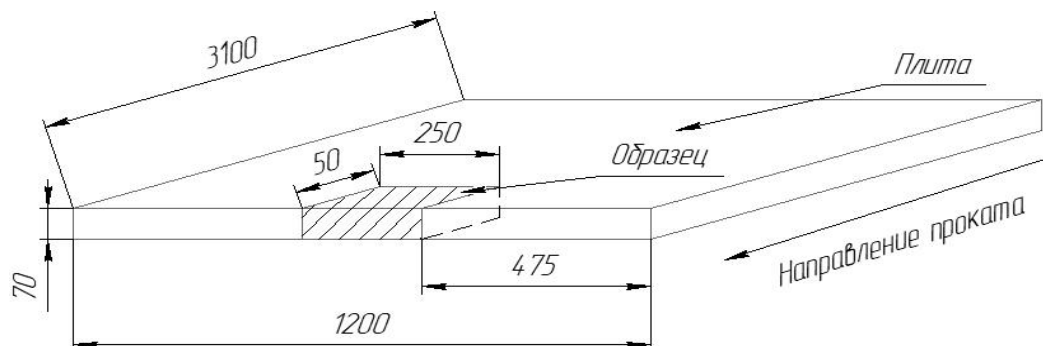


Рис. 1. Схема отбора образца для исследования макроструктуры
Fig. 1. Sample preparation scheme for macrostructure study

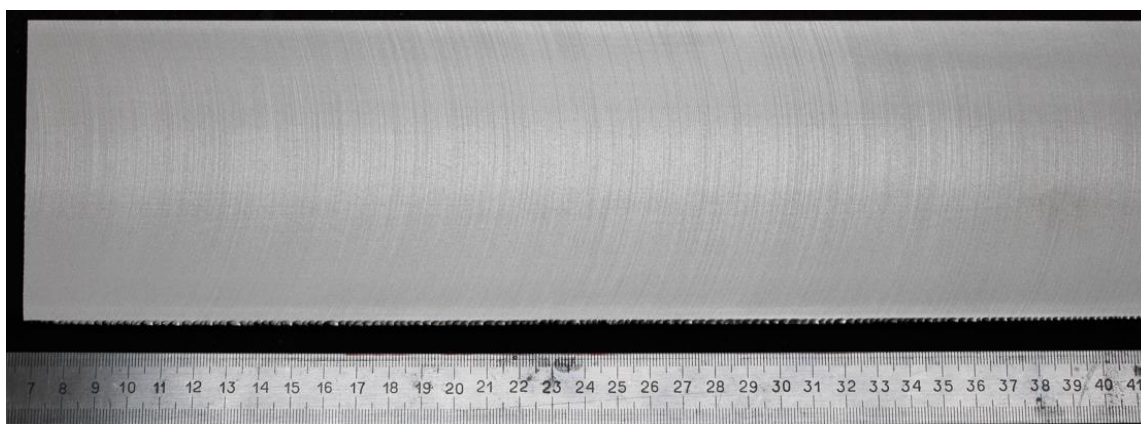
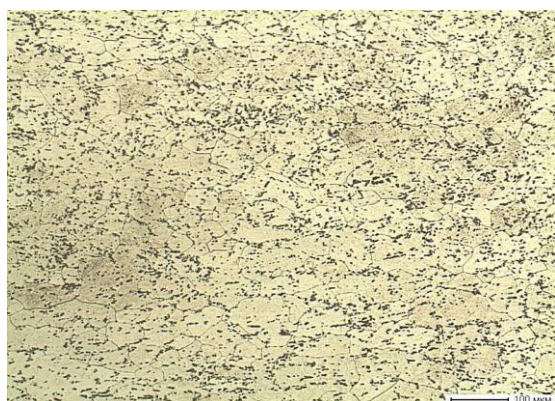
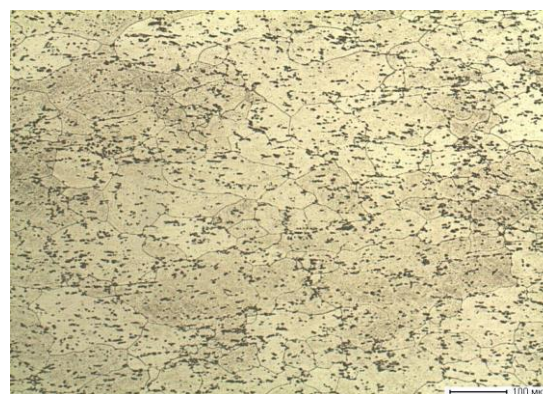


Рис. 2. Макроструктура поперечного сечения исследуемого темплета, отобранного от плиты, произведенной по классическим режимам

Fig. 2. Macrostructure of the cross-section of the templet under study, taken from a plate produced according to classical modes



а



б

Рис. 3. Микроструктура темплета на уровне $\frac{1}{4}$ (а) и $\frac{1}{2}$ (б) его толщины

Fig. 3. Microstructure of the templet at the level of $\frac{1}{4}$ (а) and $\frac{1}{2}$ (б) of its thickness

На уровне $\frac{1}{4}$ толщины плиты размер зерна составил 58 мкм, на уровне $\frac{1}{2}$ – 70 мкм. Таким образом, в выявленной на макроструктуре области светлой полосы темплет имеет более крупное зерно (разница с зерном приповерхностной зоны составляет 20%).

В работе [15] показано, что образование аналогичной светлой полосы на катаных плитах из сплава АК4-1 связано с центральным объемом плоского слитка, для которого характерна зональная ликвация с пониженным содержанием легирующих компонентов. Пониженное содержание легирующих компонентов в центральных объемах проката и более неоднородное распределение включений способствуют увеличению размера рекристаллизованного зерна. Более крупное зерно с большей площадью на шлифе участков твердого раствора, свободных от избыточных фаз, приводит к уменьшению количества растравленных межзеренных и межфазовых границ и к более сильному отражению света, в результате чего участки с подобной структурой выглядят более светлыми.

Принято решение оценить распределение основных легирующих элементов (Cu, Mg) по толщине поперечного сечения традиционного для АО «КУМЗ» плоского слитка размерами 400×1320 мм (исходная заготовка для получения исследуемой плиты) посредством спектрального анализа, для чего от слитка отобраны темплеты с литниковой и донной частей после обрезки. Анализ распределения элементов проводился по толщине темплетов с шагом 15–20 мм по схеме, представленной на рис. 4.

На рис. 5 представлено усредненное распределение меди и магния по толщине темплетов, отобран-

ных от литниковой (рис. 5, а, б соответственно) и донной (рис. 5, в, г соответственно) частей слитка.

На рис. 5 выявлена ярко выраженная зональная ликвация обратного типа, заключающаяся в снижении доли содержания основных легирующих элементов в центральных слоях исследуемых темплетов, что и является причиной образования светлой полосы и укрупнения зерна центральной части плит, изготавливаемых из данных слитков. При этом важно отметить, что процентное содержание основных легирующих элементов соответствует ОСТ 1-90048-90 [16], кроме того, данный слиток не имел типовых дефектов [19].

Для достижения поставленной в работе цели в условиях АО «КУМЗ» осуществлена корректировка режимов горячей прокатки плит.

Работы проведены на четырехвалковом реверсивном стане горячей прокатки «Кварто 2840 United» АО «КУМЗ». Диаметр рабочих валков, используемых на стане, 920-950 мм, максимальное развиваемое давление металла на валки – 3200 т.

Расчет схем обжатий выполнен таким образом, чтобы снизить количество проходов при $m \leq 0,55$, где m – коэффициент формы очага деформации, $m = l_d/h_{cp}$ (l_d – длина дуги захвата, h_{cp} – средняя толщина заготовки), так как прокат в этом диапазоне снижает механические свойства центральных слоев деформируемого раската, разрыхляя структуру за счет растягивающих напряжений, в то время как при значениях $m > 0,55$ уплотнение центральных слоев идет по схеме напряженного состояния, характеризуемой не только сжатием, но и растяжением в продольном направлении. Следует отметить, что значения коэффициента m приняты на основании работы [20].

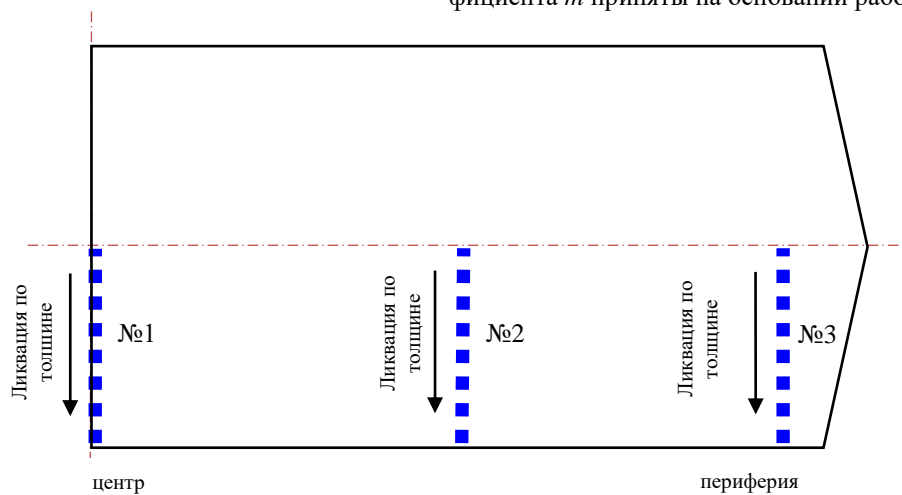


Рис. 4. Схема отбора проб для определения ликвации химических элементов методом спектрального анализа на плоскости темплета

Fig. 4. Sampling scheme for the determination of the chemical elements liquation by spectral analysis on the templet plane

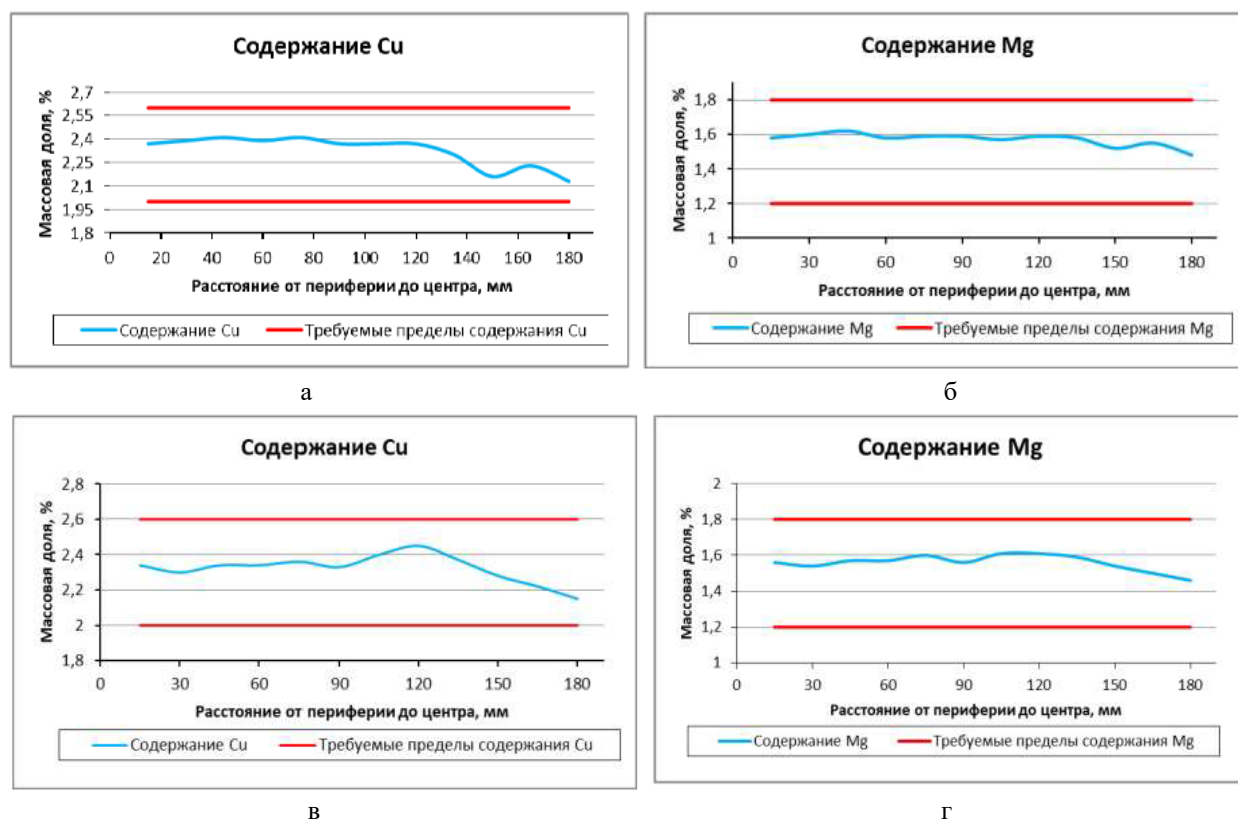


Рис. 5. Усредненное распределение меди и магния по толщине темплетов, отобранных от литниковой (а, б соответственно) и донной (в, г соответственно) частей слитка

Fig. 5. The average distribution of copper and magnesium over the thickness of the templates selected from the gate (а, б, respectively) and bottom (в, г, respectively) parts of the ingot

Введем коэффициент K – безразмерный коэффициент, позволяющий оценить степень проработки металла, рассчитываемый по формуле

$$K = \frac{\sum \Delta h_{(\text{при } m \geq 0,55)}}{\sum \Delta h_{(\text{при } m \leq 0,55)}}, \quad (1)$$

где $\sum \Delta h$ – суммарное абсолютное обжатие, мм.

Таблица 3. Расчет серийной схемы обжатий плиты сплава АК4-1ч сечения 70×1200 мм

Table 3. Calculation of the serial compression scheme for the AK4-1ch alloy plate with a cross section of 70×1200 mm

Абсолютное обжатие, мм	Средняя толщина полосы, мм	Длина дуги захвата, мм	Коэффициент формы очага деформации
10	375	68,92	0,184
0	370	0	0,000
15	362,5	84,40	0,233
20	345	97,46	0,283
30	320	119,37	0,373
35	287,5	128,93	0,448
35	252,5	128,93	0,511
35	217,5	128,93	0,593
35	182,5	128,93	0,707
30	150	119,37	0,796
25	122,5	108,97	0,890
20	100	97,46	0,975
18	81	92,46	1,142

Для обеспечения более полной проработки структуры по высоте плиты в качестве эксперимента произведена горячая прокатка при $K > 1,5$.

Расчет оптимизированной схемы обжатий приведен в табл. 4.

Таблица 4. Расчет оптимизированной схемы обжатий плиты сплава АК4-1ч сечения 70×1200 мм
Table 4. Calculation of the optimized compression scheme for an AK4-1ch alloy plate with a cross section of 70×1200 mm

Абсолютное обжатие, мм	Средняя толщина полосы, мм	Длина дуги захвата, мм	Коэффициент формы очага деформации
10	375	68,92	0,18
0	370	0,00	0,00
40	350	137,84	0,39
45	307,5	146,20	0,48
48	261	151,00	0,58
48	213	151,00	0,71
45	166,5	146,20	0,88
40	124	137,84	1,11
32	88	123,29	1,40

В данном случае $K = (48 + 48 + 45 + 40 + 32)/(10 + 0 + 40 + 45) = 2,24$, то есть увеличен в 2 раза относительно серийной схемы обжатий.

Оптимизированная схема обжатий позволяет вести прокат, не превышая энергосиловые параметры стана. Последующая обработка плит проводится по серийной технологии.

Для анализа временного сопротивления, условного предела текучести и относительного удлинения в направлении L, LT и ST после оптимизации схемы

Таблица 5. Средние значения σ_b , $\sigma_{0,2}$ и δ в зависимости от толщины плиты и направления вырезки образца
Table 5. The average values of σ_b , $\sigma_{0,2}$ and δ , depending on the thickness of the plate and testing direction

Толщина, мм	Направление вырезки образцов	σ_b , МПа	Требование ОСТ1 90117, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Требование ОСТ1 90117, МПа	δ , %	Требование ОСТ1 90117, %
Свыше 40 мм	L	433	410	396	315	9,7	6
	LT	437	390	390	325	8,6	6
	ST	416	375	388	295	6,3	4

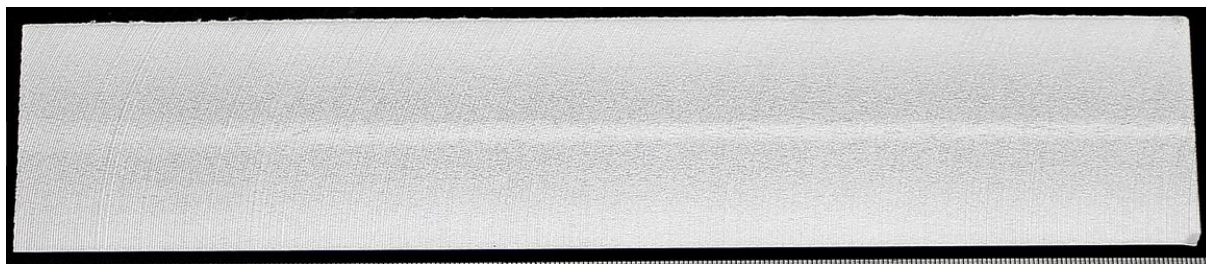


Рис. 6. Макроструктура поперечного сечения исследуемого образца, отобранного от плиты, произведенной по оптимизированным режимам

Fig. 6. The macrostructure of the cross-section of the sample under study, taken from a plate produced according to optimized modes

горячей прокатки произведена выборка из 160 плит толщиной 40-80 мм. Средние значения вышеуказанных механических свойств в зависимости от толщины и направления вырезки образцов после оптимизации схемы горячей прокатки представлены в табл. 5.

Среднее значение относительного удлинения исследуемой выборки плит в направлении ST составило 6,3% при требовании ОСТ1 90117-83 4%. Сравнение величин среднего значения относительного удлинения в высотном направлении до и после оптимизации позволило выявить его повышение в последнем случае на 31%.

Сравнение средних значений механических свойств до и после оптимизации позволяет отметить повышение их общего уровня, что положительно скажется на эксплуатационные свойства изделий.

Также проведено исследование макроструктуры образца, отобранного от плиты, произведенной по оптимизированным режимам обработки (рис. 6). Установлено, что ширина светлой полосы уменьшилась на 70% по сравнению с шириной полосы образца, отобранного от плиты, произведенной по классическому режиму.

Исследование микроструктуры образцов на уровне $\frac{1}{4}$ (рис. 7, а) и $\frac{1}{2}$ (рис. 7, б) толщины плиты показало, что размер зерна в первом случае равен 37 мкм (на 36% меньше, чем до оптимизации), во втором – 39 мкм (на 44% меньше, чем до оптимизации), то есть неоднородность сведена к минимуму.

Можно отметить, что более мелкое зерно в данном случае привело к повышению общего уровня механических свойств.

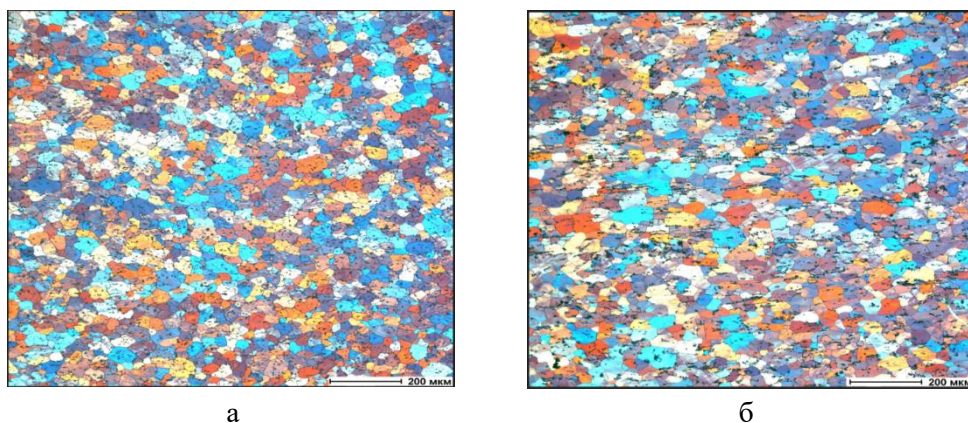


Рис. 7. Микроструктура образца на уровне $\frac{1}{4}$ (а) и $\frac{1}{2}$ (б) его толщины
 Fig. 7. Microstructure of the sample at the level of $\frac{1}{4}$ (a) and $\frac{1}{2}$ (b) of its thickness

Заключение

В результате исследования временного сопротивления, условного предела текучести и относительного удлинения плит толщиной до 40 мм включительно и свыше 40 мм в долевом, поперечном и высотном направлениях (последнее только для плит толщиной свыше 40 мм) выявлено, что средние значения вышеуказанных механических свойств для плит толщиной менее 40 мм включительно в направлениях L и LT превышают требования стандарта для прочностных свойств на 5,5–24%, для пластических свойств – 61–83%. Для плит толщиной свыше 40 мм независимо от направления вырезки образцов средние значения прочностных свойств также имеют технологический запас 2,5–28%. Средние значения относительного удлинения в направлении L и LT для данных плит имеют запас относительно требований стандарта 48–66%. Однако в направлении ST среднее значение относительного удлинения превышает требования стандарта только на 20%.

Посредством исследования макроструктуры образца с пониженным значением относительного удлинения в центре его поперечного сечения обнаружена светлая область, перпендикулярная направлению прокатки. Посредством исследования микроструктуры образца установлено, что светлая область имеет размер зерна на 20% больше, чем периферия. С целью повысить значения относительного удлинения и уменьшить неоднородность структуры в высотном направлении плит толщиной свыше 40 мм осуществлена оптимизация режимов горячей прокатки данных плит. Оптимизированные режимы, а именно горячая прокатка по схемам обжатий, рассчитанным при $K > 1,5$, привели к повышению общего уровня механических свойств плит, в частности, среднее значение относительного удлинения повышено на 31%, а также к уменьшению неоднородности структуры.

По итогам внедрения в схему производства исследуемых плит разработанных оптимизаций проведен анализ значения выхода годного. Установлено,

что оптимизированная схема горячей прокатки позволила увеличить выход годного на 4% по сравнению с выходом годного, получаемого по классическим режимам обработки.

Список источников

1. Яковлев С.И., Завалий Е.А., Замараева Ю.В. Оптимизация технологии производства плит из алюминиевого сплава 7475 // Технология легких сплавов. 2023. № 4. С. 79-87.
2. Логинов Ю.Н., Головин М.А., Снегирев И.В. Статистический анализ механических свойств плоского проката из алюминиевого сплава системы AlCu-Mg-Fe-Ni // Технология легких сплавов. 2017. №1. С. 29-34.
3. Особенности структуры и свойств ковано-катаных плит из конструкционного алюминиевого сплава системы Al-Mg-Cu / Е.Ф. Волкова, И.В. Мостяев, А.А. Алиханян и др. // Технология легких сплавов. 2022. № 4. С. 26-35.
4. Оптимизация режимов искусственного старения кованных и катаных полуфабрикатов из жаропрочного алюминиевого сплава АК4-1ч / А.А. Селиванов, К.В. Антипов, А.И. Асташкин и др. // Труды ВИАМ. 2018. № 4. С. 9-19.
5. Özbek I. A study on the re-solution heat treatment of AA 2618 aluminum alloy // Materials Characterization. 2007, vol. 58(3), pp. 312-317.
6. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 186-194.
7. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 195-211.
8. Микроструктура слитка сплава АК4-1ч и ее наследственное влияние на структуру катаной плиты / В.В. Телешов, Л.Г. Березин, Л.С. Осокин и др. // Цветные металлы и сплавы. 1997. № 11-12. С. 93-98.
9. Телешов В.В. Развитие конструкционных деформируемых алюминиевых сплавов систем Al-Cu и Al-Cu-Mg для длительной работы при повышенных температурах // Технология легких сплавов. 2009. № 4. С. 6-31.

10. Williams J., Starke E. Progress in structural materials for aerospace systems // *Acta Materialia*. 2003, vol. 51(19), pp. 5775–5799.
11. Компьютерное моделирование процесса получения штампованной заготовки из сплава АК4-1 для поршня двигателя внутреннего сгорания / И.Л. Константинов, Д.Г. Потапов, С.Б. Сидельников и др. // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2020. № 6. С. 24-31.
12. ОСТ 1 90117-83. Плиты авиационные из алюминиевого сплава марки АК4-1ч. М.: Изд-во стандартов, 1983.
13. Прочность и усталость ультрамелкозернистого алюминиевого сплава АК4-1 / Р.К. Исламгалиев, К.М. Нестеров, Э.Д. Хафизова и др. // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2012. № 8(53). С. 104-109.
14. Mesoscopic analysis of fatigue strength property of a modified 2618 aluminum alloy / L. Zeng, Z. Li, R. Che et al. // *International Journal of Fatigue*. 2014, vol. 59, pp. 215-223.
15. Телешов В.В. Развитие технологии производства плит из жаропрочного деформируемого алюминиевого сплава АК4-1 в связи с их структурой и механическими свойствами. Ч. 2. Особенности структуры плоских слитков и прокатанных из них плит // *Технология легких сплавов*. 2014. № 4. С. 6-22.
16. ОСТ 1 90048-90. Сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. М.: Изд-во стандартов, 1990.
17. Телешов В.В. Развитие технологии производства плит из жаропрочного деформируемого алюминиевого сплава АК4-1. Ч. 3. Влияние состава сплава и некоторых параметров технологии на механические свойства при растяжении и электрические характеристики полуфабрикатов // *Технология легких сплавов*. 2015. № 1. С. 8-26.
18. ГОСТ 1497-73. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 2011.
19. Типовые дефекты в слитках и полуфабрикатах из алюминиевых сплавов / Разинкин А.В., Мальцева Т.В., Овсянников Б.В., Левина А.В. Екатеринбург: Уральский рабочий, 2023.
20. Пат. 16291118 СССР, МПК В21В3/00. Способ горячей прокатки плит из алюминиевых сплавов / В.М. Чертовиков, И.М. Меерович, В.К. Орлов, В.И. Попов, Н.И. Беспутин; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт металлургического машиностроения им. А.И. Целикова. № 4629824/02; заявл. 28.11.1988; опубл. 23.02.1991.
- made of structural Al-Mg-Cu aluminum alloy. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2022;(4): 26-35. (In Russ.)
4. Selivanov A.A., Antipov K.V., Astashkin A.I. et al. Optimization of artificial aging modes for forged and rolled semi-finished products made of heat-resistant aluminum alloy AK4-1ch. *Trudy VIAM* [Proceeding of VIAM]. 2018;(4):9-19. (In Russ.)
5. Özbek I. A study on the re-solution heat treatment of AA 2618 aluminum alloy. *Materials Characterization*. 2007;58(3):312-317.
6. Antipov V.V. Prospects for the development of aluminum, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering products. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies]. 2017;(S):186-194. (In Russ.)
7. Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu., Romanenko V.A. Modern aluminum and aluminum-lithium alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies]. 2017;(S):195-211. (In Russ.)
8. Teleshov V.V., Berezin L.G., Osokin L.S. et al. Microstructure of AK4-1ch alloy ingot and its hereditary influence on the structure of rolled plate. *Tsvetnye metally i splavy* [Non-Ferrous Metals and Alloys]. 1997;(11-12):93-98. (In Russ.)
9. Teleshov V.V. Development of structural wrought aluminum alloys of Al-Cu and Al-Cu-Mg systems for long-term operation at elevated temperatures. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2009;(4):6-31. (In Russ.)
10. Williams J., Starke E. Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia*. 2003;51(19):5775-5799.
11. Konstantinov I.L., Potapov D.G., Sidelnikov S.B. et al. Computer simulation of the manufacturing process of a stamped blank from AK4-1 alloy for an internal combustion engine piston. *Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya* [Universities' Proceedings. Non-Ferrous Metallurgy]. 2020;(6):24-31. (In Russ.)
12. State standard OST 1 90117-83. Aviation plates made of aluminum alloy grade AK4-1h. Moscow: Standards Publishing House, 1983. (In Russ.)
13. Islamgaliev R.K., Nesterov K.M., Khafizova E.D. et al. Strength and fatigue of ultrafine-grained AK4-1aluminum alloy. *Vestnik Ufinskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ufa State Aviation Technical University]. 2012;(8(53)):104-109. (In Russ.)
14. L. Zeng, Z. Li, R. Che et al. Mesoscopic analysis of fatigue strength property of a modified 2618 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*. 2014;59:215-223.
15. Teleshov V.V. Development of production technology for plates from heat-resistant wrought aluminum alloy AK4-1 in relation to their structure and mechanical properties. Part 2. Structural features of flat ingots and rolled plates. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2014;(4):6-22. (In Russ.)
16. State standard OST 1 90048-90. Wrought aluminum alloy grades. Moscow: Standards Publishing House, 1990. (In Russ.)
17. Teleshov V.V. Development of production technology for plates from heat-resistant wrought aluminum alloy AK4-1. Part 3. Effect of alloy composition and processing parameters on tensile mechanical properties and electrical charac-

References

1. Yakovlev S.I., Zavaliiy E.A., Zamaraeva Y.V. Optimization of the production technology of plates made of 7475 aluminum alloy. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2023;(4):79-87. (In Russ.)
2. Loginov Yu.N., Golovnin M.A., Snegirev I.V. Statistical analysis of mechanical properties of flat rolled products made of Al-Cu-Mg-Fe-Ni aluminum alloy. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2017;(1):29-34. (In Russ.)
3. Volkova E.F., Mostyaev I.V., Alikhanian A.A. et al. Features of the structure and properties of forged-rolled plates

- teristics of semi-finished products. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2015;(1):8-26. (In Russ.)
18. State standard GOST 1497-73. Metals. Tensile test methods. Moscow: Standards Publishing House, 2011. (In Russ.)
 19. Razinkin A.V., Maltseva T.V., Ovsyannikov B.V., Levina A.V. *Tipovye defekty v slitkakh i polufabrikatakh iz al-yuminievykh splavov* [Typical defects in ingots and semi-finished products of aluminum alloys]. Yekaterinburg: Uralskiy rabochiy, 2023. (In Russ.)
 20. Chertovikov V.M., Meerovich I.M., Orlov V.K., Popov V.I., Besputin N.I. *Sposob goryachey prokatki plit iz al-yuminievykh splavov* [Method of hot rolling of plates from aluminum alloys]. Patent USSR, no. 16291118, 1991.

Поступила 12.05.2025; принята к публикации 04.07.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 12/05/2025; revised 04/07/2025; published 25/12/2025

Глинских Павел Иванович – инженер-технолог,
АО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия;
магистрант,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия.
Email: Pasha-glinskih@mail.ru

Замараева Юлия Валентиновна – кандидат технических наук, начальник отдела АО «КУМЗ»,
ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия;
научный сотрудник,
Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия.
Email: zamaraevajulia@yandex.ru. ORCID 0000-0002-2620-7064

Яковлев Сергей Иванович – главный прокатчик,
АО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия.
Email: YakovlevSI@kumw.ru.

Завалий Евгений Александрович – заместитель начальника цеха термомеханической обработки
листов и плит,
АО «Каменск-Уральский металлургический завод», Каменск-Уральский, Россия;
магистрант,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия.
Email: ZavaliyEA@kumw.ru.

Pavel I. Glinskikh – Process Engineer,
JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia;
Master's Student,
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: Pasha-glinskih@mail.ru

Yuliya V. Zamaraeva – PhD (Eng.), Head of Department,
JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia;
Researcher,
M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yekaterinburg, Russia.
Email: zamaraevajulia@yandex.ru. ORCID 0000-0002-2620-7064

Sergey I. Yakovlev – Chief Engineer of the Rolled Products,
JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia.
Email: YakovlevSI@kumw.ru

Evgeniy A. Zavaliy – Deputy Head of the Thermomechanical Treatment of Sheets and Plates Shop,
JSC Kamensk-Uralsky Metallurgical Works, Kamensk-Uralsky, Russia;
Master's Student,
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: ZavaliyEA@kumw.ru

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

УДК 669.715

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-71-79



ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОЙ АСИММЕТРИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ПЛАСТИЧНОСТЬ ПРИ ПРОКАТКЕ СПЛАВА СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-МАГНИЙ-СКАНДИЙ

Никитина М.А., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Песин И.А., Барышникова А.М., Носов Л.В.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Алюминиевые термически неупрочняемые сплавы системы алюминий-магний-скандий характеризуются хорошей свариваемостью, высокими механическими свойствами, сравнительно низкой плотностью и отсутствием упрочняющей термической обработки (например, таких как закалка и старение). Однако высокая стоимость данных сплавов является сдерживающим фактором для их применения в различных отраслях промышленности. В связи с этим необходимо разрабатывать способы обработки, позволяющие увеличить выход годного продукта с дорогостоящей лигатурой Al-2%Sc. Но из-за низкой технологической пластичности алюминиевых сплавов серии 5XXX происходит растрескивание кромок листов или полос при горячей прокатке, что требует увеличивать дробность деформации. Это, в свою очередь, отражается на конечной стоимости горячекатаного подката. Соответственно, исследование изменения технологической пластичности алюминиевых сплавов серии 5XXX при прокатке является актуальным. **Цель работы.** Определить параметры процесса асимметричной прокатки, в частности отношение скоростей валков, при обработке алюминиевого сплава серии 5XXX со скандием, обеспечивающее увеличение технологической пластичности материала при одновременном снижении усилия при горячей прокатке с сохранением уровня механических свойств после холодной прокатки. **Используемые методы.** Горячая и холодная прокатка проводилась на уникальном промышленно-лабораторном стане ДУО 400 лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Усилие, возникающее в процессе прокатки, регистрировалось программным обеспечением стана ДУО 400. Качество полученного подката оценивалось в соответствии с ГОСТ Р 57510-2017. Твердость поверхности определялась методом Бринелля в соответствии с ГОСТ 9012-59. Механические свойства оценивались в соответствии со стандартом ASTM E8. **Результат.** При отношении скоростей рабочих валков V_1/V_2 в диапазоне 1,1–1,3 при горячей прокатке дефекты отсутствовали. При этом усилие прокатки снижалось с 1400 до 1280 кН. Технологическая пластичность увеличилась, о чем свидетельствует снижение вероятности растрескивания кромок при увеличении относительного обжатия при горячей прокатке. Значения механических свойств после холодной прокатки (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ) варьировались в пределах: 421–464 МПа для временного сопротивления σ_b , 373–416 МПа для условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ и 2–7 % для относительного удлинения δ . **Практическая значимость.** Асимметричная прокатка влияет на изменение технологической пластичности алюминиевого сплава серии 5XXX с дорогостоящей лигатурой Al-2%Sc. В результате возможно снизить количество проходов при чистовой горячей прокатке (до одного). Благодаря этому исключается дополнительное захлаживание кромок и их растрескивание, а также положительно сказывается на стоимости горячекатаного подката и сроках его изготовления.

Ключевые слова: алюминиевый сплав 1580, асимметричная прокатка, горячая прокатка, скандий, горячекатаный подкат, скандийсодержащий сплав, плоский прокат, усилие прокатки, технологическая пластичность

Исследования выполнены за счет гранта РНФ (соглашение № 23-79-30015, <https://rscf.ru/project/23-79-30015/>)

© Никитина М.А., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Песин И.А., Барышникова А.М., Носов Л.В., 2025

Для цитирования

Влияние скоростной асимметрии на технологическую пластичность при прокатке сплава системы алюминий-магний-скандий / Никитина М.А., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Песин И.А., Барышникова А.М., Носов Л.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 71–79. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-71-79>



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

THE EFFECT OF THE SPEED ASYMMETRY ON TECHNOLOGICAL PLASTICITY OF THE ALUMINUM-MAGNESIUM-SCANDIUM SYSTEM ALLOY DURING ROLLING

Nikitina M.A., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Pesin I.A., Baryshnikova A.M., Nosov L.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Aluminum nonheat-treatable alloys of the aluminum-magnesium-scandium system are characterized by good weldability, high mechanical properties, relatively low density, and the absence of strengthening heat treatment (such as quenching and aging). However, the high cost of these alloys hinders their use in various industries. Therefore, it is necessary to develop processing methods that can increase the yield of the finished product with the expensive Al-2%Sc masteralloy. However, due to the low technological plasticity of 5XXX series aluminum alloys, edge cracking of sheets or strips occurs during hot rolling, which requires increasing the fractional deformation. This, in turn, affects the final cost of the semi-finished hot-rolled product. Accordingly, studying changes in the technological plasticity of 5XXX series aluminum alloys during rolling is relevant. **Objectives.** The work is aimed at determining the parameters of the asymmetric rolling process, in particular the rolls speed ratio, during processing the 5XXX series aluminum alloy with scandium, ensuring an increase in the technological plasticity of the material while reducing the force during hot rolling maintaining the level of mechanical properties after cold rolling. **Methods Applied.** Hot and cold rolling were carried out on a unique industrial and laboratory mill DUO 400 of the Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials of the NMSTU. The forces arising during rolling were recorded by the software of the DUO 400 mill. The quality of the obtained semi-finished rolled products was assessed in accordance with GOST R 57510-2017. Surface hardness was determined by the Brinell method in accordance with GOST 9012-59. Mechanical properties were assessed in accordance with the ASTM E8 standard. **Results.** At the rolls speed ratio V_1/V_2 in the range of 1.1-1.3, no defects were observed during hot rolling. The rolling force decreased from 1400 kN to 1280 kN. The technological plasticity increased, as evidenced by the decreased probability of edge cracking with an increase in the percent reduction during hot rolling. The values of mechanical properties after cold rolling (σ_v , $\sigma_{0.2}$, δ) varied within the range of 421-464 MPa for ultimate strength σ_v , 373-416 MPa for yield strength $\sigma_{0.2}$, and 2-7% for relative elongation δ . **Practical Relevance.** Asymmetric rolling affects the change in the technological plasticity of 5XXX series aluminum alloy with the expensive Al-2%Sc masteralloy. As a result, the number of passes during finish hot rolling can be reduced (to one). This eliminates additional edge cooling and cracking, and also has a positive effect on the cost of semi-finished hot-rolled products and their production time.

Keywords: aluminum alloy 1580, asymmetric rolling, hot rolling, scandium, semi-finished hot-rolled products, scandium-containing alloy, flat rolled products, rolling force, technological plasticity

The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant (Agreement No. 23-79-30015, <https://rscf.ru/project/23-79-30015/>).

For citation

Nikitina M.A., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Pesin I.A., Baryshnikova A.M., Nosov L.V. The Effect of the Speed Asymmetry on Technological Plasticity of the Aluminum-Magnesium-Scandium System Alloy During Rolling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 71-79. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-71-79>

Введение

Алюминиевые сплавы системы Al-Mg характеризуются высоким уровнем прочности, коррозионной стойкости и низкой плотностью, что делает их востребованными в транспортной, авиационной и строительной промышленности. Например, сплав AMг6, содержащий 6% магния, традиционно используется для изготовления герметичных сварных конструкций, применяемых в условиях высоких нагрузок и агрессивной среды. Однако его свойства в отожжённом состоянии часто не соответствуют требованиям эксплуатации, что приводит к необходимости использо-

вания сплава в нагартованном состоянии. Прокат Н (нагартованный) и НВП (нагартованный высокой прочностью) характеризуется повышенным комплексом прочностных свойств, но имеет определённые недостатки. Одним из таких существенных недостатков нагартованных алюминиевых сплавов является их склонность к разупрочнению в процессе длительного хранения и эксплуатации. Это обусловлено процессами рекристаллизации и миграции дефектов кристаллической решётки, которые приводят к снижению механических свойств материала.

Для преодоления указанных недостатков и расширения возможностей применения алюминиевых

сплавов системы Al-Mg учёные ОК «Русал» совместно с Сибирским федеральным университетом разработали новый экономно-легированный скандием алюминиевый сплав марки 1580. Скандий является высокоэффективным легирующим элементом для алюминиевых сплавов и обеспечивает существенное повышение механических характеристик, таких как прочность, пластичность и сопротивление усталостному разрушению. Дополнительное легирование алюминиевых сплавов скандием позволяет не только повысить их механические свойства, но и улучшить коррозионную стойкость, а также снизить склонность к разупрочнению. Исследования показали, что скандий эффективно растворяется в алюминии, образуя твёрдые растворы, которые упрочняют материал за счёт дисперсионного твердения. Это позволяет создавать сплавы с высокими эксплуатационными характеристиками, которые могут успешно конкурировать с традиционными материалами (например, сплавы АМг5 и АМг6) [1-7]. Идея использования скандия для упрочнения этих сплавов была разработана и запатентована в США в 1971 году [8]. В Советском Союзе первые промышленные сплавы на основе алюминия, магния и скандия были созданы в 1970-х годах под руководством М. Е. Дрица в Институте металлургии и под руководством В. И. Елагина в Центральном научно-исследовательском институте конструкционных материалов «Прометей» [9, 10].

В настоящее время в мире продолжают исследования алюминиевых сплавов системы Al-Mg с добавлением лигатуры Al-2%Sc. Однако основным препятствием для широкого применения сплавов, содержащих скандий, является их высокая стоимость (которая может достигать 50 долларов за килограмм). Это обстоятельство существенно ограничивает экономическую целесообразность использования данных сплавов. Для снижения стоимости горячекатаного проката, в свою очередь, необходимо сократить производственные издержки. Существующие методы обработки сплавов серии 5XXX, включающие многочисленные проходы при горячей прокатке, проведение отжигов для снятия внутренних напряжений, а также необходимость использования эджеров [11], существенно увеличивают производственные затраты. Необходимость использования большого количества проходов при горячей прокатке неизбежно снижает температуру кромок, что, как следствие, способствует образованию трещин на краях подката. Комплексный подход к совершенствованию производственных процессов (выплавки и обработки давлением) позволит снизить стоимость горячекатаного подката из сплавов, содержащих скандий, что, в свою очередь, расширит их применение в различных отраслях промышленности.

Материалы и методы исследования

С точки зрения обработки металлов давлением наибольший интерес представляет способ асимметричной прокатки как метод улучшения механических

и технологических характеристик металлов и сплавов. Асимметричными называются такие случаи прокатки, когда некоторые условия процесса или их комбинации несимметричны относительно оси проката. Существует несколько классификаций процессов асимметричной прокатки, но наиболее распространённая включает в себя шесть факторов асимметрии: геометрический, кинематический, поверхностный, физико-механический, контактный, температурный. В данной работе использовался метод асимметричной прокатки, в котором кинематическая асимметрия процесса создавалась за счёт рассогласования окружных скоростей валков. С помощью данного способа возможно усовершенствовать технологические схемы обработки алюминиевых сплавов системы Al-Mg с добавлением лигатуры Al-2%Sc. Его применение обеспечивает техническое преимущество, заключающееся в возможности уменьшения количества проходов в чистовой группе клетей при горячей прокатке. Более того при асимметричной прокатке измельчается структура материала, что позволяет получать конечный продукт с повышенным комплексом механических и технологических свойств [12].

Эффективность деформационного измельчения структурных элементов металлических материалов находится в прямой зависимости от кинематических параметров процесса, которые оказывают существенное влияние на механизмы деформации, такие как сжатие и сдвиг. В этом контексте анализ температурно-скоростных режимов деформирования является критически важным аспектом для совершенствования данного процесса. В соответствии с теоретическими основами обработки металлов давлением, кинематический анализ направлен на детальное изучение скорости перемещения металлической заготовки относительно деформирующего инструмента. Асимметричные условия при прокатке оказывают значительное воздействие на кинематические характеристики очага деформации, что приводит к изменению протяженности зон отставания и опережения. Эти зоны играют ключевую роль в определении эффективности и качества процесса деформационного измельчения, поскольку они напрямую влияют на микроструктурные параметры материала и его механические свойства [13-15].

В качестве объекта исследования был выбран алюминиевый сплав марки 1580 системы Al-Mg с добавлением лигатуры Al-2%Sc. Слиток сплава был получен методом литья в кристаллизатор скольжения на лабораторной установке.

Прокатка заготовки проводилась на промышленно-лабораторном стане ДУО 400 в научно-исследовательской лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Данный стан обладает статусом уникальной научной установки с возможностью изменения отношения скоростей рабочих валков V_1/V_2 в широком диапазоне благодаря индивидуальному приводу рабочих валков. Это позволяет реали-

зовывать процессы симметричной и асимметричной прокатки при $V_1/V_2 = 10/1$. Диаметры рабочих валков равны и составляют 340 мм.

Перед прокаткой слиток был подвергнут гомогенизации для обеспечения структурной однородности. После обточки размеры заготовки для последующей прокатки: толщина – 100 мм, ширина – 210 мм, длина – 210 мм. Нагрев заготовки перед горячей прокаткой осуществлялся в электропечи ПЛ20 до температуры 440°C, время выдержки составило 3 ч.

Прокатка исходного обточенного слитка осуществлялась в горячем симметричном режиме с толщины 100 до 16,1 мм. Полученная после горячей прокатки заготовка была порезана на шесть частей, как указано в табл. 1. Образец №1 был прокатан в симметричном режиме до конечной толщины 6,5 мм за три прохода. Перед асимметричной прокаткой образцы №2–5 были доведены до толщины 14 мм для получения целевой конечной толщины 6,5 мм из-за особенностей работы оборудования (для обеспечения захвата заготовки валками при установленном зазоре). Коэффициент асимметрии варьировался от 1,1 до 1,5. Скорость нижнего валка оставалась постоянной и составила 10 об/мин, в то время как скорость верхнего валка снижалась от 9,1 до 6,6 об/мин для обеспечения коэффициентов асимметрии в указанном диапазоне.

Таблица 1. Исходные данные для горячей прокатки
Table 1. Initial data for hot rolling

Номер образца	Начальная толщина заготовки, мм	Скорость верхнего валка, об/мин	Скорость нижнего валка, об/мин	Коэффициент асимметрии (V_1/V_2)
1	16,1	10,0	10,0	1
2	14,0	10,0	9,1	1,1
3	14,0	10,0	8,3	1,2
4	14,0	10,0	7,7	1,3
5	14,0	10,0	7,1	1,4
6	14,0	10,0	6,6	1,5

Усилие, возникающее в процессе прокатки, регистрировалось программным обеспечением промышленно-лабораторного стана ДУО 400.

Таблица 2. Результаты по выходным параметрам после горячей прокатки
Table 2. Results of output parameters after hot rolling

Номер образца	Отношение скоростей валков V_1/V_2	Коэффициент асимметрии	Относительное обжатие, %	Усилие прокатки, кН	Дефекты
1	10,0/10,0	1	20,3	1600	-
			27,8	1870	-
			30,1	1920	-
2	10,0/9,1	1,1	53,6	1400	-
3	10,0/8,3	1,2	53,8	1340	-
4	10,0/7,7	1,3	53,9	1280	-
5	10,0/7,1	1,4	57,2	1260	Серповидность
6	10,0/6,6	1,5	60,0	1160	Растрескивание кромки

Качество полученных образцов горячекатаного подката оценивалось в соответствии с ГОСТ Р 57510-2017 [16]. Основным критерием оценки являлось отсутствие дефектов, таких как трещины, разрывы и другие структурные неоднородности.

Твердость поверхности горячекатаного подката определялась методом Бринелля на универсальном твердомере EMCO TEST M4C/R G3 в соответствии с ГОСТ 9012-59 [17].

Для оценки механических свойств полученных образцов были проведены испытания на растяжение на испытательной машине Shimadzu Servopulser U-type в соответствии со стандартом ASTM E8. Определялись такие параметры, как временное сопротивление, условный предел текучести и относительное удлинение (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ). Образцы отбирались после холодной прокатки в нагартованном состоянии, что позволило оценить влияние предварительной деформации на их механические характеристики.

Полученные результаты и их обсуждение

В табл. 2 представлены результаты по значениям относительных обжатий и усилий прокатки при отношении скоростей валков в диапазоне от 1 до 1,5.

Суммарное относительное обжатие при горячей прокатке образца №1 за три прохода составило 59,7%.

Установлено, что при увеличении коэффициента асимметрии в диапазоне от 1,1 до 1,5 наблюдается закономерное снижение усилия прокатки: от 140 т при $V_1/V_2 = 1,1$ до 116 т при $V_1/V_2 = 1,5$. Это связано с ростом доли сдвиговой составляющей в очаге деформации и уменьшением нормальной составляющей контактных напряжений. Однако снижение усилия не является прямым индикатором повышения технологической пластичности, поэтому основным критерием оценки служит отсутствие дефектов поверхности и геометрии прокатываемого изделия.

При коэффициентах асимметрии 1,1–1,3 формирование подката происходит стабильно: кромочные дефекты и геометрические искажения не наблюдаются. В этом диапазоне обеспечивается устойчивый захват металла валками и стабильный очаг деформации.

При дальнейшем увеличении коэффициента асимметрии до 1,4 начинает проявляться серповидность прокатываемой полосы, обусловленная ростом кинематической неоднородности по толщине. Этот дефект особенно критичен при работе с образцами небольших размеров.

При коэффициенте асимметрии 1,5 зафиксировано появление выраженного растрескивания кромки, что свидетельствует о снижении технологической пластичности материала при высокой величине рассогласования окружных скоростей валков. Такой режим следует считать технологически неприемлемым.

Попытка выполнения прокатки при ещё большем коэффициенте асимметрии (1,6) показала полное отсутствие захвата заготовки при обжатии 53,6%, что указывает на критическое нарушение условий процесса.

Эти наблюдения согласуются с результатами механических испытаний после холодной прокатки: в диапазоне коэффициентов 1,4–1,5 относительное удлинение снижается, что указывает на ухудшение пластичности материала.

Результаты измерения твёрдости горячекатаного подката до и после отжига представлены на **рис. 1**.

Анализ полученных данных показывает, что максимальная твёрдость наблюдается у образца, прокатанного в симметричном режиме $V_1/V_2 = 1,0$: значение составляет 126 НВ до отжига. При переходе к асимметричной прокатке твёрдость уменьшается и для

коэффициентов асимметрии 1,1–1,2 находится в диапазоне 105–108 НВ. Дальнейшее увеличение коэффициента асимметрии до 1,3–1,5 приводит к небольшому росту твёрдости (до 109–115 НВ), однако этот рост остаётся в пределах экспериментальной погрешности, что не позволяет говорить о выраженной зависимости твёрдости от величины рассогласования скоростей валков.

После проведения отжига твёрдость всех образцов выравнивается и находится на уровне 104–110 НВ. Характерная особенность заключается в том, что именно симметрично прокатанный образец демонстрирует наиболее существенное снижение твёрдости – со 126 до 110 НВ, что приводит его параметры к уровню асимметрично прокатанных образцов.

Полученные данные подтверждают, что различия в исходной твёрдости после горячей прокатки практически нивелируются отжигом. Это указывает на то, что холодная прокатка подката, полученного в симметричном и асимметричном режимах, может выполняться при одинаковых технологических параметрах. Следовательно, при использовании асимметричной горячей прокатки появляется возможность исключить промежуточный отжиг перед холодной прокаткой без риска ухудшения условий захвата или увеличения усилия деформации.

Результаты исследований механических свойств после холодной прокатки, проведенной по стандартной технологии, представлены на **рис. 2**.

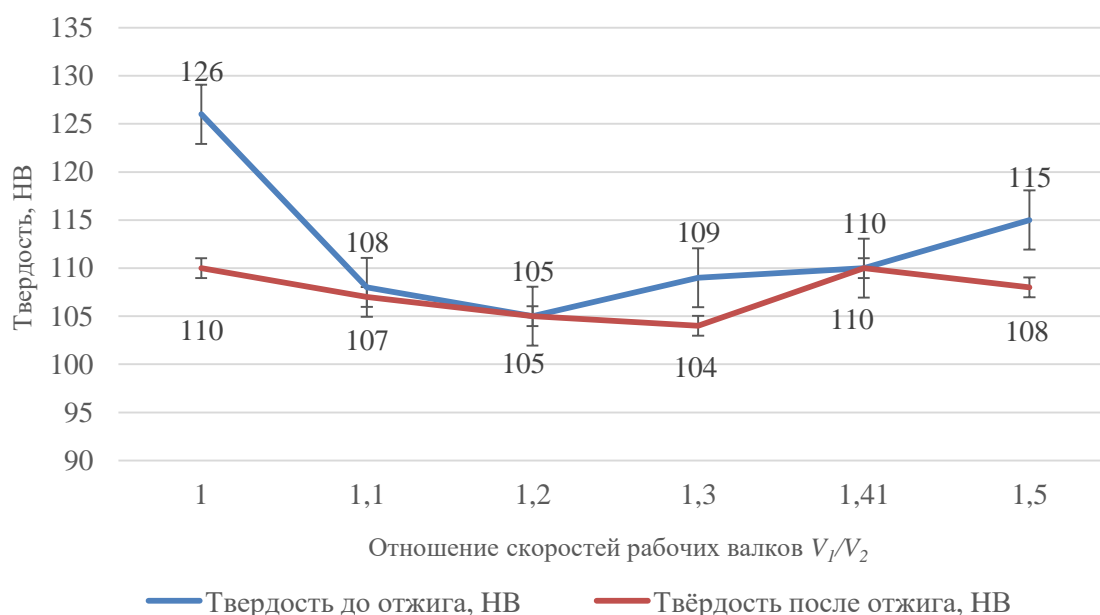


Рис. 1. Влияние коэффициента асимметрии на твердость проката

Fig. 1. The effect of the asymmetry coefficient on the hardness of rolled products

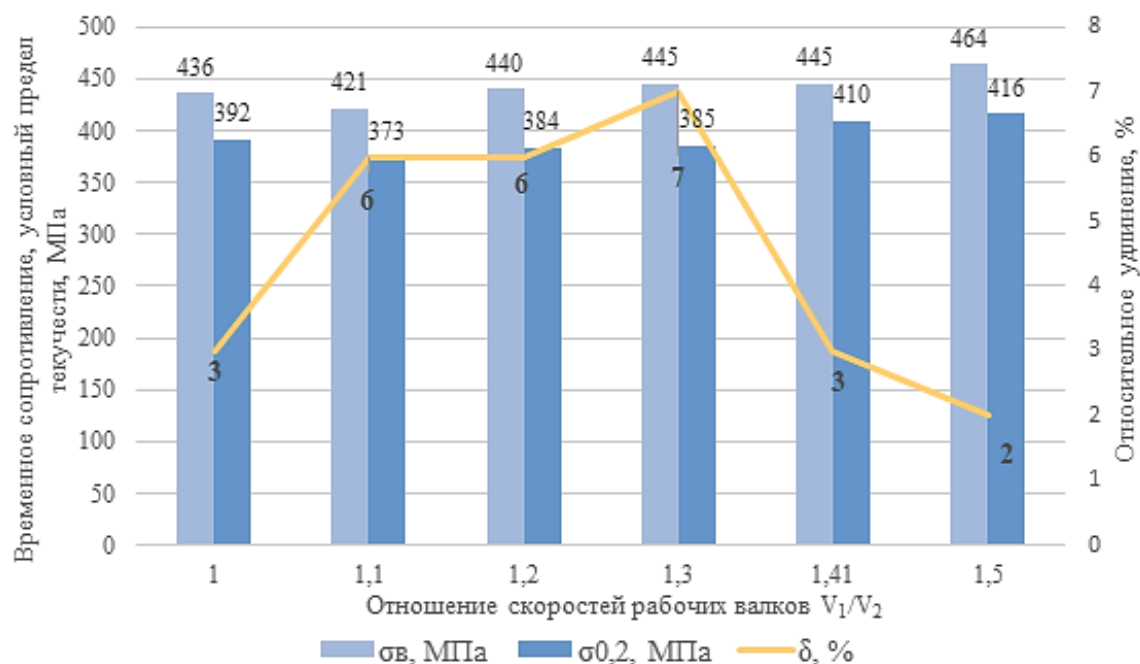


Рис. 2. Влияние коэффициента асимметрии на изменение механических свойств после холодной прокатки
Fig. 2. The influence of the asymmetry coefficient on the changes of mechanical properties after cold rolling

Анализ представленных данных показывает, что применение асимметричной горячей прокатки с коэффициентом асимметрии 1,1–1,3 обеспечивает наиболее благоприятное сочетание механических свойств после последующей холодной прокатки. В данном диапазоне наблюдается увеличение относительного удлинения δ до 6–7%, что превышает значения, полученные после симметричной прокатки ($\delta \approx 3\%$). При дальнейшем увеличении коэффициента асимметрии до 1,4–1,5 относительное удлинение снижается до 2–3%, что свидетельствует об ухудшении пластичности материала.

Временное сопротивление σ_b и условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ во всех исследованных режимах различаются несущественно и остаются в диапазонах 421–464 и 373–416 МПа соответственно. Это указывает на то, что изменение кинематических условий горячей прокатки в первую очередь отражается на пластичности материала, тогда как уровень прочности изменяется в пределах статистической погрешности.

Экспериментальные данные показали, что применение асимметричной горячей прокатки при повышении коэффициента асимметрии до значений 1,1–1,3 обеспечивает формирование проката с более благоприятным сочетанием механических и технологических свойств по сравнению с симметричной прокаткой. Сопоставление твердости и механических характеристик образцов, прошедших различные режимы обработки, также показывает, что проведение отжига после горячей прокатки не приводит к заметному изменению прочностных параметров. Это позволяет рассматривать возможность исключения операции отжига на данном этапе обработки без ухудшения качества получаемого материала и, как след-

ствие, сокращения продолжительности технологического цикла.

Заключение

Проведённые исследования показали, что изменение кинематических условий горячей прокатки оказывает значимое влияние на технологическую пластичность и механическое состояние алюминиевого сплава 1580. Установлено, что асимметричная горячая прокатка в диапазоне коэффициентов асимметрии 1,1–1,3 обеспечивает устойчивый процесс деформации без возникновения кромочных дефектов и геометрических искажений, а также приводит к снижению усилия прокатки по сравнению с симметричным режимом.

При увеличении коэффициента асимметрии до 1,4 наблюдается развитие серповидности, а при 1,5 – выраженное растрескивание кромки, что свидетельствует о снижении технологической пластичности и делает такие режимы технологически неприемлемыми.

Анализ твердости и механических свойств показал, что различия, возникающие после горячей прокатки, нивелируются последующим отжигом, а прочностные характеристики σ_b и $\sigma_{0,2}$ во всех режимах остаются на сопоставимом уровне. Существенные изменения наблюдаются в показателях пластичности: при коэффициентах асимметрии 1,1–1,3 относительное удлинение достигает 6–7% после холодной деформации, что превышает значения после симметричной прокатки.

Таким образом, асимметричная горячая прокатка с коэффициентом асимметрии 1,1–1,3 обеспечивает увеличение технологической пластичности сплава.

Полученные результаты указывают на возможность исключения промежуточного отжига перед холодной прокаткой, а также обосновывают предпосылки для уменьшения числа проходов на стадии горячей чистовой прокатки.

Список источников

1. Филатов Ю.А. Алюминиевые сплавы системы Al–Mg–Sc для космической техники // Технология легких сплавов. 2013. № 4. С. 61–65.
2. Захаров В.В., Филатов Ю.А. Современные тенденции развития алюминиевых сплавов, легированных скандием // Технология легких сплавов. 2022. № 3. С. 9–18.
3. Филатов Ю.А. Развитие представлений о легировании скандием сплавов Al–Mg // Технология легких сплавов. 2015. № 2. С. 19–22.
4. Пат. 2343218 РФ, МПК C22C 21/08. Криогенный деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия / Ю.А. Филатов, В.И. Елагин, В.В. Захаров, Л.И. Панасюгина, Р.И. Доброжинская и др. Заявл. 06.04.2007; Опубл. 10.01.2009. Бюл. № 1.
5. Захаров В.В., Филатов Ю.А., Дриц А.М. Возможности повышения прочностных свойств крупногабаритных полуфабрикатов из сплавов Al–Mg–Sc // Технология легких сплавов. 2023. № 4. С. 34–41.
6. Эффективность Sc для упрочнения и улучшения формовости листов BIW 5XXX / Никитина М., Градобоев А., Рябов Д., Вахромов Р., Манн В., Крохин А. // Легкие металлы 2023 / под ред. С. Брук. TMS, 2023. (Серия «Минералы, металлы и материалы»).
7. Наноструктурная иерархия повышает прочность алюминиевых сплавов / Лиддикот П.В., Ляо Сяо-Чжоу, Чжао Ю. и др. // Nature Communications. 2010. Т. 63. С. 1–7.
8. Пат. US 3619181 A, МПК C22C 21/00. Aluminum scandium alloy / Willey L. A.; Aluminum Co. of America. Заявл. 29.10.1968; Опубл. 09.11.1971. 8 с.
9. Структура и свойства сплавов Al–Sc и Al–Mg–Sc / Дриц М.Е., Торопова Л.С., Быков Ю.Г., Елагин В.И., Филатов Ю.А. // Металлургия и металловедение цветных сплавов. М.: Наука, 1982. С. 213–223.
10. Металловедческие принципы легирования алюминиевых сплавов скандием / Захаров В.В., Елагин В.И., Ростова Т.Д., Филатов Ю.А. // Технология легких сплавов. 2010. № 1. С. 67–73.
11. Сплавы алюминия с магнием (магналии) // Промышленные алюминиевые сплавы: справочное издание / Н.Б. Кондратьева, Ю.С. Золоторевский, С. Г. Алиева, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1984. С. 37–51.
12. Разработка технологических схем асимметричной прокатки алюминиевых лент, обладающих повышенной прочностью и пластичностью / Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Песин И.А., Кожемякина А.Е., Носов Л.В., Сверчков А.И. // Теория и технология металлургического производства. 2022. Т. 41, № 2. С. 32–40.
13. Влияние соотношения толщин на структуру поверхности раздела и механические свойства композитных пластин Mg/Al в условиях асимметричной разницы температур / Чжи К.С., Ву З.Ю., Ма Л.Ф., Хуан З.К., Чжэн З.Б., Сюй Х., Цзя У.Т., Лей Дж. Ю. // Journal of Materials Research and Technology. 2023. Т. 24. С. 8332–8347.
14. Амегадзи М.Ю., Бишоп Д.П. Влияние асимметричной прокатки на микроструктуру и механические свойства деформируемого алюминия марки 6061 // Materials Today Communications. 2020. № 25. Ст. 101283.
15. Чжао Цилинь, Ху Сянлэй, Лю Сянхуа. Анализ механических параметров при многопроходной асимметричной прокатке полосы слябовым методом // Materials. 2023. Т. 16, № 18. Ст. 6286.
16. ГОСТ Р 57510-2017. Катаные изделия из алюминиевых сплавов. Термины и определения дефектов. М.: Стандартинформ, 2017. 52 с.
17. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. М.: Стандартинформ, 2007. 39 с.

References

1. Filatov Yu.A. Aluminum alloys of the Al–Mg–Sc system for space technology. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2013;(4):61-65. (In Russ.)
2. Zakharov V.V., Filatov Yu.A. Modern trends in the development of aluminum alloys alloyed with scandium. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2022;(3):9-18. (In Russ.)
3. Filatov Yu.A. Development of ideas on scandium alloying of Al-Mg alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2015;(2):19-22. (In Russ.)
4. Filatov Yu.A., Elagin V. I., Zakharov V.V., Panasyugina L.I., Dobrozinskaya R.I. et al. *Kriogenniy deformiruemiy termicheski neuprochnyaemiy spлав na osnove alyuminiya* [Cryogenic deformable non-heat-treatable aluminum-based alloy]. Patent RU, no. 2343218, 2009.
5. Zakharov V.V., Filatov Yu.A., Drita A.M. Possibilities of increasing the strength properties of large-sized semi-finished products made of Al–Mg–Sc alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2023;(4):34-41. (In Russ.)
6. Nikitina M., Gradoboev A., Ryabov D., Vakhromov R., Mann V., Krokhin A. *Effektivnost Sc dlya uprochneniya i uluchsheniya formuemosti listov BIW 5HKHKH* [Efficiency of Sc for strengthening and formability improvement of BIW 5XXX sheets]. In: *Light Metals 2023*, ed. by S. Broek. TMS, 2023. (In Russ.)
7. Liddicoat P. V., Liao Xiao-Zhou, Zhao Y. et al. Nanostructural hierarchy increases the strength of aluminum alloys. *Nature Communications*, 2010;63:1-7.
8. Willey L.A. Aluminum scandium alloy. Patent US, no. 3619181, 1971.
9. Drita M.E., Toropova L.S., Bykov Yu.G., Elagin V.I., Filatov Yu.A. Structure and properties of Al–Sc and Al–Mg–Sc alloys. *Metallurgiya i metallovedenie tsvetnykh splavov* [Metallurgy and Metal Science of Non-Ferrous Alloys]. Moscow: Nauka, 1982. Pp. 213-223. (In Russ.)
10. Zakharov V.V., Elagin V.I., Rostova T.D., Filatov Yu.A. Metallurgical principles of scandium alloying of aluminum alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys]. 2010;(1):67-73. (In Russ.)
11. Kondratyeva N.B., Zolotarevsky Yu.S., Aliyeva S.G., Altman M.B., Ambartsumyan S.M. *Splavy alyuminiya s magniem (magnalii)*. V kn.: *Promyshlennye alyuminiyevye splavy: spravocnoe izdanie* [Aluminum alloys with magnesium (magnalium). In: *Industrial Aluminum Alloys: ref-*

- erence book]. Moscow: Metallurgiya, 1984, pp. 37-51. (In Russ.)
12. Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Pesin I.A., Kozhemyakina A.E., Nosov L.V., Sverchkov A.I. Development of technological schemes for asymmetric rolling of aluminum strips with increased strength and ductility. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and Technology of Metallurgical Production]. 2022;41(2):32-40. (In Russ.)
 13. Zhi C.C., Wu Z.Y., Ma L.F., Huang Z. Q., Zheng Z.B., Xu H., Jia W.T., Lei J.Y. Effect of thickness ratio on interfacial structure and mechanical properties of Mg/Al composite plates under differential-temperature asymmetric rolling. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24:8332-8347.
 14. Amegadzie M.Y., Bishop D.P. Effect of asymmetric rolling on the microstructure and mechanical properties of wrought 6061 aluminum. *Materials Today Communications*. 2020;(25):101283.
 15. Zhao Qilin, Hu Xianlei, Liu Xianghua. Analysis of mechanical parameters in multi-pass asymmetrical rolling of strip using the slab method. *Materials*. 2023;16(18):6286.
 16. State standard GOST P 57510-2017. Rolled products made of aluminum alloys. Terms and definitions of defects. Moscow: Standartinform, 2017, 52 p. (In Russ.)
 17. State standard GOST 9012-59. Metals. Brinell hardness measurement method. Moscow: Standartinform, 2007, 39 p. (In Russ.)

Поступила 21.11.2025; принята к публикации 10.12.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 21/11/2025; revised 10/12/2025; published 25/12/2025

Никитина Маргарита Александровна – инженер,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mgurbich@yandex.ru. ORCID 0009-0000-4159-8254

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

Бирюкова Олеся Дмитриевна – кандидат технических наук, старший преподаватель,
старший научный сотрудник,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: fimapartisonchik@inbox.ru ORCID 0000-0002-3922-9289

Песин Илья Александрович – кандидат технических наук, начальник технологического отдела,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ilya33392@bk.ru. ORCID 0000-0002-5866-8308

Барышникова Анна Михайловна – аспирант, инженер,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: anyabar1999@mail.ru. ORCID 0000-0003-2406-4095

Носов Леонид Васильевич – инженер,
НИИ «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева»,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: nosov.leopold@yandex.ru. ORCID 0009-0001-8018-2603

Margarita A. Nikitina – Engineer,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mgurbich@yandex.ru. ORCID 0009-0000-4159-8254

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

Olesya D. Biryukova – PhD (Eng.), Senior Lecturer, Senior Researcher,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: fimapartisonchik@inbox.ru ORCID 0000-0002-3922-9289

Ilya A. Pesin – PhD (Eng.), Head of the Technological Department,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ilya33392@bk.ru. ORCID 0000-0002-5866-8308

Anna M. Baryshnikova – Postgraduate Student, Engineer,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: anyabar1999@mail.ru. ORCID 0000-0003-2406-4095

Leonid V. Nosov – Engineer,
Zhilyaev Laboratory of Mechanics of Gradient Nanomaterials,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: nosov.leopold@yandex.ru. ORCID 0009-0001-8018-2603

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 621.941.01

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-80-86



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ СВОЙСТВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРОЦЕССОМ РЕЗАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 12X18H10T

Артамонов Е.В., Штин А.С., Тверяков А.М., Василега Д.С.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Современные газотурбинные двигатели обуславливают высокие требования к материалам, используемым в их конструкциях. Детали таких двигателей, как лопатки турбин, диски, камеры сгорания и сопловые аппараты, работают в экстремальных условиях: при высоких температурах, значительных механических нагрузках и агрессивных средах. **Целью работы** является исследование свойств инструментальных твердых сплавов марок BK8, T5K10 и T14K8 и их влияния на характеристики процесса резания криогенной конструкционной стали 12X18H10T. **Используемые методы.** При решении вышеуказанных задач использовались теоретические и экспериментальные методы исследования резания металлов, режущего инструмента и законов физики раздела электродинамики. **Новизна.** Установлена взаимосвязь физико-механических характеристик материалов с механическими характеристиками процесса резания. **Результат.** Проведенные исследования показали, что интенсивность изнашивания инструмента, величина шероховатости и наклеп обработанной поверхности находятся в корреляционной взаимосвязи. **Практическая значимость.** Результаты исследований в этой области имеют ключевое значение для авиационного и энергетического машиностроения, где снижение себестоимости изготовления деталей при сохранении их надежности остается одной из важнейших задач.

Ключевые слова: резание материалов, токарная обработка, физико-технические характеристики материалов, твердые сплавы, механические характеристики процесса резания

© Артамонов Е.В., Штин А.С., Тверяков А.М., Василега Д.С., 2025

Для цитирования

Исследование взаимосвязи свойств инструментальных материалов с процессом резания на примере токарной обработки стали 12X18H10T / Артамонов Е.В., Штин А.С., Тверяков А.М., Василега Д.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 80-86. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-80-86>



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

RESEARCH ON THE RELATIONSHIP BETWEEN TOOL MATERIAL PROPERTIES AND THE CUTTING PROCESS: A CASE STUDY OF TURNING 12H18N10T STEEL

Artamonov E.V., Shtin A.S., Tveryakov A.M., Vasilega D.S.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Modern gas turbine engines impose high requirements to the materials used in their constructions. Parts of such engines as turbine blades, discs, combustion chambers and nozzle assembly work in extreme conditions: at high temperatures, significant mechanical loads and aggressive media. **Objectives.** The aim of the work is to study the properties of tool hard alloys of WC8 (92%WC+8%Co), TiC5C10 (85%WC+5%TiC+10%Co) and TiC14C8 (78%WC+14%TiC+8%Co) grades and their influence on the cutting process characteristics of cryogenic structural 12H18N10T (0,12%C+18%Cr+10%Ni+10%Ti+61,88%Fe) steel. **Methods Applied.** When solving the above mentioned problems, theoretical and experimental methods of study of metal cutting, cutting tools and laws of physics of electrodynamics field were used. **Originality.** The interrelation of physical and mechanical characteristics of materials with mechanical characteristics of cutting process is established. **Result.** The conducted research has shown that the intensity of tool wear, roughness value and coldworking of the processed surface are correlated. **Practical significance.** The results of research in this area are of key importance for aviation and power engineering, where the reduction of production cost of parts while maintaining their reliability remains one of the most important tasks.

Keywords: cutting of materials, turning process, physical and technical characteristics of materials, hard alloys, mechanical characteristics of the cutting process

For citation

Artamonov E.V., Shtin A.S., Tveryakov A.M., Vasilega D.S. Research on the Relationship Between Tool Material Properties and the Cutting Process: a Case Study of Turning 12H18N10T Steel. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 80-86. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-80-86>

Введение

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) обуславливают высокие требования к материалам, используемым в их конструкциях. Детали таких двигателей, как лопатки турбин, диски, камеры сгорания и сопловые аппараты, работают в экстремальных условиях: при высоких температурах, значительных механических нагрузках и агрессивных средах. Для обеспечения надежности и долговечности этих компонентов применяются труднообрабатываемые материалы, такие как жаропрочные никелевые и кобальтовые сплавы, титановые композиты и керамические покрытия.

Однако уникальные эксплуатационные свойства этих материалов создают серьезные технологические сложности при их механической обработке. Высокая твердость, низкая теплопроводность, склонность к наклепу и абразивному износу инструмента требуют применения специализированных методов резания, нетрадиционных способов обработки и оптимизации режимов. В данной статье рассматриваются основные проблемы, возникающие при обработке труднообрабатываемых материалов для ГТД, а также перспективные технологические решения, направленные на повышение эффективности производства и качества деталей.

На сегодняшний день работоспособность режущего инструмента изучена с различных позиций, в том числе прочности и стойкости. Однако влияние физико-

механических свойств инструментального материала на работоспособность изучено недостаточно полно. Значительный вклад в развитие науки о резании металлов и режущем инструменте внесли ученые: Бобров В.Д. [1], Васин С.А. [2], Верещака А.С. [3], Грановский Г.И. [4], Григорьев С.Н. [5], Древаль А.Е. [6], Зорев Н.Н. [7], Кабалдин Ю.Г. [8], Креймер, Г.С. [9], Лоладзе Т.Н. [10], Макаров А.Д. [11], Полетика М.Ф. [12], Силин С.С. [13], M. Carceanu, I. [14], Ferri, C. [15], Kümmel, J. [16], Munish Kumar Gupta [17], Murthy, K.S. [18], Neugebauer R. [19], Nurulamin A. [20], Patwari A. [21], Tillmann W. [22].

Результаты исследований в этой области имеют ключевое значение для авиационного и энергетического машиностроения, где снижение себестоимости изготовления деталей при сохранении их надежности остается одной из важнейших задач.

Целью работы является исследование свойств инструментальных твердых сплавов марок BK8, T5K10 и T14K8 и их влияния на характеристики процесса резания криогенной конструкционной стали 12X18H10T.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести литературный обзор по исследуемой тематике.
2. Определить характеристики процесса резания, реагирующие на изменение свойств инструментальных материалов.

3. Провести исследование взаимосвязи свойств инструментальных материалов и характеристик процесса резания на примере токарной обработки стали 12Х18Н10Т.

Известно, что резцы, оснащенные различными марками твердых сплавов, имеют различные оптимальные скорости резания, при которых интенсивность их износа минимальна. Следовательно, путем выбора соответствующего инструментального материала можно в известных пределах регулировать интенсивность изнашивания инструмента и точность обработки.

В связи с этим представляет научный и практический интерес выяснение возможности регулирования качества поверхностного слоя деталей за счет выбора соответствующего инструментального материала.

Материалы и методы исследования

В ходе литературного анализа было выявлено, что во всей взаимосвязи явлений при резании материалов определяющим является температурный фактор. На основании этого было принято решение провести исследования свойств инструментальных материалов от температуры.

На ранее разработанной установке были проведены исследования свойств инструментальных твердых сплавов на примере ВК8 на пластинках в состоянии поставки. По результатам исследований для более удобного и наглядного выявления температурного интервала максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин строится графическая зависимость изменения магнитного поля вихревых токов, наводимых в твердых сплавах от температуры нагрева. По построенной зависимости выявляется участок исследуемой характеристики с критическим изменением своих значений, затем графическим способом производится вычерчивание перпендикулярной линии оси ординат на 5% ниже от максимального значения исследуемой характеристики. Координаты точек пересечения построения прямых линий и основной кривой графика принимают за границы, затем определяется значение температуры, соответствующей данным границам. Полученный температурный интервал $\Delta \Theta_{\text{мр}}$, °С, с границами, выявленными графическим способом, принимают за интервал повышенных эксплуатационных характеристик режущего инструмента, оснащенного твердым сплавом.

Данная методика позволяет определять температурные интервалы повышенных эксплуатационных характеристик режущего инструмента, оснащенного твердым сплавом, на примере сплава ВК8. Метод основывается на построении графической зависимости сменных режущих пластин из инструментальных твердых сплавов в температурном диапазоне, характерном для обработки металлов резанием до 1000°С, где выявляется диапазон температур с наибольшим изменением магнитного поля вихревых токов, наводимых в сменных режущих пластинках, выявляется величина погрешностей при измерениях, затем опре-

деляется температурный интервал максимальной работоспособности.

По полученным данным строится графическая зависимость ЭДС катушки автоколебательного контура, изменяемой под действием температур, характерных для процесса резания (рис 1.)

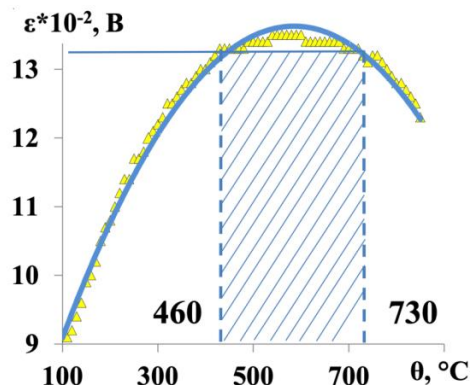


Рис. 1. График зависимости ЭДС катушки автоколебательного контура с помещенной во внутрь сменной режущей пластиной из сплава ВК8 (460–730°С) от температуры

Fig. 1. Graph of dependence of the EMF of the coil of the auto-oscillating circuit with a replaceable cutting plate made of WC8 (92% WC+8%Co) (460–730°С) placed inside on the temperature

Данные исследования были проведены на одном представителе группы однокарбидных твердых сплавов. Для дальнейшего исследования свойств инструментальных твердых сплавов необходимы исследования непосредственно в процессе механической обработки.

Полученные результаты и их обсуждение

С этой целью проведены исследования при точении заготовки из стали 12Х18Н10Т диаметром 120–130 мм и длиной 600 мм резцами со сменными многогранными пластинами из твердых сплавов ВК8, Т5К10 и Т14К8 на станке 1К62. В табл. 1 и 2 приведены режимы резания и геометрия режущей части инструментов, используемых при экспериментальных исследованиях.

Таблица 1. Режимы резания

Table 1. Cutting modes

12Х18Н10Т (0,12%С + 18%Cr + 10%Ni + 10%Ti + 61,88%Fe)			
Глубина	Подача	Скорость резания	Температура резания
$t = 0,5 \text{ мм}$	$s = 0,2 \text{ мм/об}$	$v = 25\text{--}305 \text{ м/мин}$	100–1000°С

Таблица 2. Геометрия режущей части инструментов

Table 2. Geometry of the cutting part of the tools

Главный угол в плане	Вспомогательный угол в плане	Передний угол	Задний угол	Радиус при вершине
$\varphi = 45^\circ$	$\varphi_1 = 10^\circ$	$\gamma = 10^\circ$	$\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$	$R = 1,0 \text{ мм}$

Усилия резания измерялись трехкомпонентным электроиндуктивным динамометром. Силы резания на задней поверхности определялись по методу Н. Н. Зорева [7], основанному на сравнении сил при различных величинах износа по задней поверхности. Измерение микротвердости прирезцовой стороны стружки H_3 и микротвердости ее основного сечения H'_3 производилось на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой на алмазную пирамиду 100 г. Средняя температура контакта измерялась методом естественной термопары. Характер кривых $\mu' = f(v)$, выражающих зависимость коэффициента трения на задней поверхности от скорости резания, и их взаимное расположение для различных твердых сплавов в основном связаны с влиянием скорости резания как температурного фактора, снижающего прочность контактного слоя обрабатываемого материала, как скоростного фактора, приводящего к упрочнению контактного слоя, как температурного фактора, изменяющего закономерности наростообразования, схватывания и образования окисных пленок. Кривая $\mu' = f(v)$ построена по исследованиям А.Д. Макарова [11] (рис. 2), которые показали, что для всех рассматриваемых твердых сплавов кривые $\mu' = f(v)$ носят экстремальный характер, но работа трения и коэффициент трения на задней поверхности в значительной мере определяют стойкость инструмента T , наклеп H_d и высоту микронеровностей R_z обработанной поверхности. В связи с этим можно ожидать, что для данных твердых сплавов зависимости $\mu' = f(v)$, $H_d = f(v)$, $l_m = f(v)$ и $R_z = f(v)$ также будут иметь экстремальный характер.

Исследования показали также, что скорости резания, соответствующие точкам минимума $\mu' = f(v)$, являются оптимальными по интенсивности износа инструмента, наклепу и шероховатости обработанной поверхности. Для рассматриваемых твердых сплавов получились следующие значения оптимальных скоростей резания и соответствующие им значения μ'_{\min} (табл. 3).

Характерно, что семейства кривых $\mu' = f(v)$, $H_d = f(v)$, $l_m = f(v)$ и $R_z = f(v)$ для разных твердых сплавов располагаются в одной и той же последовательности. Твердый сплав ВК8 имеет большую величину μ' , более высокую интенсивность изнашивания (меньшую длину пути резания l_m до выбранного критерия) и, как следствие, худшие показатели качества обработанной поверхности (H_d и R_z). Наименьшие значения μ' , l , H_d и R_z получаются при применении резцов, оснащенных твердым сплавом Т14К8. Таким образом, путем выбора соответствующего инструментального материала можно в некоторых пределах регулировать интенсивность изнашивания инструмента, точность обработки, а также наклеп и величину шероховатости обработанной поверхности. Попутно было исследовано влияние скорости резания и инструментального материала на усадку стружки ξ , микротвердость основного сечения стружки H'_3 и ее прирезцовой стороны H_3 , а также средний коэффициент трения на передней поверхности инструмента μ (см. рис. 2). Кривая $\mu = f(v)$ построена по исследованиям А.Д. Макарова [11].

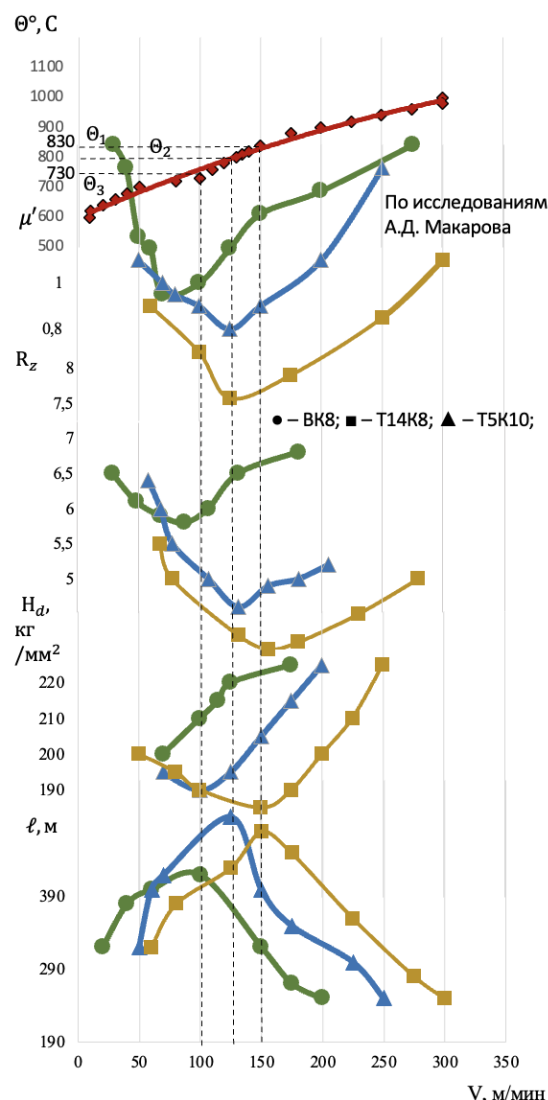


Рис. 2. Влияние инструментального материала на контактные явления на задней поверхности резца: ● – ВК8; ▲ – Т5К10; ■ – Т14К8

Fig. 2. The effect of tool material on contact phenomena on the back surface of the cutter: ● is WC8 (92% WC+8% Co); ▲ is TiC5C10 (85% WC+5% TiC+10% Co); ■ is TiC14C8 (78% WC+14% TiC+8% Co)

Таблица 3. Скорости резания и значение коэффициента трения

Table 3. Cutting speeds and friction coefficient value

Твердый сплав	ВК8	Т5К10	Т14К8
v , м/мин	80	136	150
μ'_{\min}	1,04	0,83	0,58

Эти данные показывают, что зависимости $\xi = f(v)$ и $H'_3 = f(v)$ имеют одинаковый характер. Чем выше скорость резания, тем меньше усадка стружки и меньше микротвердость ее основного сечения. В исследованном диапазоне скоростей наименьшая усадка и наименьшая микротвердость H'_3 , наблюдается для твердого сплава Т14К8, а наибольшие значения ξ и

H_3 — для твердого сплава ВК 8. Такое соответствие между величинами ξ и H_3 для различных твердых сплавов не является неожиданным, так как усадка стружки и ее микротвердость являются следствием одного процесса пластической деформации в зоне стружкообразования.

Степень пластического деформирования прирезцовой стороны стружки определяется условиями трения на передней поверхности, поэтому микротвердость H_3 прирезцовой стороны должна находиться в тесной взаимосвязи (корреляции) со средним коэффициентом трения на передней поверхности.

Исследования показывают (рис. 3), что семейства кривых $\mu = f(v)$ и $H_3 = f(v)$ для различных твердых сплавов располагаются в одинаковой последовательности, а минимальные значения μ и H_3 наблюдаются при одних и тех же скоростях резания, которые для разных твердых сплавов различны.

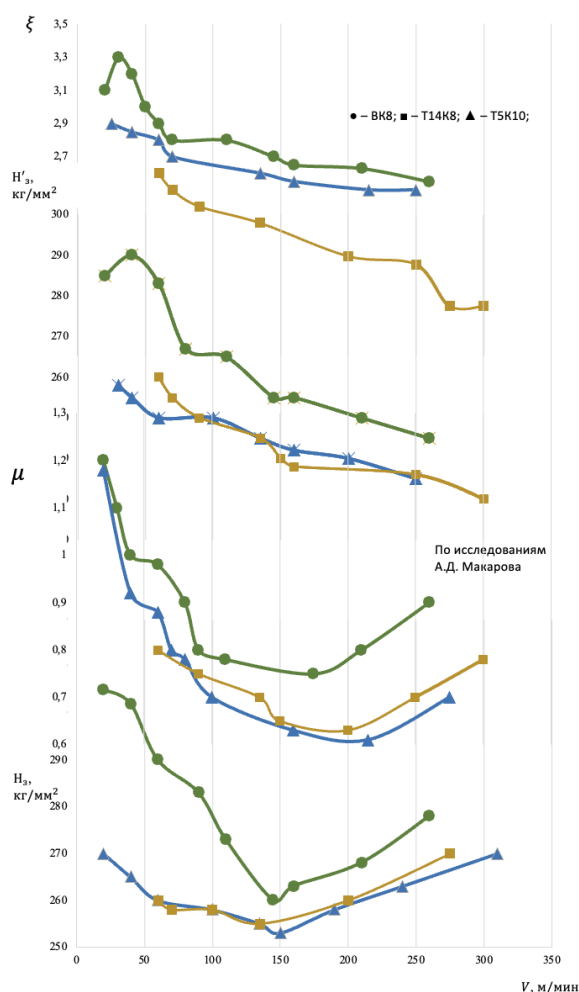


Рис. 3. Влияние инструментального материала на контактные явления на передней поверхности реза: ● – ВК8; ▲ – Т5К10; ■ – Т14К8

Fig. 3. The effect of tool material on contact phenomena on the front surface of the cutter: ● is WC8 (92% WC+8% Co); ▲ is TiC5K10 (85% WC+5% TiC+10% Co); ■ is TiC14K8 (78% WC+14% TiC+8% Co)

Заключение

1. Проведенные исследования показали, что интенсивность изнашивания инструмента, величина шероховатости и наклеп обработанной поверхности находятся в корреляционной взаимосвязи. Путем выбора соответствующей марки инструментального материала можно в некоторых пределах регулировать не только стойкость инструмента, но и характеристики качества обработанной поверхности детали.

2. Инструментальный материал, который имеет наиболее высокий коэффициент трения по задней поверхности, имеет наиболее интенсивный износ, что обуславливается большей величиной наклепа и вследствие этого более высокой шероховатостью обработанной поверхности.

3. Твердость основного сечения стружки коррелирует с коэффициентом усадки стружки. Твердость прирезцовой стороны стружки совпадает с коэффициентом трения по передней поверхности. Из графика следует, что зависимости $\xi = f(v)$ и функция $\mu = f(v)$ могут иметь экстремальный характер.

4. Полученный температурный диапазон для представителя однокарбидных твердых сплавов соответствует максимальному пути резания. Это может свидетельствовать о том, что представленная методика может распространяться и на другие группы инструментальных твердых сплавов.

Список источников

1. Бобров В.Д. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
2. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2001. 448 с.
3. Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. М.: Высш. шк., 2009. 534 с.
4. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высш. шк., 1985. 304 с.
5. Григорьев С.Н., Терешин М.В. Повышение использования ресурса инструмента путем управления процессом резания по максимальной температуре // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 4. С. 3-6.
6. Древаль А.Е., Малькова Л.Д. Совместное влияние параметров механической обработки на величину составляющих силы резания // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2007. № 8. С. 53-60. EDN UAADXX.
7. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 368 с.
8. Кабалдин Ю.Г. Трение и износ инструмента при резании // Вестник машиностроения. 1995. Вып. №1. С. 26-31.
9. Креймер Г.С. Прочность твёрдых сплавов. М.: Металлургия, 1971. 247 с.
10. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.

11. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
12. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. М.: Машиностроение, 1969. 148 с.
13. Силин С.С. Метод подобия при резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
14. High performance composite materials created through advanced techniques / I. Carceanu, G. Cosmeleată, B. Ghiban, M. Balanescu, I. Nedelcu // *Materiale Plastice*. 2007, vol. 44, pp. 321-325.
15. Internally cooled tools and cutting temperature in contamination-free machining / C. Ferri, T. Minton, S.B. Ghani, K. Cheng // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2014, vol. 228, pp. 135-145.
16. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilization / J. Kümmel, D. Braun, J. Gibmeier, J. Schneider, C. Greiner, V. Schulze, A. Wanner // *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 215, pp. 62-70.
17. Machining of Aerospace Material - Ti (grade-2) alloy: Modelling and Optimization / Munish Kumar Gupta, Pardeep Kumar Sood, Gurraj Singh, Vishal S. Sharma Sustainable // *Journal of Cleaner Production*. 2017, vol. 33, pp.133-138.
18. Murthy K.S., Rajendran I. Optimization of end milling parameters under minimum quantity lubrication using principal component analysis and grey relational analysis // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2012, vol. 34, pp. 253-261.
19. Energy efficient process planning based on numerical simulations / R. Neugebauer, C. Hochmuth, G. Schmidt, M. Dix // 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations. 2011, vol. 223, pp. 212-221.
20. Nurulamin A., Jaafar I., Zubaie W. Role of discrete nature of chip formation and natural vibrations of system components in chatter formation during metal cutting // *IJUM Engineering Journal*. 2010, no. 11, pp. 124-126.
21. Patwari A., Amin N., Faris W. Investigations of formation of chatter in a non-wavy surface during thread cutting and turning operations // *Advanced Materials Research*. 2010, no. 83, pp. 637-645.
22. Robot based deposition of WC-Co HVOF coatings on HSS cutting tools as a substitution for solid cemented carbide cutting tools / W. Tillmann, C. Schaak, D. Biermann, R. Abmuth, S. Goeke // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 181, pp. 127-135.
4. Granovsky G.I., Granovsky V.G. *Rezanie metallov* [Cutting of metals]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985, 304 p. (In Russ.)
5. Grigoriev S.N., Tereshin M.V. Increase of the tool resource utilisation by controlling the cutting process by the maximum temperature. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2011;(4):3-6. (In Russ.)
6. Dreval A.E., Malkova L.D. Joint influence of machining parameters on the value of cutting force components. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering]. 2007;(8):53-60. (In Russ.) EDN UAADXX.
7. Zorev N.N. *Voprosy mekhaniki protsessa rezaniya metallov* [Issues of mechanics of metal cutting process]. Moscow: Mashgiz, 1956, 368 p. (In Russ.)
8. Kabaldin Yu. G. Friction and tool wear during cutting. *Vestnik Mashinostroyeniya* [Russian Engineering Research]. 1995;(1):26-31. (In Russ.)
9. Kramer G.S. *Prochnost tvorydykh splavov* [Strength of hard alloys]. Moscow: Metallurgy, 1971, 247 p. (In Russ.)
10. Loladze T.N. *Prochnost i iznosostoikost rezhushchego instrumenta* [Strength and wear resistance of a cutting tool]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1982, 320 p. (In Russ.)
11. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimisation of cutting processes]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1976, 278 p. (In Russ.)
12. Poletika M.F. *Kontaktnye nagruzki na rezhushchikh poverkhnostyakh instrumenta* [Contact loads on the cutting surfaces of the tool]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1969, 148 p. (In Russ.)
13. Silin S.S. *Metod podobiya pri rezanii metallov* [Method of similarity in metal cutting]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1979, 152 p. (In Russ.)
14. Carceanu I., Cosmeleată G., Ghiban B., Balanescu M., Nedelcu I. High performance composite materials created through advanced techniques. *Materiale Plastice*. 2007;44:321-325.
15. Ferri C., Minton T., Ghani S.B., Cheng K. Internally cooled tools and cutting temperature in contamination-free machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2014;228:135-145.
16. Kümmel J., Braun D., Gibmeier J., Schneider J., Greiner C., Schulze V., Wanner A. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilization. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;215:62-70.
17. Munish Kumar Gupta, Pardeep Kumar Sood, Gurraj Singh, Vishal S. Sharma. Sustainable Machining of Aerospace Material - Ti (grade-2) alloy: Modelling and Optimization. *Journal of Cleaner Production*. 2017;33:133-138.
18. Murthy K.S., Rajendran I. Optimization of end milling parameters under minimum quantity lubrication using principal component analysis and grey relational analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2012;34:253-261.
19. Neugebauer R., Hochmuth C., Schmidt G., Dix M. Energy efficient process planning based on numerical simulations. 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations. 2011;223:212-221.

References

1. Bobrov V.D. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of the theory of metal cutting]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975, 344 p. (In Russ.)
2. Vasin S.A., Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezanie materialov. Termomekhanicheskiy podkhod k sisteme vzaimosvyazey pri rezanii* [Cutting of materials. Thermomechanical approach to the system of correlation in cutting]. Moscow: Publishing House of Bauman MSTU, 2001, 448 p. (In Russ.)
3. Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezanie materialov* [Cutting of materials]. Moscow : Vysshaya shkola, 2009, 534 p. (In Russ.)

20. Nurulamin A., Jaafar I., Zubaire W. Role of discrete nature of chip formation and natural vibrations of system components in chatter formation during metal cutting. *IJUM Engineering Journal*. 2010;(11):124-126.
21. Patwari A., Amin N., Faris W. Investigations of formation of chatter in a non-wavy surface during thread cutting and turning operations. *Advanced Materials Research*. 2010;(83):637-645.
22. Tillmann W., Schaak C., Biermann D., Abmuth R., Goeke S. Robot based deposition of WC-Co HVOF coatings on HSS cutting tools as a substitution for solid cemented carbide cutting tools. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;181:127-135.

Поступила 16.05.2025; принята к публикации 24.07.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 16/05/2025; revised 24/07/2025; published 25/12/2025

Артамонов Евгений Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры станков и инструментов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: artamonov@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-3099-4435

Штин Антон Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры станков и инструментов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: shtin_as@mail.ru. ORCID 0000-0002-7000-6761

Тверяков Андрей Михайлович – кандидат технических наук, доцент, директор нефтегазового института, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: tverjakovam@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-6441-2559

Василега Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры станков и инструментов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: vasilegads@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-7618-7906

Evgeny V. Artamonov – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Machine Tools, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
Email: artamonov@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-3099-4435

Anton S. Shtin – PhD(Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Machine Tools, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
Email: shtin_as@mail.ru. ORCID 0000-0002-7000-6761

Andrey M. Tveryakov – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Oil and Gas Institute, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
Email: tverjakovam@tyuiu.ru. ORCID 0000-0002-6441-2559

Dmitry S. Vasilega – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Machine Tools, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
Email: vasilegads@tyuiu.ru. ORCID 0000-0001-7618-7906

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

УДК 621.7.011

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-87-93



ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО ПАРАМЕТРА ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ТОНКИХ ДЛИННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 08X15H5D2T ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОСРЕДСТВОМ ПОДБОРА ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Колодяжный Д.Ю., Черкашин С.О., Вороненко В.П.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматривается вопрос влияния наклепа на требуемый параметр точности формы (плоскостности) тонких длинных деталей из стали 08X15H5D2T при последовательной механической обработке. Плоскостность – это параметр точности формы, который характеризуется степенью отклонения поверхности от идеально плоского состояния относительно идеального тела (под идеальным телом подразумевается тело, которое имеет определенную степень точности формы, подтвержденную специальными методиками). На нее влияет механическая обработка и способность металла сохранять полученную энергию в виде напряжений. Режимы механической обработки при неправильном их подборе создают в поверхностных слоях изделия большую твердость по сравнению с твердостью, полученной после термической обработки. Данное явление называется наклепом (или перенаклепом). Термическая обработка тоже играет важную роль в получении требуемых величин точности. При рационально подобранном режиме термической обработки уменьшается величина наклепа при тех же режимах механической обработки, а также снижается вероятность перенаклепа. В статье приведены эксперименты на образцах из стали 08X15H5D2T и представлены используемые в производстве режимы резания на операциях торцевого фрезерования и плоского маятникового шлифования изготавливаемых деталей, а также их влияние на плоскостность при различных режимах предварительной термообработки. Сделаны выводы по полученным результатам.

Ключевые слова: последовательная обработка, наклеп, плоскостность, коррозионно-стойкая сталь

© Колодяжный Д.Ю., Черкашин С.О., Вороненко В.П., 2025

Для цитирования

Колодяжный Д.Ю., Черкашин С.О., Вороненко В.П. Получение требуемого параметра точности формы тонких длинных деталей из стали 08X15H5D2T при последовательной обработке посредством подбора параметров режимов резания и термической обработки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 87-93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-87-93>



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

OBTAINING THE REQUIRED SHAPE ACCURACY PARAMETER FOR THIN LONG PARTS MADE OF 08H15N5D2T STEEL DURING SEQUENTIAL PROCESSING BY SELECTING THE PARAMETERS OF CUTTING MODES AND HEAT TREATMENT

Kolodyazhny D.Yu., Cherkashin S.O., Voronenko V.P.

Moscow State University of Technology STANKIN, Moscow, Russia

Abstract. The article discusses the effect of riveting on the required shape accuracy (flatness) of thin long parts made of 08H15N5D2T steel during sequential machining. Flatness is a parameter of shape accuracy, which is characterized by the degree of deviation of the surface from a perfectly flat state relative to an ideal body (an ideal body means a body that has a certain degree of shape accuracy, confirmed by special techniques). It is affected by mechanical processing and the ability of the metal to store the received energy in the form of stresses. The machining modes, if selected incorrectly, introduce greater hardness into the product layers compared to the hardness obtained after heat treatment. This phenomenon is called riveting (or over-riveting). Heat treatment also plays an important role in obtaining the required accuracy values. With a rationally selected heat treatment mode, the amount of riveting decreases with the same machining modes, as well as the likelihood of over-riveting. The article conducts experiments on 08H15N5D2T steel samples and presents the cutting modes used in production for end milling and flat pendulum grinding of manufactured parts, as well as their effect on flatness under various pre-heat treatment modes. Conclusions are drawn based on the results obtained.

Keywords: sequential processing, riveting, flatness, corrosion-resistant steel

For citation

Kolodyazhny D.Yu., Cherkashin S.O., Voronenko V.P. Obtaining the Required Shape Accuracy Parameter for Thin Long Parts Made of 08H15N5D2T Steel During Sequential Processing by Selecting the Parameters of Cutting Modes and Heat Treatment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 87-93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-87-93>

Введение

Получение заданных параметров точности формы деталей можно добиться с помощью подбора режимов термической обработки и резания, а также определенной последовательностью операций технологического процесса изготовления.

В рассматриваемом случае состав обрабатываемой коррозионно-стойкой мартенситно-старееющей стали 08Х15Н5Д2Т, используемой при изготовлении деталей на производстве, оказывает значительное влияние на получение требуемых параметров точности. Он оказывает влияние на остаточные деформации путем накопления и последующего «освобождения» энергии, что осложняет надежную эксплуатацию изготовленных изделий. При большом количестве легирующих элементов механическая обработка становится трудоемкой ввиду снижения режимов резания при механической обработке, использования специального инструмента, большого количества промежуточного технологического контроля и специальных видов обработки материала [1–3].

Поэтапная обработка отличается тем, что заготовка проходит несколько этапов механической обработки для получения готовой детали. Также для этого процесса характерно внесение напряжений в заготовку после каждого этапа обработки, что в совокупно-

сти с дальнейшей обработкой может привести к увеличению твердости поверхностного слоя изделия, к перенаклепу и «раскрытию» остаточных деформаций, что не обеспечит требуемых характеристик деталей.

Методика проведения исследования

При последовательном процессе обработки изделия, состоящем из операций термической обработки, торцевого фрезерования и плоского маятникового шлифования, имеется проблема получения требуемого параметра точности формы, то есть величины плоскостности для деталей из стали 08Х15Н5Д2Т. Происходит превышение допустимой величины данного параметра для торцевого фрезерования более чем 0,1 мм, а для плоского шлифования более 0,03 мм. Процент брака на производстве: на торцевом фрезеровании – 5%, а на плоском маятниковом шлифовании – 12%.

Цель исследования состояла в обеспечении заданного параметра точности формы, а именно плоскостности [4], при экспериментально подобранных режимах термической обработки и режимах резания при последовательной механической обработке (сначала торцевое фрезерование, потом плоское маятниковое шлифование), а также снижении выхода допускового значения требуемого параметра точности формы [5, 6], приводящего к увеличению брака на

производстве, путем анализа возможного влияния наклепа на точность формы деталей.

Основным критерием исследования выступал параметр точности формы (плоскостность), схема измерения плоскостности представлена на **рис. 1**.

Были изготовлены образцы из стали марки 08X15H5D2T по ТУ 14-1-2907-2019 [7], которая является труднообрабатываемой, так как имеет большое количество легирующих элементов: хрома (~15%), никеля (~5%), меди (~2%), титана (~0,2%).

В качестве контроля возникновения остаточных деформаций, вызванных разностью твердости поверхностных слоев, использовалось значение наклепа [8]. Исследование проводилось на приборе "WilsonInstrumentsRockwell 574" при усилии 150 кгс, каждый образец был исследован по схеме, представ-

ленной на **рис. 2**, после термической и механических обработок.

Эксперимент состоял из четырех этапов:

1. Определение твердости образцов после подбора режимов термической обработки.
2. Определение твердости и плоскостности образцов после фрезерной обработки.
3. Определение твердости и плоскостности образцов после шлифования.
4. Расчет наклепа для разных этапов механической обработки.

Для проведения эксперимента были подобраны режимы термической обработки (**табл. 1**), а также экспериментальные режимы резания и режущий инструмент (**табл. 2**).

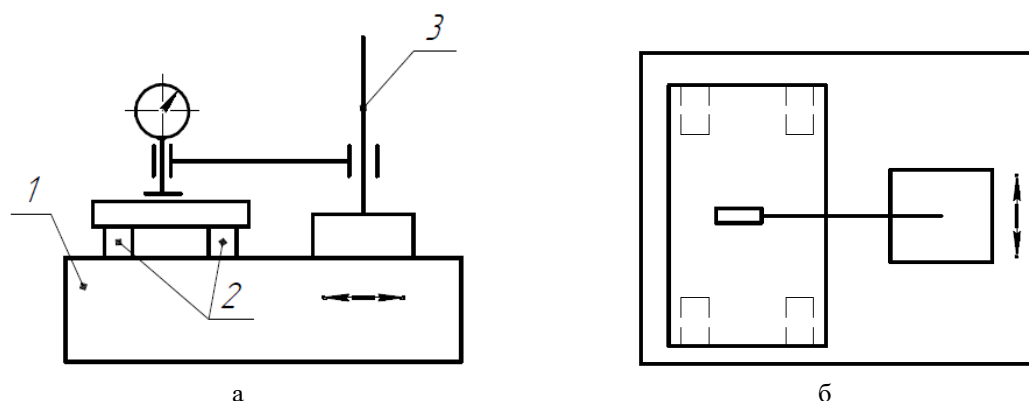
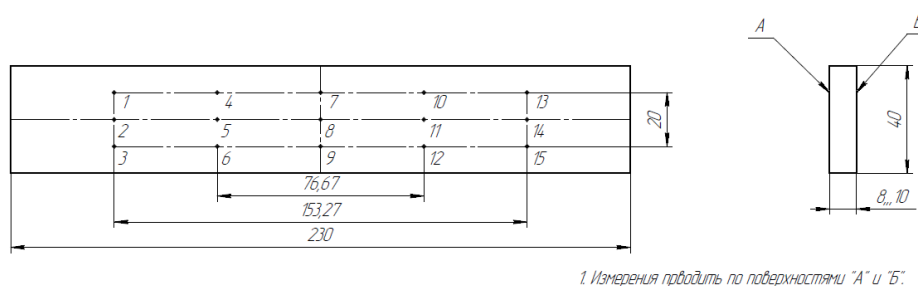


Рис. 1. Схема измерения плоскостности: а – вид спереди; б – вид сверху; 1 – поверочная плита (1-1-1000×630 ГОСТ 10905-86); 2 – подкладки (набор концевых мер КМД №1 кл.1 (1-н1) ЧИЗ); 3 – измерительный прибор (Приспособление «Вега-ПК-500» для фрезерования и Индикатор Vogel для проверки плоскостей и параллелей для шлифования)

Fig. 1. Flatness measurement scheme: а is front view; б is top view; 1 is calibration plate (1-1-1000×630 GOST 10905-86); 2 is backing strip (set of end measures KMD No. 1 cl.1 (1-h1) CHIZ); 3 is measuring instrument (Vega-PK-500 device for milling and Vogel indicator for checking planes and parallels for grinding)



1. Измерения проводить по поверхностям "А" и "Б".

Рис. 2. Схема для измерения твердости до и после на разных этапах обработки образцов
Fig. 2. Diagram for measuring hardness before and after at different stages of sample processing

Таблица 1. Подобранные режимы термической обработки для образцов из стали 08X15H5D2T
Table 1. Selected heat treatment modes for 08H15N5D2T steel samples

Режим для закалки (температура; время выдержки; среда охлаждения)	Режимы для старения (температура; время выдержки; среда охлаждения)
1000°C±10°C; 30 минут; вода	200°C±10°C; 150 минут; воздух
	400°C±10°C; 150 минут; воздух
	600°C±10°C; 150 минут; воздух

Таблица 2. Используемые режимы резания, режущий инструмент и СОЖ
Table 2. Cutting modes, cutting tools and coolant used

Параметры режима резания	Режимы резания	
	Исходные данные	Эксперимент
	Торцевое фрезерование	
Термическая обработка	Закалка: 1000°C±10°C; 30 мин; вода Старение: 500°C±10°C; 150 мин; воздух	Согласно табл. 1
Общий припуск, мм	1,5	1,5
Минутная подача, мм/мин	420	420
Припуск на одну сторону, мм	0,75	0,75
Количество проходов на сторону	1	1
Скорость резания, м/мин	250	220
Используемая СОЖ	-	NSK konentrat (водная)
Используемый корпус для сменных пластин	2214-0275	50A05R-S90AD16E-C
Используемые пластины	TP40AM PNEA-110408	ADMX160616PR-R PRAMET M9315
	Плоское шлифование	
	Исходные данные	Эксперимент
	Плоское шлифование	
Общий припуск, мм	0,50	0,50
Припуск на одну сторону, мм	0,25	0,25
Съем за один ход, мм	0,0625	0,004
Продольная подача, м/мин	25	8,5
Скорость вращения круга, м/с	14	5
Используемая СОЖ	NSK konentrat (водная)	NSK konentrat (водная)
Используемый шлифовальный круг	405×75×127×200×50 WA463111VBA5A	1A1 250×20×76×10 CBN30 B151 100NV 35

Режим закалки на основании проведенного исследования [10] не менялся, а менялся режим старения. Для более детального исследования влияния степени наклепа на параметр точности интервалы температуры были взяты больше. Закалка и старение проводились в электропечи ПКМ 3.6.2/11,5-ЭК.

Уменьшение диаметра корпуса для сменных пластин и скорости резания может быть обусловлено снижением возможных возникающих вибраций. Применение СОЖ в процессе фрезерования позволяет снизить тепловые воздействия на деталь и режущий инструмент [9].

При операции шлифования был уменьшен съем за один рабочий ход стола станка и продольная подача для минимизации вносимых тепловых и силовых напряжений в образцы.

Таблица 3. Величина плоскостности образцов из стали 08X15H5D2T при последовательной механической обработке
Table 3. The value of the flatness of samples made of 08H15N5D2T steel during sequential machining

Режимы резания	Величина плоскостности образцов			Получаемая плоскостность при действующем процессе изготовления, мм	Требуемая плоскостность, мм
	при стандартной закалке и старении: 200°C±10°C; 150 мин; воздух	при стандартной закалке и старении: 400°C±10°C; 150 мин; воздух	при стандартной закалке и старении: 600°C±10°C; 150 мин; воздух		
Торцевое фрезерование (после термической обработки)	0,05	0,09	0,06	0,1	0,1
Плоское шлифование (окончательно, после фрезерования)	0,017	0,022	0,027	0,028	0,03

Результаты эксперимента

Образцы подверглись механической обработке сначала торцевым фрезерованием, затем плоским маятниковым шлифованием с измерением твердости и плоскостности после каждого этапа обработки. Величина плоскостности образцов представлена в табл. 3.

Рассчитав величину степени наклепа по формуле (1) [8], получим значения, которые представлены в табл. 4.

$$N = \frac{HRC - HRC_0}{HRC_0}, \quad (1)$$

где N – степень наклепа; HRC – величина твердости после механической обработки; HRC_0 – величина твердости после термических операций и без механообработки.

Таблица 4. Величина наклепа при разных режимах термической обработки и последовательной механической обработке (сначала торцевым фрезерованием, потом плоским шлифованием)
 Table 4. The amount of riveting under different modes of heat treatment and sequential machining (first by end milling, then by flat grinding)

Величина наклепа (степень наклепа)							
при текущей последовательной механической обработке		при стандартной закалке (см. табл. 3) и старении: 200°C±10°C; 150 мин; воздух		при стандартной закалке (см. табл. 3) и старении: 400°C±10°C; 150 мин; воздух		при стандартной закалке (см. табл. 3) и старении: 600°C±10°C; 150 мин; воздух	
Торцевое фрезерование (после термической обработки)							
Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б
0,160	0,050	0,050	0,090	0,007	0,011	0,029	0,040
Плоское шлифование (окончательно, после фрезерования)							
Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б	Поверхность А	Поверхность Б
0,220	0,070	0,040	0,052	0,054	0,052	0,003	0,026

Согласно источнику [11], Безъязычный В.Ф. описывал, что режимы резания, которые определяют качество поверхностного слоя и точность обработки, определяются следующей математической моделью:

$$(t, s, v) = f \left(\begin{matrix} \sigma_{\text{ост}}, R_z, h_c, \beta_d, T_p, \sigma_T, E_d, \tau_p, \beta_1, \alpha_1, \\ \alpha_p, \mu, \lambda, \lambda_p, \lambda_{\text{ст}}, \theta_{\text{пл}}, \alpha, \gamma, \varphi, \varphi_1, r, \rho_1, \\ \delta, j_{\text{сист}}, B_1, H_1, H, L_p \end{matrix} \right), \quad (2)$$

где t – глубина резания; s – подача; v – скорость резания; $\sigma_{\text{ост}}$ – остаточные напряжения; h_c – глубина наклепа; R_z – высота неровностей; σ_T , E_d , τ_p – предел текучести, модуль упругости и сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу соответственно; β_d – коэффициент температурного линейного расширения обрабатываемого материала; μ , α – коэффициенты Пуассона и температуропроводности обрабатываемого материала; λ и λ_p – коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов; $\theta_{\text{пл}}$ – температура плавления обрабатываемого материала; α и γ – задний и передний углы резца; φ и φ_1 – главный и вспомогательный углы в плане; r – радиус при вершине резца в плане; ρ_1 – радиус скругления режущей кромки; B_1 и H_1 – ширина и высота резца; L_p – длина выступающей части резца из суппорта; H – размер обрабатываемой детали; T_p – технологический допуск на размер обрабатываемой детали; $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности материала державки резца; α_1 и α_p – коэффициенты теплоотдачи обрабатываемого материала и материала державки резца; δ – величина износа резца по задней поверхности; $j_{\text{сист}}$ – жесткость технологической системы СПИД (станок-приспособление-инструмент-деталь); f – функция.

Степень наклепа определяется по следующей формуле:

$$N = \frac{h_c}{1, 25(\sigma_{\text{вз}} / \sigma_{\text{вз}})^{0,8}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{вз}}$ – предел прочности электротехнической стали, принятой за эталон.

Предполагая, что параметры точности зависят от режимов резания, можно также предположить, что параметр точности изделия имеет функцию от параметров системы СПИД. Получается, что параметр точности имеет зависимость через функцию от параметров СПИД, которые обозначены в формуле (2):

$$\Delta = u(t, s, v), \quad (4)$$

где Δ – получаемый параметр точности; u – функция.

Подробно раскрыв формулу (4) с учетом параметров, указанных в (2), получим

$$\Delta = u \left(f \left(\begin{matrix} \sigma_{\text{ост}}, R_z, h_c, \beta_d, T_p, \sigma_T, E_d, \tau_p, \beta_1, \\ \alpha_1, \alpha_p, \mu, \lambda, \lambda_p, \lambda_{\text{ст}}, \theta_{\text{пл}}, \alpha, \gamma, \varphi, \varphi_1, \\ r, \rho_1, \delta, j_{\text{сист}}, B_1, H_1, H, L_p \end{matrix} \right) \right). \quad (5)$$

Полученная зависимость справедлива для точения, и Сухой Д.С. в своей работе [13] формализовал ее с помощью метода подобия. В свою очередь, Семенов А.Н. в своей работе [14] раскрывал данные зависимости и обосновал, что точность формы детали, которая обрабатывается на плоскошлифовальном станке, определяется погрешностью, включающей в себя параметры системы СПИД, и выражается следующим образом:

$$\Delta_{\phi} = \Delta_c + \Delta_n + \Delta_{\text{и}} + \Delta_d, \quad (6)$$

где Δ_c – погрешности, вносимые станком; Δ_n – погрешности, вносимые приспособлением; $\Delta_{\text{и}}$ – погрешности, вносимые инструментом; Δ_d – погрешности, вызванные воздействием системы СПИД на деталь.

Зависимость получаемой точности формы изделий от наклепа не прямая и она «лежит» через двойную функцию. Для получения подробного и корректного результата требуется проводить дополнительные эксперименты и анализ их результатов.

Выводы

1. Заданное значение точности формы образцов (плоскостности) было обеспечено на всех экспериментальных режимах механической обработки, которой предшествовали операции закалки и старения, то есть данные режимы не приводят к недопустимому отклонению точности формы. Данные режимы резания рекомендуются к использованию на производстве для уменьшения количества брака.

2. Величина наклепа уменьшалась на образцах с режимом старения 200 и 600°C и возрастала при температуре старения 400°C. Это может говорить о том, что наклеп влияет на точность больше у образца с температурой старения 400°C и при этом минимально влияет на образец с температурой старения 600°C.

Из преобразований, базирующихся на работах Безязычного В.Ф., а также на основании работ Семенова А.Н. и Сухого Д.С., можно сказать, что наклеп имеет не прямое влияние на получаемую точность обработки, то есть через двойную функцию. Для подробного математического описания требуется провести дополнительные эксперименты.

Список источников

1. Диагностика технологической системы «станок-приспособление-инструмент-деталь»: учеб. пособие / сост.: А.Н. Гаврилин, Б.Б. Мойзес; Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. 144 с.
2. Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки / под ред. проф. П.Г. Петрухи. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1974. 616 с.
3. Технологичность конструкции изделия: справочник / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др.; под общ. ред. Ю.Д. Амирова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 768 с.: ил.
4. ГОСТ 2.308-2011. Единая система конструкторской документации. Указания допусков формы и расположения поверхностей: дата введения 01.01.2011. М.: Стандартинформ, 2012. 27 с.
5. Исследование возможности обеспечения плоскостности для плоских деталей из стали 08X15H5D2T (ВНС-2) на операции торцевого фрезерования при разной термической обработке с учетом микроструктуры / Д.Ю. Колодяжный, С.О. Черкашин, С.Г. Ляпусов, В.П.

Вороненко // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2024. № 4 (71). С. 94-101.

6. Обеспечение требуемой точности формы длинных плоских деталей из стали ВНС-2 при плоском шлифовании за счет изменяемых параметров режимов резания и термической обработки / Д.Ю. Колодяжный, С.О. Черкашин, С.Г. Ляпусов, В.П. Вороненко // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2025. № 1 (72). С. 66-72.
7. ТУ 14-1-2907-2019. Сталь толстолистовая марки 08X15H5D2T (ЭП410), 08X15H5D2T-Ш (ЭП-410-Ш). Технические условия.
8. Виноградова Н.В. Определение параметров качества поверхностного слоя деталей после механической обработки с учетом дислокационных и структурно-фазовых превращений: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: дис. ... канд. техн. наук / Виноградова Наталья Владимировна. Рыбинск, 2011. 261 с.
9. Безязычный В.Ф., Аверьянов И.Н., Кордюков А.В. Расчет режимов резания: учеб. пособие. Рыбинск: РГАТА, 2009. 185 с.
10. Внедрение технологичного коррозионно-стойкого материала взамен стали 07X16H6 для изготовления рабочих колес центробежных компрессоров / Е.Н. Поморцев, И.Г. Галиахметов, В.И. Чигарин [и др.]. // Компрессорная техника и пневматика. 2013. № 5. С. 44-47.
11. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей / В.Ф. Безязычный, Т.Д. Кожина, А.В. Константинов, В.В. Непомилуев, А.Н. Семенов, Т.В. Шарова, Ю.П. Чистяков. М.: Изд-во МАИ, 1993. 184 с.
12. Безязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. 2-е изд., испр. и доп. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. 356 с.
13. Сухой Д.С. Расчетное определение погрешности обработки с учетом положений технологической наследственности при точении и фрезеровании: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: дис. ... канд. техн. наук / Сухой Дмитрий Станиславович; ГОУ ВПО «Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьева». Рыбинск, 2009. 199 с.
14. Семенов А.Н. Исследование методов повышения точности формы детали при плоском шлифовании: специальность К212402: дис. ... канд. техн. наук / Семенов Анатолий Николаевич. Ленинград, 1978. 209 с.

References

1. Gavrilin A.N., Moizes B.B. *Diagnostika tekhnologicheskoy sistemy «stanok-prisposoblenie-instrument-detal»: uchebnoe posobie* [Diagnostics of the technological system "machine-device-tool-part": textbook]. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2016, 144 p. (In Russ.)
2. Petrukha P.G. *Rezanie konstruktivnykh materialov, rezhushchie instrumenty i stanki* [Cutting of structural materials, cutting tools and machines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1974, 616 p. (In Russ.)
3. Amirov Yu.D., Alferova T.K., Volkov P.N. et al. *Tekhnologichnost konstruktivnykh izdeliya: spravochnik* [Manufactur-

- ability of the product design: a reference book]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1990, 768 p. (In Russ.)
4. State standard GOST 2.308-2011. Unified system of design documentation. Representation of limits of forms and surface lay-out on drawings. Moscow : Standartinform, 2012, 27 p. (In Russ.)
5. Kolodyazhny D.Y., Cherkashin S.O., Lyapusov S.G., Voronenko V.P. Studying the possibility of providing flatness for flat parts made of 08X15N5D2T steel (VNS-2) for end milling operations with various heat treatments, taking into account the microstructure. *Vestnik MGTU «STANKIN»* [Bulletin of MSUT STANKIN]. 2024;(4(71)):94-101. (In Russ.) ISSN 2072-3172
6. Kolodyazhny D.Y., Cherkashin S.O., Lyapusov S.G., Voronenko V.P. Ensuring the required shape accuracy of long flat steel parts VNS-2 for flat grinding due to variable parameters of cutting and heat treatment modes. *Vestnik MGTU «STANKIN»* [Bulletin of MSUT STANKIN]. 2025;(1(72)):66-72. (In Russ.) ISSN 2072-3172
7. Technical specifications 14-1-2907-2019. Thick-sheet steel of 08X15N5D2T (EP410), 08X15N5D2T-Sh (EP-410-Sh) grades.
8. Vinogradova N.V. Opredelenie parametrov kachestva poverhnostnogo sloya detaley posle mekhanicheskoy obrabotki s uchetom dislokatsionnyh i strukturno-fazovyh prevrashcheniy: dis. ... kand. tekhn. nauk [Determination of the quality parameters of the surface layer of parts after machining, taking into account dislocation and structural-phase transformations. PhD dissertation]. Rybinsk, 2011. 261 p.
9. Bezyazychniy V.F., Averyanov I.N., Kordyukov A.V. *Raschet rezhimov rezaniya: ucheb. posobie* [Calculation of cutting modes: textbook]. Rybinsk: RGATA, 2009, 185 p. (In Russ.)
10. Pomortsev E.N., Galiakhmetov I.G., Chigarin V.I. et al. Introduction of technological corrosion-resistant material instead of steel 07X16H6 for the manufacture of impellers of centrifugal compressors. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressor technology and pneumatics]. 2013;(5):44-47. (In Russ.)
11. Bezyazychniy V.F., Kozhina T.D., Konstantinov A.V., Nepomiluyev V.V., Semenov A.N., Sharova T.V., Chistyakov Yu.P. *Optimizatsiya tekhnologicheskikh usloviy mekhanicheskoy obrabotki detaley aviatsionnykh dvigateley* [Optimization of technological conditions of mechanical processing of aircraft engine parts]. Moscow: Publishing House of MAI, 1993, 184 p. (In Russ.)
12. Bezyazychniy V.F. *Metod podobiya v tekhnologii mashinostroyeniya: monografiya* [Method of similarity in mechanical engineering technology: monograph]. Moscow; Vologda : Infra-Engineering, 2021, 356 p. (In Russ.) ISBN 978-5-9729-0766-3
13. Sukhoi D.S. Raschetnoe opredelenie pogreshnosti obrabotki s uchetom polozheniy tekhnologicheskoy nasledstvennosti pri tochenii i frezerovanii: dis. ... kand. tekhn. nauk [Computational determination of processing error, taking into account the provisions of technological heredity in turning and milling. PhD Dissertation]. Rybinsk, 2009. 199 p.
14. Semenov A.N. *Issledovanie metodov povysheniya tochnosti formy detali pri ploskom shlifovanii : dis. ... kand. tekhn. nauk* [Research of methods for improving the accuracy of the shape of a part in flat molding. PhD dissertation]. Leningrad, 1978. 209 p.

Поступила 22.08.2025; принята к публикации 10.11.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 22/08/2025; revised 10/11/2025; published 25/12/2025

Колодяжный Дмитрий Юрьевич – доктор технических наук, и.о. проректора по научной деятельности, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия.
Email: kolod@mail.ru

Черкашин Станислав Олегович – аспирант кафедры «Технология машиностроения», Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия.
Email: ct4ccher@yandex.ru

Вороненко Владимир Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия.
Email: vpvoronenko@yandex.ru

Dmitry Yu. Kolodyazhny – DrSc(Eng.), Acting Vice-Rector for Scientific Activities, Moscow State University of Technology STANKIN, Moscow, Russia.
Email: kolod@mail.ru

Stanislav O. Cherkashin – Postgraduate Student of the Department of Technology of Mechanical Engineering, Moscow State University of Technology STANKIN, Moscow, Russia.
Email: ct4ccher@yandex.ru

Vladimir P. Voronenko – DrSc(Eng.), Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering, Moscow State University of Technology STANKIN, Moscow, Russia.
Email: vpvoronenko@yandex.ru



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

УДК 67.02

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-94-101

ОЦЕНКА УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ, ХЛАДОСТОЙКОСТИ И СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 20, АРМИРОВАННОЙ СТАЛЬЮ 12X18Н10Т МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

Колчин П.В.¹, Костылев К.А.¹, Чернигин М.А.²

¹ Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Современное развитие аддитивных технологий позволяет создавать новые композиционные материалы с более высокими характеристиками, состоящие из двух и более различных сплавов. Это открывает возможности по изготовлению оборудования и конструкций, более стойких к экстремальным условиям эксплуатации, таким как низкие температуры Крайнего севера и Арктики. В данной статье проведена оценка хладостойкости материала, состоящего из стали 20, который армирован сталью 12X18Н10Т с целью образования участков вязкого разрушения при хрупком разрушении основного материала в условиях низких температур. Для достижения поставленной цели и задач были изготовлены биметаллические образцы, где второй материал наносился методом лазерной наплавки проволоки и расположен в виде полос по трем сторонам на поверхности образцов. В работе применялись методы испытания на ударный изгиб, микроструктурного и фрактографического анализа. Результаты показывают, что армирование стали с ОЦК-решеткой сплавом с ГЦК-решеткой аддитивным методом лазерной наплавки позволяет сохранить в изломе образцов вязкую составляющую на уровне 9% поперечного сечения образца при выбранной плотности армирования, что увеличивает ударную вязкость в 2,2 раза при температуре испытания -50°C . Однако ввиду разницы в свойствах материалов при разрушении действуют напряжения, снижающие ударную вязкость при нормальной температуре. В связи этим возникает потребность в выработке методов по снижению данного негативного влияния за счет подбора более эффективной схемы армирования, термической обработки, методов компьютерного моделирования и сочетания материалов.

Ключевые слова: хладостойкость, мультиметаллические материалы, аддитивные технологии, лазерная наплавка, армирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания Центра гидроакустики ИПФ РАН, тема FFUF-2024-0040 «Разработка физических принципов перспективных акустических систем».

© Колчин П.В., Костылев К.А., Чернигин М.А., 2025

Для цитирования

Колчин П.В., Костылев К.А., Чернигин М.А. Оценка ударной вязкости, хладостойкости и структуры углеродистой стали 20, армированной сталью 12X18Н10Т методом лазерной наплавки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 94-101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-94-101>



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

ASSESSMENT OF IMPACT TOUGHNESS, COLD RESISTANCE AND STRUCTURE OF CARBON STEEL 20, REINFORCED WITH 12CR18NI10TI STEEL BY LASER CLADDING METHOD

Kolchin P.V.¹, Kostylev K.A.¹, Chernigin M.A.²

¹ Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

² Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Modern development of additive technologies allows for creation new composite materials with higher characteristics, consisting of two or more different alloys. This opens up opportunities for manufacturing equipment and structures that are more resistant to extreme operating conditions, such as low temperatures of the Far North and the Arctic. This article assesses the cold resistance of a material consisting of steel 20, which is reinforced with steel 12Cr18Ni10Ti in order to form areas of viscous fracture during brittle fracture of the base material at low temperatures. To achieve the stated objectives, bimetallic samples were manufactured, where the second material was applied by laser wire cladding and located in the form of stripes on three sides of the samples surface. The authors used the methods of impact bending testing, microstructural and fractographic analysis. The results show that reinforcement of BCC steel with FCC alloy by additive laser cladding method allows for preserving viscous component in fracture of samples at the level of 9% of cross-section of sample, at the selected reinforcement density, which increases impact toughness by 2.2 times at test temperature of -50°C . However, due to difference in properties of materials, there are stresses during destruction, which reduce impact toughness at normal temperature. In this regards, there is a need to develop methods for reduction of this negative influence by means of selection of more effective reinforcement scheme, heat treatment, methods of computer modeling and combination of materials.

Keywords: cold resistance, multi-metallic materials, additive technologies, laser cladding, reinforcement.

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Center for Hydroacoustics of the IAP RAS, topic FFUF-2024-0040 "Development of physical principles of advanced acoustic systems".

For citation

Kolchin P.V., Kostylev K.A., Chernigin M.A. Assessment of Impact Toughness, Cold Resistance and Structure of Carbon Steel 20, Reinforced with 12Cr18Ni10Ti Steel by Laser Cladding Method. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 94-101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-94-101>

Введение

Арктика и Северный Ледовитый океан представляют собой стратегически важные территории для России. Регион обладает огромным потенциалом благодаря своим природным ресурсам и возможностям в качестве логистического коридора между Европой и Азией. В связи с этим государство активно развивает инфраструктуру этих территорий, что отражено в документах, таких как «Стратегия развития Арктической зоны России до 2035 года». Однако освоение арктических регионов сопряжено с рядом технических и климатических вызовов. Одной из ключевых проблем является экстремально низкая температура окружающей среды, которая может достигать -60°C и ниже. Для обеспечения надежности конструкций и оборудования в таких условиях требуется особое внимание к выбору хладостойких материалов [1].

Под хладостойкостью понимается способность металлов сохранять свои механические свойства, такие как вязкость и пластичность, при температурах от 0 до -269°C [1]. Исследования показывают, что при снижении температуры механизм разрушения метал-

лов может изменяться. Например, работы А.Ф. Иоффе, посвященные влиянию низких температур на свойства металлов, выявили закономерности в поведении материалов и предложили объяснение механизма вязко-хрупкого перехода (рис. 1). Данные исследования были развиты в дальнейших работах Н.Н. Давиденкова и Я.Б. Фридмана [2].

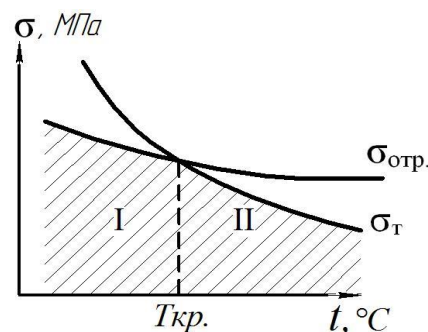


Рис. 1. Модель А.Ф. Иоффе хрупкого (I) и вязкого (II) разрушений стали

Fig. 1. A.F. Ioffe's model of brittle (I) and ductile (II) fractures of steel

Согласно модели А.Ф. Иоффе, снижение температуры оказывает относительно небольшое влияние на сопротивление отрыву, однако существенно меняет предел текучести. Это приводит к смене механизма разрушения материала. Критическая точка пересечения кривых σ_t и $\sigma_{отр}$ определяет температуру вязко-хрупкого перехода $T_{кр}$. При температурах ниже $T_{кр}$ разрушения становятся хрупкими [6].

Экспериментальные исследования [3–8] показали, что различия в кристаллическом строении металлов существенно влияют на их поведение при снижении температуры. Металлы с гранцентрированной кристаллической решеткой (ГЦК) сохраняют вязкий механизм разрушения даже при низких температурах, хотя их ударная вязкость плавно снижается. В свою очередь, металлы с объемно-центрированной кристаллической решеткой (ОЦК) демонстрируют более сложное поведение: после определенной температуры в изломах могут появляться зоны хрупкого разрушения, а при дальнейшем снижении температуры материал полностью охрупчивается [9]. Охрупчивание представляет серьезную опасность, так как трещины распространяются быстро, не давая возможности своевременно выявить проблему и принять меры для предотвращения разрушения конструкции и, соответственно, аварии.

Для оценки хладостойкости материалов используются две основные характеристики: температура вязко-хрупкого перехода T_{50} и температура, при которой ударная вязкость KCV достигает критического значения 20 Дж/см². Температура T_{50} определяется как температура, при которой доля вязкой и хрупкой составляющих в изломе равна 50 %. Чем ниже значение T_{50} , тем выше хладостойкость материала. Аналогично чем ниже температура, при которой достигается критическое значение KCV, тем более хладостойким считается металл [10].

На сегодняшний день существует несколько методов повышения хладостойкости металлов. Наиболее распространены следующие подходы: использование металлов с ГЦК-решеткой, легирование и микролегирование, рафинирование и раскисление, применение термической или термомеханической обработки, а также оптимизация конструктивных решений [11, 12]. Эти методы направлены либо на полное исключение хрупкого разрушения при заданной температуре, либо на увеличение доли вязкой составляющей в изломе, что позволяет сдвинуть температуру полного перехода металла из вязкого состояния в хрупкое за пределы эксплуатационных условий.

С развитием современных технологий производства материалов появились новые способы создания биметаллических и мультиметаллических композиций. К таким технологиям относятся селективное лазерное сплавление, электродуговая наплавка порошков и проволоки [13]. Благодаря этим методам стало возможным производить изделия, где основной металл армируется вторым материалом, что значи-

тельно повышает их эксплуатационные характеристики [14, 15]. Особый интерес представляет оценка хладостойкости металлических композиций, содержащих основной металл с ОЦК-решеткой и дополнительное армирование металлом с ГЦК-решеткой.

Преимущество такой композиции заключается в том, что биметаллический материал никогда полностью не переходит из вязкого состояния в хрупкое, поскольку всегда содержит определенный процент металла с ГЦК-решеткой, сохраняющего свою вязкость на всем диапазоне температур. Процентное содержание каждого из металлов в сечении можно регулировать в зависимости от требуемых характеристик в каждом конкретном случае.

Материалы и методы исследования

В качестве основного материала для изготовления образцов была выбрана углеродистая сталь 20 с ОЦК-решеткой. Для армирующего материала использована аустенитная нержавеющая сталь 12X18H10T с ГЦК-решеткой. Химический состав этих сталей представлен в табл. 1.

Сталь 20 широко применяется в машиностроении для производства деталей машин и металлоконструкций благодаря своей хорошей свариваемости, что является ключевым фактором при создании биметаллических образцов. Сталь 12X18H10T представляет собой высоколегированный аустенитный сплав, который характеризуется высокой коррозионной стойкостью и относится к классу криогенных материалов. Ее допустимый температурный диапазон эксплуатации составляет от –196 до +600 °C [16].

Таблица 1. Химический состав сталей
Table 1. Chemical composition of steels

Сталь 20								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	
0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,3	
Сталь 12X18H10T								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti
до 0,12	до 0,8	до 2	9–11	до 0,02	до 0,035	17–19	до 0,3	0,6–0,8

Для оценки влияния низких температур на механические свойства образцов проводились испытания на ударный изгиб согласно ГОСТ 9454-78. Испытания выполнялись на образцах с поперечным сечением 10×10 мм и V-образным надрезом на маятниковом копре РН-300 при температурах +20 и –50°C. Нижнее значение температуры было выбрано для обеспечения полного хрупкого разрушения стали 20.

Для сравнительного анализа были изготовлены два типа образцов: монометаллический (из стали 20) и биметаллический (основа из стали 20 с продольным армированием сталью 12X18H10T). Конструкция заготовки биметаллического образца представлена на рис. 2.

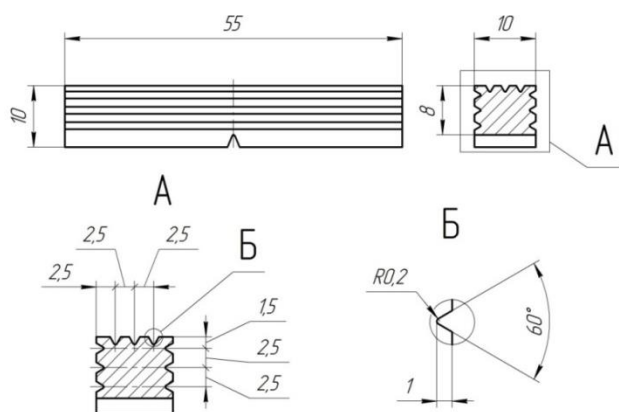


Рис. 2. Эскиз заготовки биметаллического образца
Fig. 2. Sketch of a bimetallic sample blank

Процесс изготовления биметаллических образцов включал следующие этапы:

- Механическая обработка заготовки из стали 20 с вырезанием треугольных канавок (рис. 3, а).
- Послойное заполнение канавок сталью 12Х18Н10Т методом лазерной наплавки проволоки диаметром 0,5 мм на оборудовании НТФ COMBOMAX 300/3000. Режимы наплавки: мощность импульса 270 Вт, длительность импульса 4,5 мс, размер пятна 0,96 мм, скорость 1 мм/с, шаг импульса 0,167 мм, защитная атмосфера – аргон.
- Чистовая механическая обработка готовых образцов (рис. 3, б).

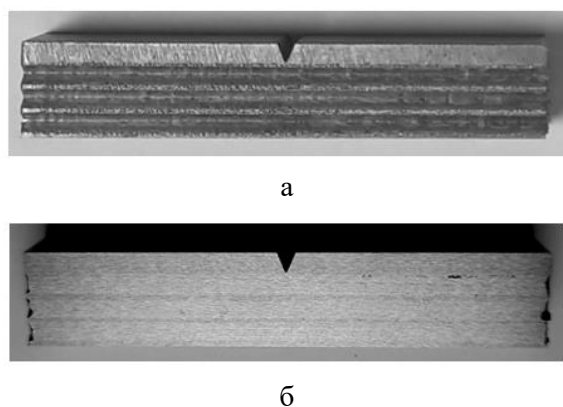


Рис. 3. Изготовление биметаллического образца:
а – заготовка; б – готовый образец после наплавки

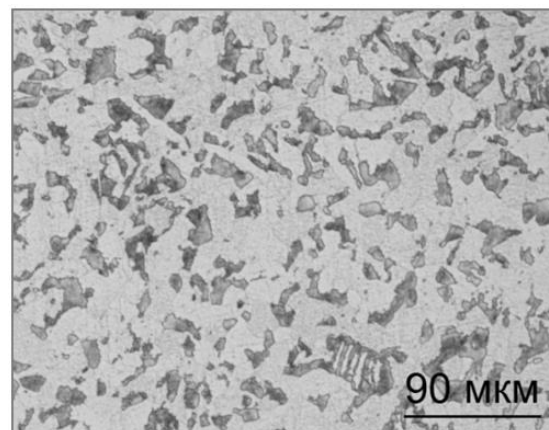
Fig. 3. Manufacturing of a bimetallic sample: а is blank; б is finished sample after cladding

Доля стали 12Х18Н10Т в поперечном сечении образца составляет 9,05%. В массовом соотношении при средней массе образца 42,8 г масса армирующего материала равна 4,7 г, что соответствует 10,9% от общей массы образца.

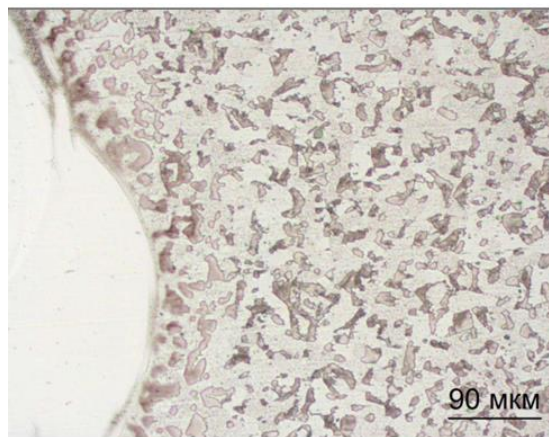
Анализ микроструктуры материала выполнен с использованием металлургического микроскопа модели Альтами МЕТ 1С.

Полученные результаты и их обсуждение

Структура поперечного сечения биметаллического образца представлена на рис. 4. Травление выполнено по стали 20. На изображении видно, что материал имеет ферритно-перлитную структуру, при этом средний размер зерен феррита составляет 16 мкм. В местах сплавления стали 20 со сталью 12Х18Н10Т наблюдаются локальные участки наслоения двух материалов. При этом трещины или отслоения сплавов не выявлены. Имеющиеся особенности строения характерны для изделий, получаемых аддитивным методом лазерного сплавления и наплавки [17, 18].



а



б

Рис. 4. Структура образца в поперечном сечении:
а – структура стали 20, увеличение $\times 200$;
б – структура в зоне сплавления стали 20 и 12Х18Н10Т, увеличение $\times 200$

Fig. 4. Sample structure in cross section: а is structure of steel 20, magnification $\times 200$; б is structure in the fusion zone of steel 20 and 12Cr18Ni10Ti, magnification $\times 200$

Значения ударной вязкости для различных типов образцов представлены в табл. 2.

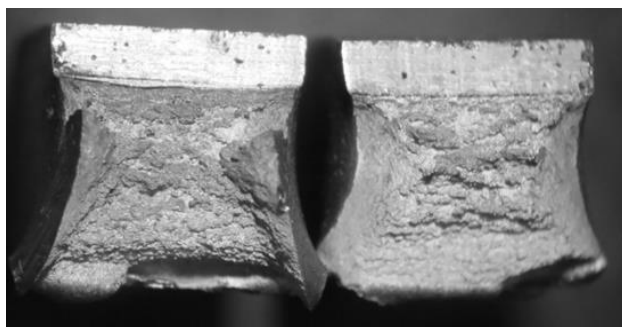
Таблица 2. Значения ударной вязкости образцов
Table 2. Impact toughness values of samples

Образец	KCV(+20°C), Дж/см ²	KCV(–50°C), Дж/см ²
Сталь 20	198,19	4,75
Сталь 20 + 12X18H10T	130,31	10,56

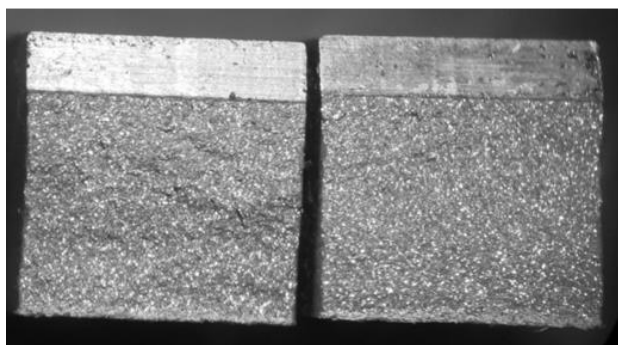
Результаты испытаний показывают следующее:

– При температуре +20°C сталь 20 демонстрирует вязкий механизм разрушения с характерным матовым волокнистым изломом и выраженной пластической деформацией образца (рис. 5, а). Величина KCV составляет 198,19 Дж/см².

– При температуре –50°C сталь 20 разрушается по хрупкой схеме (рис. 5, б). Область разрушения имеет 100%-й хрупкий излом, отличающийся блеском, ручьжистым узором и фасетками скола. Образец практически не деформируется. Величина KCV составляет 4,75 Дж/см².



а



б

Рис. 5. Изломы стали 20: а – излом при температуре +20°C; б – излом при температуре –50°C

Fig. 5. Fractures of steel 20: а is fracture at temperature +20°C; б is fracture at temperature –50°C

При испытании биметаллических образцов наблюдаются различия во внешнем виде изломов и величине KCV по сравнению с образцами из стали

20. Биметаллический образец имеет меньшую степень пластической деформации. Поверхность излома на рис. 6, а представляет собой две области: вязкого разрушения по контуру образца, включающая как основной, так и армирующий материалы; хрупкого разрушения в сердцевине образца, состоящая только из основного материала.

На рис. 6, в видно, что хрупкая зона может представлять собой не единый участок, а ряд областей, между которыми наблюдаются вязкие разрушения. Доля хрупкой составляющей в биметаллических образцах составляет в среднем 26%. Образец имеет все характерные зоны для вязкого разрушения, включая зарождение трещины, распространение трещины, утяжки и долома. Значение ударной вязкости KCV (+20°C) составляет 130,3 Дж/см².

Твердость стали 20 в сердцевине биметаллических образцов составляет 108 НВ, что указывает на отсутствие увеличения её твердости вследствие многократных термических воздействий в процессе наплавки. Охрупчивание нельзя связать с температурным фактором, поскольку при +20°C аналогичные образцы без наплавки разрушаются по вязкой схеме. Поведение биметаллического материала можно объяснить сочетанием нескольких факторов: внутренними напряжениями, вызванными наплавкой, разностью в механических свойствах двух материалов и скоростью деформации при испытаниях [19–21].

При испытании биметаллических образцов в зоне надреза разрушение происходит по вязкой схеме. По мере развития разрушения в сторону сердцевины включаются зоны с наплавкой из стали 12X18H10T, которые препятствуют пластической деформации стали 20, удерживают области основного материала у поверхности и не дают им переместиться к центру. Это создает напряженное состояние в центральной области образца, где изменение формы меньше, чем изменение объема при деформации, что соответствует условию образования областей хрупкого разрушения. По мере прохождения центральной области напряжения в материале уменьшаются, и разрушение завершается по вязкой схеме.

При испытании биметаллических образцов при температуре –50°C основной материал разрушается по хрупкой схеме аналогично образцам из стали 20 без армирования. Участки излома, заполненные армирующим сплавом, имеют матовую поверхность и признаки пластической деформации. Армирующие полосы на тыльной поверхности образца имеют зону долома (рис. 6, б, г). Таким образом, зоны хрупкого и вязкого разрушения разделены между сталью 20 и сталью 12X18H10T соответственно. Средняя величина ударной вязкости KCV (–50°C) составляет 10,56 Дж/см².

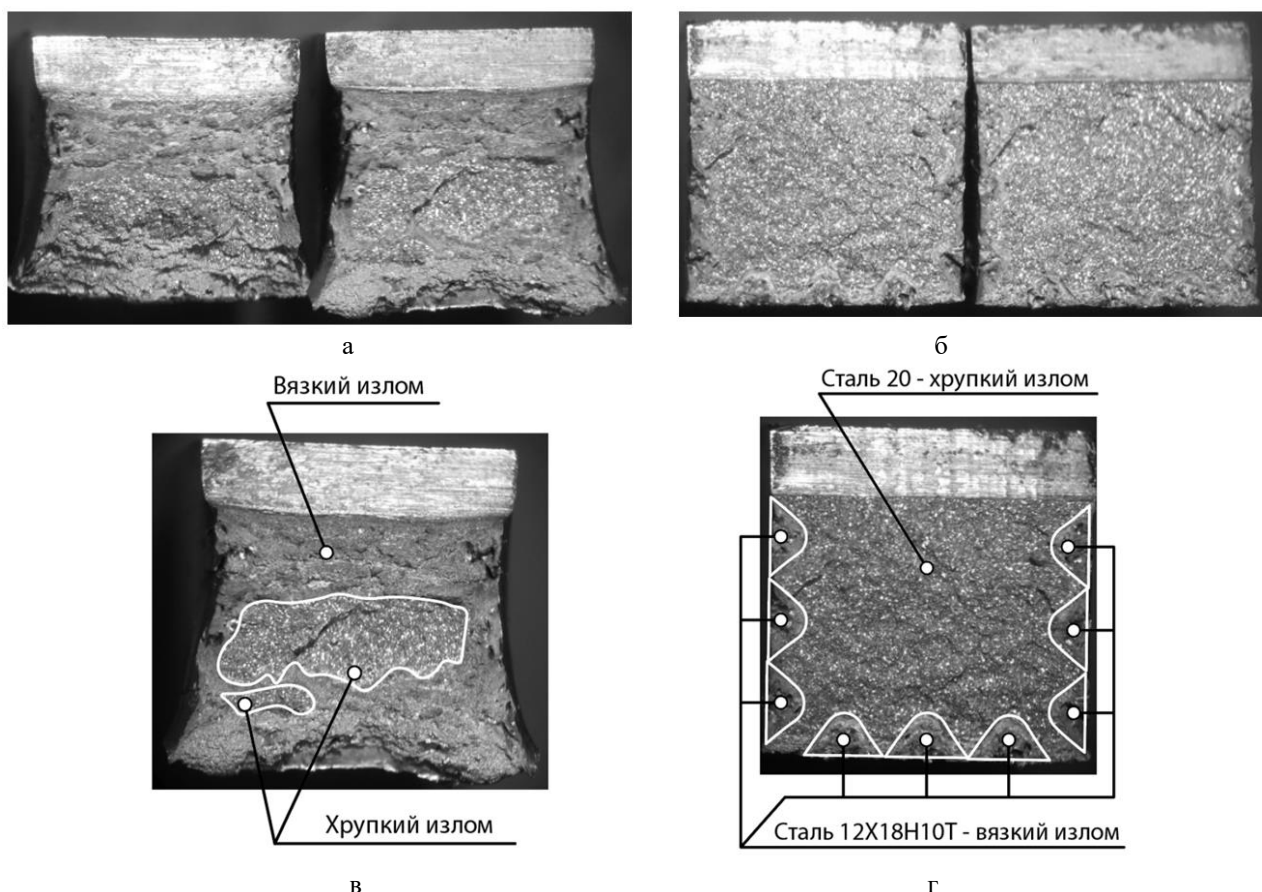


Рис. 6. Изломы стали 20 с наплавкой стали 12Х18Н10Т: а – излом при температуре +20°C; б – излом при температуре –50°C; в – излом при температуре +20°C с указанием областей хрупкого и вязкого разрушения; г – излом при температуре –50°C с указанием областей хрупкого и вязкого разрушения

Fig. 6. Fractures of steel 20 with 12Cr18Ni10Ti steel cladding: а is fracture at a temperature of +20°C; б is fracture at a temperature of –50°C; в is fracture at a temperature of +20°C with an indication of the areas of brittle and ductile fracture; г is fracture at a temperature of –50°C with an indication of the areas of brittle and ductile fracture

Закключение

По результатам проведенного исследования установлено, что армирование стали 20 наплавкой из стали 12Х18Н10Т, занимающей 9% поперечного сечения образца, увеличивает ударную вязкость биметаллических образцов в 2,2 раза при температуре –50 °С по сравнению с образцами из стали 20 без наплавки.

При этом наблюдается снижение значения ударной вязкости биметаллических образцов на 34% при температуре +20 °С по сравнению с образцами из стали 20. Данное снижение связано с появлением хрупкой составляющей в изломе, что обусловлено внутренними напряжениями в основном материале, возникающими в результате наплавки армирующего материала, а также различием в механических свойствах сталей 20 и 12Х18Н10Т.

Для дальнейшего повышения характеристик биметаллических образцов требуется реализация дополнительных мероприятий по устранению внутрен-

них напряжений. В качестве возможных решений могут быть применены:

- комплексная термическая обработка для снятия остаточных напряжений;
- оптимизация конфигурации и плотности армирующей сетки из сплавов с ГЦК-решеткой;
- использование методов математического моделирования (например, метод конечных элементов – МКЭ) и топологической оптимизации для обеспечения большей стойкости к хрупкому разрушению в направлении прикладываемых нагрузок.

Таким образом, полученные результаты подтверждают эффективность применения биметаллических композитов для создания конструкций, работающих в условиях низких температур, однако требуют дальнейшей оптимизации технологических параметров их изготовления.

Список источников

1. Солнцев Ю.П. Современные и перспективные стали криогенной техники // Перспективные материалы. 1998. № 3. С. 68–81.
2. Металловедение. Сталь: справочник в 2-х томах (четырёх книгах): пер. с нем. М.: Металлургия, 1995. 399 с.
3. Лебедев Д.В. Конструктивная прочность криогенных сталей. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
4. Солнцев Ю.П. Хладостойкие стали и сплавы: учебник для вузов. СПб.: Химиздат, 2014. 476 с.
5. Ульянин Е.А., Сорокина Н.А. Стали и сплавы для криогенной техники: справочник. М.: Металлургия, 1984. 206 с.
6. Вигли Д.А. Механические свойства материалов при низких температурах / пер. с англ. В. Н. Геминова; под ред. [и с предисл.] Л.К. Гордиенко. М.: Мир, 1974. 373 с.: ил.
7. Береснев Г.А. Факторы, влияющие на склонность стали к хрупкому разрушению // Проблемы металловедения и физики металлов: сб. тр. М.: Металлургия, 1968. № 9. С. 157–162.
8. Спектор Я.Я., Саррак В.И., Энтин Р.И. О причинах влияния никеля на хладноломкость железа // ДАН СССР. 1964. Т. 155. № 5. С. 156–157.
9. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. К.: Наукова думка, 1975. 296 с.
10. Вологжанина С.А., Иголкин А.Ф. Хладостойкие материалы. Лабораторные работы: учеб.-метод. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 42 с.
11. Константинов В.М., Галимский А.И., Хина Б.Б. Анализ путей повышения хладостойкости ряда углеродистых и низколегированных конструкционных сталей // Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. Минск: БНТУ, 2015. Вып. 36. С. 177–185.
12. Гурин М. А., Шафрай К. А. Особенности увеличения хладностойкости металлических сооружений // E-Scio. 2019. №8 (35). С. 186–194.
13. A Review of the Metal Additive Manufacturing Processes / Tebianian M., Aghaie S., Razavi Jafari N.S., Elmi Hosseini S.R., Pereira A.B., Fernandes F.A.O., Farbakhti M., Chen C., Huo Y. // Materials. 2023, 16, 7514. <https://doi.org/10.3390/ma16247514>
14. Review on additive hybrid- and multi-material-manufacturing of metals by powder bed fusion: state of technology and development potential / Schneck M., Horn M., Schmitt M. et al. // Prog Addit Manuf. 2021, 6, 881–894. <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00205-2>
15. Additive manufacturing of multi-material parts—Design guidelines for manufacturing of 316L/CuCrZr in laser powder bed fusion / Meyer Ina, Marcus Oel, Tobias Ehlers, Roland Lachmayer // Heliyon. 2023, 9, no. 8.
16. Вологжанина С.А., Петкова А.П. Исследование влияния низких температур и деформаций на свойства аустенитной стали 12X18H10T // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. №4. С. 83–93.
17. Defect formation and influence on metallurgical structure due to powder cross-contaminations in LPBF / M. Horn et al. // Proceedings of 7th International Conference on Additive Technologies (iCAT), 2018.
18. A Review of the Laser Cladding of Metal-Based Alloys, Ceramic-Reinforced Composites, Amorphous Alloys, and High-Entropy Alloys on Aluminum Alloys / Zhao P., Shi Z., Wang X., Li Y., Cao Z., Zhao M., Liang J. // Lubricants. 2023, 11, 482. <https://doi.org/10.3390/lubricants11110482>
19. Евдокимов Е.Е., Коновалов О.В. Теория напряженного и деформированного состояния. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2020. 56 с.
20. Реут Л.Е. Теория напряженного и деформированного состояния с примерами и задачами: учеб.-метод. пособие по разделу курса «Механика материалов» для машиностроительных специальностей. Минск: БНТУ, 2008. 106 с.
21. К вопросу построения предельной поверхности прочности торфяных структурных систем / Б.Ф. Зюзин, В.А. Миронов, А.Б. Зюзин, С.А. Юдин // Вестник ТвГТУ. 2014. № 2. Вып. 26. С. 55–64.

References

1. Solntsev Yu.P. Modern and promising steels for cryogenic technology. *Perspektivnye materialy* [Promising materials]. 1998;(3):68-81. (In Russ.)
2. *Metallovedenie. Stal: spravochnik v 2-h tomah (chetyrekh knigah): per. s nem.* Metallography. Steel: a reference book in 2 volumes (four books): trans. from Germ. Moscow: Metallurgiya, 1995, 399 p. (In Russ.)
3. Lebedev D.V. *Konstruktivnaya prochnost kriogennykh staley* [Structural strength of cryogenic steels]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 264 p. (In Russ.)
4. Solntsev Yu.P. *Hladostoikie stali i splavy: uchebnik dlya vuzov* [Cold-resistant steels and alloys: Textbook for universities]. Saint Petersburg: KHIMIZDAT, 2014, 476 p. (In Russ.)
5. Ulyanin E.A., Sorokina N.A. *Stali i splavy dlya kriogennoy tekhniki: spravochnik* [Steels and alloys for cryogenic technology: reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 206 p. (In Russ.)
6. Vigli D.A. *Mekhanicheskie svoistva materialov pri nizkikh temperaturah* [Mechanical properties of materials at low temperatures]. Translation from English by V.N. Geminov; edited by L. K. Gordienko. Moscow: Mir, 1974, 373 p. (In Russ.)
7. Beresnev G.A. Factors influencing the susceptibility of steel to brittle fracture. *Problemy metallovedeniya i fiziki metallov: sb. tr.* [Problems of Metal Science and Physics of Metals: Collection]. Moscow: Metallurgiya. 1968;(9):157-162. (In Russ.)
8. Spector Ya.Ya., Sarra V.I., Entin R.I. On the causes of nickel influence on cold brittleness of iron. *DAN SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences]. 1964;155(5):156-157. (In Russ.)
9. Trefilov V.I., Milman Yu.V., Firstov S.A. *Fizicheskie osnovy prochnosti tugoplavkikh metallov* [Physical foundations of strength of refractory metals]. Kyiv: Naukova Dumka, 1975, 296 p. (In Russ.)
10. Vologzhanina S.A., Igolkin A.F. *Khladoistoikie materialy. Laboratornye raboty: ucheb.-metod. posobie* [Cold-resistant materials. Laboratory research: Study Guide]. Saint Petersburg: ITMO University, 2015, 42 p. (In Russ.)

11. Konstantinov V.M., Galimsky A.I., Khina B.B. Analysis of ways to improve cold resistance of a number of carbon and low-alloy structural steels. *Metallurgiya: respublikanskiy mezhvedomstvenniy sbornik nauchnykh trudov* [Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers]. Minsk: BNTU. 2015;36:177-185. (In Russ.)
12. Gurin M.A., Shafrai K.A. Features of increasing cold resistance of metal structures. *E-Scio* [E-Scio]. 2019;(8(35)):186-194. (In Russ.)
13. Tebianian M., Aghaie S., Razavi Jafari N.S., Elmi Hosseini S.R., Pereira A.B., Fernandes F.A.O., Farbakhti M., Chen C., Huo Y. Review of the Metal Additive Manufacturing Processes. *Materials*. 2023;16:7514. <https://doi.org/10.3390/ma16247514>
14. Schneck M., Horn M., Schmitt M. et al. Review on additive hybrid- and multi-material-manufacturing of metals by powder bed fusion: state of technology and development potential. *Prog Addit Manuf*. 2021;6:881-894. <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00205-2>
15. Meyer Ina, Marcus Oel, Tobias Ehlers, Roland Lachmayer. Additive manufacturing of multi-material parts. Design guidelines for manufacturing of 316L/CuCrZr in laser powder bed fusion. *Heliyon*. 2023;9(8).
16. Vologzhanina S.A., Petkova A.P. Study of the influence of low temperatures and deformations on the properties of austenitic steel 12Cr18Ni10Ti. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki* [SPbPU Scientific and Technical Bulletin. Natural and Engineering Sciences]. 2019;(4):83-93. (In Russ.)
17. Horn M. et al., Defect formation and influence on metallurgical structure due to powder cross-contaminations in LPBF. Proceedings of the 7th International Conference on Additive Technologies (iCAT). 2018.
18. Zhao P., Shi Z., Wang X., Li Y., Cao Z., Zhao M., Liang J. A Review of the Laser Cladding of Metal-Based Alloys, Ceramic-Reinforced Composites, Amorphous Alloys, and High-Entropy Alloys on Aluminum Alloys. *Lubricants*. 2023;11:482. <https://doi.org/10.3390/lubricants11110482>
19. Evdokimov E.E., Konovalov O.V. *Teoriya napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya* [Theory of stressed and strained state]. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2020, 56 p. (In Russ.) ISBN 978-5-9948-3748-1.
20. Reut L.E. *Teoriya napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya s primerami i zadachami: ucheb.-metod. posobie po razdelu kursa «Mekhanika materialov» dlya mashinostroitelnykh specialnostey* [Theory of stressed and strained state with examples and problems: a study guide for the course Mechanics of Materials for mechanical engineering specialties]. Minsk: BNTU, 2008, 106 p. (In Russ.)
21. Zyuzin B.F., Mironov V.A., Zyuzin A.B., Yudin S.A. On the issue of constructing the ultimate strength surface of peat structural systems. *Vestnik TvGTU* [Bulletin of TVSTU]. 2014;26(2):55-64. (In Russ.)

Поступила 16.06.2025; принята к публикации 15.08.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 16/06/2025; revised 15/08/2025; published 25/12/2025

Колчин Павел Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия.
Email: p.v.kolchin@ipfran.ru. ORCID 0000-0002-2875-7377

Костылев Константин Андреевич – кандидат технических наук,
заведующий сектором акустического инжиниринга,
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия.
Email: kostylev@ipfran.ru. ORCID 0000-0003-1061-9192

Чернигин Михаил Алексеевич – аспирант,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: honeybadger52@yandex.ru. ORCID 0009-0005-6494-2851

Pavel V. Kolchin – PhD(Eng.), Researcher,
Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia.
Email: p.v.kolchin@ipfran.ru. ORCID 0000-0002-2875-7377

Konstantin A. Kostylev – PhD(Eng.), Head of Acoustic Engineering Sector,
Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russia.
Email: kostylev@ipfran.ru. ORCID 0000-0003-1061-9192

Mikhail A. Chernigin – Postgraduate Student,
Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: honeybadger52@yandex.ru. ORCID 0009-0005-6494-2851



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.313 : 669.018.4 : 537.8
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-102-109

РАСЧЕТ АДДИТИВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНО-НАПОЛНЕННЫХ МАГНИТОМЯГКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Гулин А.Е.¹, Линьков С.А.¹, Шеметов А.Н.¹, Кувшинов Д.А.², Ефимов С.В.³

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

²АО «НПО „Андронидная техника”», Магнитогорск, Россия

³Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Аннотация. Объектом исследования являются магнитопроводы для новых энергоэффективных электродвигателей промышленных роботов и металлообрабатывающих комплексов. Цель работы — выбор и расчет оптимальной структуры перспективных магнитомягких композитов, обеспечивающих технологичность производства и снижение потерь мощности в магнитной системе электродвигателя на широком частотном диапазоне питающего напряжения. Рассмотрены теоретические основы моделирования аддитивных электромагнитных свойств и оценка влияния удельного объемного содержания и характеристик наполнителя и матрицы-связующего в композите на магнитную проницаемость материала. Проведен сравнительный анализ моделей гетерогенной среды по Дж.К. Максвеллу, К.В. Вагнеру, О. Виннеру и В.И. Оделевскому. Выполнен расчетный эксперимент, результаты которого свидетельствуют о возможности применения линейной аппроксимации к расчетным кривым зависимостей магнитных проницаемостей дисперсно-наполненных композиционных материалов от удельного объемного содержания наполнителя, что в дальнейшем может упростить задачу выбора наилучшего решения для достижения требуемых магнитных свойств композиций. В качестве экспериментальной апробации указанной методики приведены результаты экспериментальных исследований физических и магнитных свойств дисперсно-наполненных магнитомягких композитов в лабораторных условиях. Проанализированы возможные преимущества и недостатки использования новых материалов при изготовлении электрических машин и приборов. Достигнутые на экспериментальных образцах показатели выявили недостаточный уровень их магнитной проницаемости, поэтому важным направлением развития этой темы представляется цифровой синтез прогнозных моделей новых композиционных магнитомягких материалов с учетом их структурного состояния и разработка технологии их производства, позволяющей сократить затраты на проектирование и сроки изготовления необходимых типоразмеров электрических машин, сдерживающие развитие автономных транспортных и робототехнических комплексов.

Ключевые слова: электрическая машина, магнитопровод, магнитомягкий композит, электротехническая сталь, материаловедение, технологии обработки материалов, математическая модель.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования России (проект FZRU-2025-0002).

© Гулин А.Е., Линьков С.А., Шеметов А.Н., Кувшинов Д.А., Ефимов С.В., 2025

Для цитирования

Расчет аддитивных электромагнитных свойств дисперсно-наполненных магнитомягких композиционных материалов для перспективных электродвигателей / Гулин А.Е., Линьков С.А., Шеметов А.Н., Кувшинов Д.А., Ефимов С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 102-109. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-102-109>



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

CALCULATION OF ADDITIVE ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF SOFT MAGNETIC DISPERSED-FILLED COMPOSITE MATERIALS FOR ADVANCED ELECTRIC MOTORS

Gulin A.E.¹, Linkov S.A.¹, Shemetov A.N.¹, Kuvshinov D.A.², Efimov S.V.³

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²JSC SPA Android Technics, Magnitogorsk, Russia

³Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Abstract. The subject of the study is cores for new energy-efficient electric motors used in industrial robots and metal-processing complexes. The aim of this work is to select and calculate an optimal structure of advanced soft magnetic composites that ensure manufacturability and reduction of power losses in the motor's magnetic system over a wide frequency range of supply voltage. The theoretical foundations of modeling additive electromagnetic properties and the assessment of the influence of the specific volume content and characteristics of the filler and binder matrix in the composite on the magnetic permeability of the material were considered. A comparative analysis of heterogeneous medium models was carried out according to J.C. Maxwell, K.W. Wagner, O. Wiener, and V.I. Odelevsky. A computational experiment was performed. The results indicated the possibility of applying linear approximation to the calculated curves of the dependences of the magnetic permeability of dispersed-filled composite materials on the specific volume content of the filler. This approach may simplify the task of choosing the best solution to achieve the required magnetic properties of the compositions in the future. The results of experimental studies of the physical and magnetic properties of dispersed-filled soft magnetic composites under laboratory conditions were presented as an experimental approbation of this technique. The potential advantages and disadvantages of using new materials in the manufacture of electrical machines and devices were analyzed. The performance indicators achieved on experimental samples revealed an insufficient level of their magnetic permeability. Therefore, an important direction for developing this topic is the digital synthesis of predictive models for new soft magnetic composite materials. This model must take into account the structural state and the development of production technologies that reduce design costs and production time of the electrical machines of required standard sizes. These improvements can help overcome the constraints hindering the development of autonomous transport and robotic complexes.

Keywords: electrical machine, magnetic core, soft magnetic composite, electrical steel, materials science, material processing technologies, mathematical model

This research is conducted with financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZRU-2025-0002).

For citation

Gulin A.E., Linkov S.A., Shemetov A.N., Kuvshinov D.A., Efimov S.V. Calculation of Additive Electromagnetic Properties of Soft Magnetic Dispersed-Filled Composite Materials for Advanced Electric Motors. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 102-109. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-102-109>

Введение

Ключевым элементом современных промышленных, транспортных и бытовых установок являются электродвигатели, технические и эксплуатационные характеристики которых определяют массогабаритные, энергетические и экономические показатели любого механизма. Отечественный и мировой опыт электромашиностроения показывает, что резервы энергосбережения, заложенные в оптимизации обмоток и механической части, практически исчерпаны. При этом практически не рассматриваются возможности повышения энергоэффективности магнитной системы. Особенно актуальным это направление становится в высокочастотных электроприводах, где нагрев традиционных листовых шихтованных магнитопроводов достигает предельно высоких значений и не обеспечивает требуемого КПД для эффективной

работы электродвигателя [1, 2]. Кроме того, стоимость специальных динамных сталей и трудоемкость изготовления электрических машин классической конструкции существенно снижают рентабельность их производства. Таким образом, необходимо разработать и исследовать качественно новые магнитомягкие материалы, отвечающие современным требованиям энергетической эффективности и технологичности использования для широкого круга типоразмеров электродвигателей.

Одним из решений поставленной задачи является разработка новых гетерогенных магнитомягких материалов, сочетающих в себе перспективные слоистые и дисперсно-наполненные композиты, которые позволили бы гибко варьировать механические и электромагнитные характеристики для использования в электродвигателях различного типоразмера и назначения.

Теоретические предпосылки

Первая модель гетерогенной среды с нерегулярной структурой была предложена Дж. К. Максвеллом [3, 4] для расчета средней диэлектрической проницаемости композиции, состоящей из сферических частиц с удельным сопротивлением k_1 во внешней матричной среде с удельным сопротивлением k_2 . Далее, согласно принципу двойственности, который основан на симметрии уравнений Максвелла относительно электрического и магнитного полей, решение электродинамической задачи можно преобразовать в аналогичное для магнитной системы путем замены соответствующих электрических параметров в проводящих средах для магнитных полей в магнетиках, описываемых уравнением Лапласа:

$$\mu_{см} = 1 + \frac{3v_1(\mu_1 - 1)}{2 + \mu_1 - v_1(\mu_1 - 1)}, \quad (1)$$

где v_1 – удельное объемное содержание наполнителя в матрице с магнитной проницаемостью μ_1 ; v_2 – то же для матричной среды с магнитной проницаемостью μ_2 (при условии, что $v_1 + v_2 = 1$).

Далее результаты Максвелла уточнялись различными исследователями с учетом исходных предпосылок и степени абстракции описания взаимодействующих компонентов среды. Рассмотрим некоторые наиболее известные из них:

– уравнение К.В. Вагнера [5], учитывающее процессы поляризации неоднородных материалов, таких как суспензии или коллоиды, полимеры с разделёнными фазами, а также кристаллические или жидкокристаллические полимеры:

$$\mu_{см} = \mu_2 \frac{2\mu_2 + \mu_1 + 2v_1(\mu_1 - \mu_2)}{2\mu_2 + \mu_1 - v_1(\mu_1 - \mu_2)}; \quad (2)$$

– закон смешения О. Винера [6], описывающий смесь с изотропным или анизотропным порядком компонентов, где свойства компонентов, а также структура смеси остаются неизменными для волнового процесса, при котором длина волны велика по сравнению с характерными размерами составных частей структуры, и требуется определить величину рассматриваемого свойства условного однородного тела, которым можно заменить смесь таким образом, что внешнее поле останется неизменным:

$$\mu_{см} = \mu_2 \frac{1 + 2v_1 \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + 2\mu_2}}{1 - v_1 \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + 2\mu_2}}; \quad (3)$$

– логарифмическое правило смешения К. Лихтенеккера [8] для хаотических бинарных смесей с взаимопроникающими компонентами:

$$\mu_{см} = \frac{[v_1\mu_1 + (1 - v_1)\mu_2]^u}{\left[\frac{v_1}{\mu_1} + \frac{(1 - v_1)}{\mu_2}\right]^{1-u}}, \quad (4)$$

где u – мера вероятности вида взаимодействия, когда линия раздела компонентов перпендикулярна силовым линиям поля; $(1 - u)$ – наоборот, частота близости к случаю, когда линия раздела компонентов параллельна силовым линиям поля;

– формула В.И. Оделевского для взаимодействия внутри смеси двух сферических компонентов сопоставимых радиусов:

$$\mu_{см} = \mu_a \left[1 + \sqrt{1 + \frac{\mu_1\mu_2}{2\mu_a^2}} \right], \quad (5)$$

$$\mu_a = \frac{(3v_1 - 1)\mu_1 + (3v_2 - 1)\mu_2}{4}.$$

Таким образом, основными варьируемыми параметрами при синтезе дисперсно-наполненных композиционных материалов являются удельное объемное содержание наполнителя v_1 в матрице с магнитной проницаемостью μ_1 и удельное объемное содержание матричной среды v_2 – с магнитной проницаемостью μ_2 . Причем v_1 и v_2 , как уже отмечалось, взаимосвязаны через уравнение $v_1 + v_2 = 1$.

При этом наиболее простым технологическим приемом, обеспечивающим управление магнитными свойствами таких материалов, будет управление количеством наполнителя в матрице.

Результаты расчетов

В ходе расчетного эксперимента, проводимого на первом этапе исследований, рассматривалось влияние удельного объемного содержания наполнителей при их разных магнитных свойствах (магнитной проницаемости) на магнитную проницаемость смеси — дисперсно-наполненных композиционных материалов. Результаты расчетов представлены на **рис. 1**.

Как следует из приведенных данных, для любых магнитомягких материалов (при использовании наполнителей с разными характеристиками), магнитные проницаемости таких композитов практически линейно зависят от удельного объемного содержания наполнителя. Очевидно, что чем больше значение μ_1 , тем выше расположена прямая влияния объемного содержания наполнителя на графике и тем больше угол наклона этой прямой к оси удельного объемного содержания.

Для доказательства, что полученные кривые влияния удельного объемного содержания наполнителя на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов близки к линейным, в программном комплексе «OriginPro®» производилась аппроксимация со статистическим анализом отклоне-

ний. Для расчета был выбран вариант с магнитной проницаемостью $\mu_1 = 50000$. Результаты статистической обработки данных приведены в табл. 1.

Представленные данные свидетельствуют о возможности применять линейные аппроксимации к расчетным кривым зависимостей магнитных проницаемостей дисперсно-наполненных композиционных материалов от удельного объемного содержания наполнителя, что в дальнейшем может упростить задачу выбора наилучшего решения для достижения требуемых магнитных свойств композиций.

На втором этапе исследований рассматривалось влияние удельного объемного содержания наполнителей при их разных магнитных свойствах (магнитными проницаемостями материалов наполнителя) на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Как следует из приведенных данных, магнитные проницаемости композиционных материалов практически линейно зависят от магнитных проницаемостей наполнителей при разных значениях удельного содержания наполнителей в матрице. При этом наличие диамагнитной матрицы существенно снижает магнитные свойства всей композиции. Так, например, при $v_1 = 0,34$ магнитная проницаемость среды принимает значение 546 по сравнению с магнитной проницаемостью наполнителя (50000), что свидетельствует об уменьшении магнитной проницаемости в 91 раз, а для случая, когда $v_1 = 0,52$, уменьшение составляет 3,57 раза (снижение магнитной проницаемости с 50000 до 14002). Очевидно, что чем больше значение v_1 , тем выше расположена прямая влияния объемного содержания наполнителя на графике и тем больше угол наклона этой прямой к оси магнитной проницаемости наполнителя.

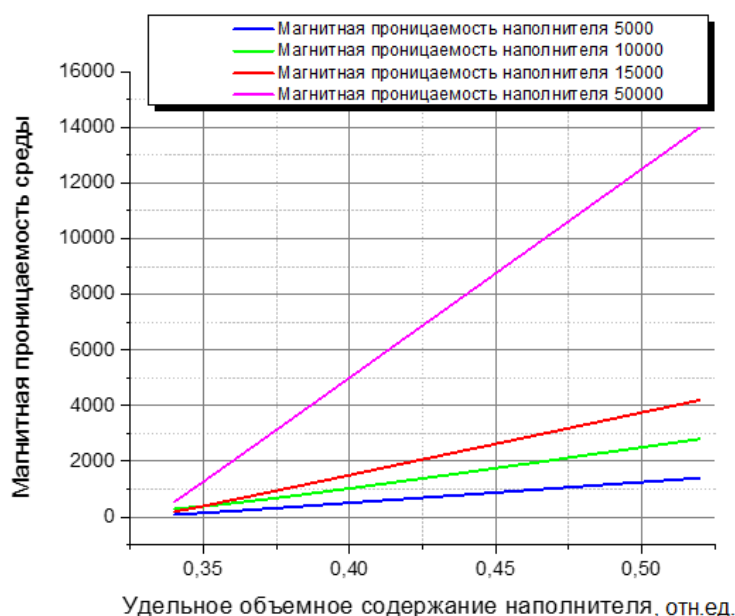


Рис. 1. Влияние удельного объемного содержания наполнителя v_1 при его разных магнитных проницаемостях μ_1 на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов $\mu_{см}$

Fig. 1. Influence of the specific volume content of the filler v_1 at its different magnetic permeability μ_1 on the magnetic permeability of dispersed-filled composite materials $\mu_{см}$

Таблица 1. Результаты аппроксимации кривой влияния удельного объемного содержания наполнителя на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов для случая $\mu_1 = 50000$

Table 1. Results of the approximation of the influence curve of the filler's specific volume content on the magnetic permeability of dispersed-filled composite materials for the case of $\mu_1 = 50000$

Уравнение	$y = a + b \cdot x$
Коэффициент уравнения a	$-2451,84628 \pm 8,89922$
Коэффициент уравнения b	$7403,43022 \pm 20,52997$
Сумма квадратов отклонений	408,41
Критерий Пирсона	0,99993
Критерий R^2	0,99987

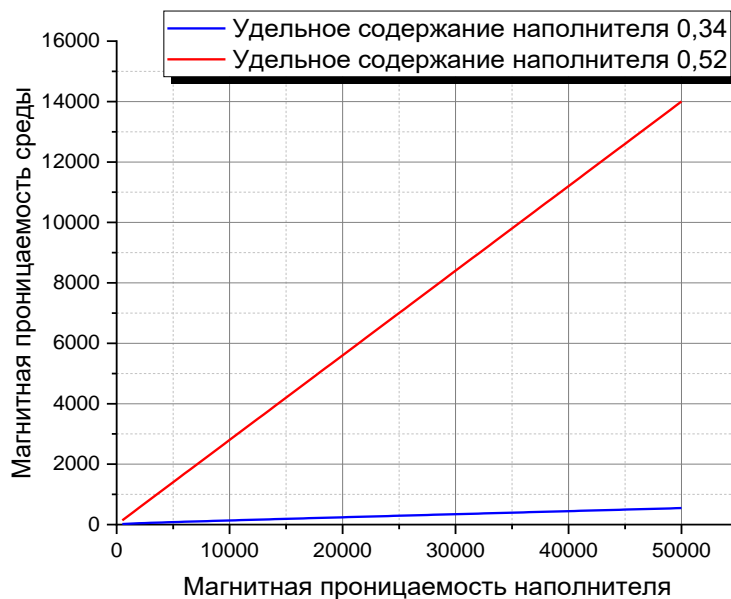


Рис. 2. Расчетные кривые влияния магнитной проницаемости наполнителя на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов для $\nu_1 = 0,34$ и $\nu_1 = 0,52$

Fig. 2. Calculated influence curves of the filler's magnetic permeability on the magnetic permeability of dispersed-filled composite materials for $\nu_1 = 0,34$ и $\nu_1 = 0,52$

Важным технологическим выводом представленных результатов является то, что для повышения магнитной проницаемости магнитомягких композиционных материалов следует стремиться к увеличению удельного объемного содержания наполнителя и использованию в качестве такого наполнителя материалов с высокой магнитной проницаемостью.

Третий эксперимент был направлен на исследование влияния магнитной проницаемости самой матрицы на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов. Если предыдущие исследования выполнялись для случая, когда наполнитель вводится в матрицу из диамагнетиков и парамагнетиков с низкой магнитной проницаемостью ($\mu_2 \approx 1$), то применение в качестве матрицы материалов, обладающих достаточными механическими свойствами, низкой плотностью и повышенной магнитной проницаемостью, может существенно улучшить свойства дисперсно-наполненных композитов, открывая технологические резервы повышения их магнитных свойств.

Для оценки этого эффекта выполнены расчетные эксперименты с использованием матрицы, магнитная проницаемость которой варьируется в диапазоне от 100 до 1000 (рис. 3). Результаты моделирования показали, что при варьировании удельного объемного содержания наполнителя магнитные проницаемости композитов пропорционально зависят от магнитной проницаемости матрицы. Очевидно, что чем больше

значение μ_2 , тем выше расположена поверхность влияния объемного содержания наполнителя на графике и тем больше угол наклона этой прямой к оси удельного объемного содержания.

Оценка адекватности применения математических моделей для расчета магнитных свойств дисперсно-наполненных композиционных материалов осуществлялась путем экспериментального определения значений магнитной проницаемости в зависимости от удельного объемного содержания наполнителя и сопоставления полученных экспериментальных данных с расчетными.

Результаты экспериментально-аналитического определения параметров дисперсно-наполненных композиционных материалов по образцам представлены в табл. 2, а значения магнитной проницаемости дисперсно-наполненных композиционных материалов, полученных экспериментальным путем ($\mu_{см\text{эксп}}$), и значения магнитной проницаемости, полученные по математической модели ($\mu_{см}$), для исследуемых образцов приведены в табл. 3.

В табл. 3 относительное отклонение расчетных данных от экспериментальных значений магнитной проницаемости материалов определяется как абсолютное значение разниц $\mu_{см}$ и $\mu_{см\text{эксп}}$, приведенное к значению $\mu_{см\text{эксп}}$, измеряемое в процентах.

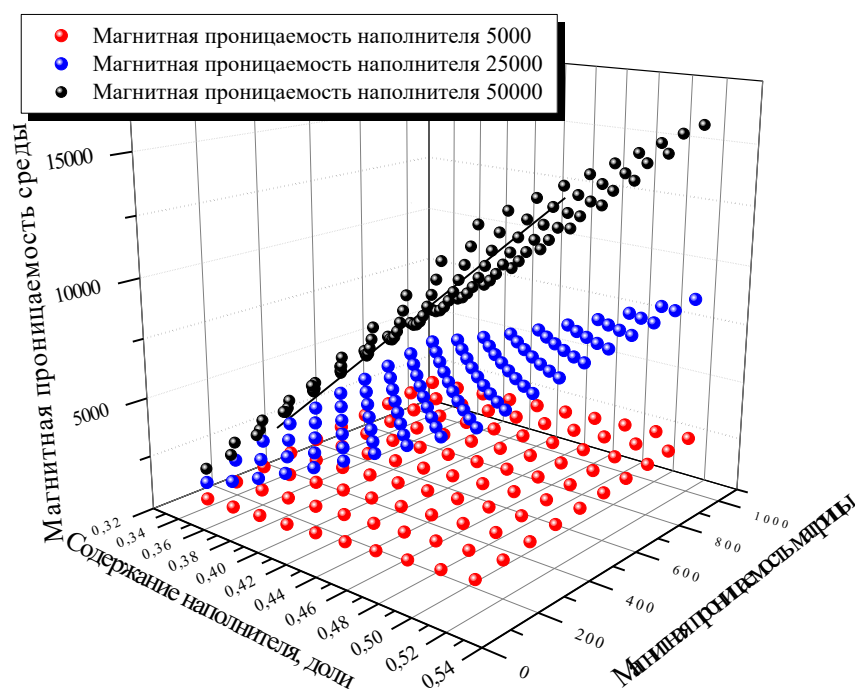


Рис. 3. Расчетные поверхности влияния удельного объемного содержания наполнителя и магнитной проницаемости матрицы $\mu_2 \in [100;1000]$ на магнитную проницаемость дисперсно-наполненных композиционных материалов при магнитной проницаемости наполнителя 5000, 25000 и 50000

Fig. 3. Calculated surfaces of the influence of the filler's specific volume content and the magnetic permeability of the matrix $\mu_2 \in [100;1000]$ on the magnetic permeability of dispersed-filled composite materials with a magnetic permeability of the filler of 5000, 25000, and 50000

Таблица 2. Значения относительных объемных содержаний ферромагнитного наполнителя ν_1 , матрицы ν_2 и остаточной пористости Π для образцов дисперсно-наполненных композиционных материалов
Table 2. Values of the relative volume contents of the ferromagnetic filler (ν_1), matrix (ν_2), and the residual porosity Π for samples of dispersed-filled composite materials

Номер образца	Фракция, мкм	m_1 , масс%	h , мм	$m_{\text{эксп}}$, г	$\rho_{\text{эксп}}$, г/см ³	$\rho_{\text{расч}}$, г/см ³	$m_{\text{расч}}$, г	Π	ν_1	ν_2
1	160	10	11,8	17,5	3,93	5,51	24,55	0,287	0,343	0,657
2	160	5	9,4	13,3	3,75	6,48	23,01	0,422	0,361	0,639
3	160	3	6,0	8,2	3,62	6,97	15,80	0,481	0,379	0,621
4	71	10	11,7	17,1	3,87	5,51	24,34	0,298	0,333	0,667
5	71	5	6,2	8,9	3,80	6,69	15,65	0,431	0,383	0,617
6	71	3	5,9	8,0	3,59	7,09	15,80	0,494	0,388	0,612

Таблица 3. Значения магнитной проницаемости дисперсно-наполненных композиционных материалов, полученных экспериментальным и расчетным путем для исследуемых образцов

Table 3. Values of the magnetic permeability of dispersed-filled composite materials obtained experimentally and calculated for the studied samples

Номер образца	Фракция, мкм	m_1 , масс%	$\mu_{\text{см}}$	$\mu_{\text{см эксп}}$	Относительное отклонение, %
1	160	10	119,46	117	2,10
2	160	5	319,03	310	2,91
3	160	3	447,94	480	6,68
4	71	10	64,35	63	2,14
5	71	5	378,95	367	3,26
6	71	3	418,27	453	7,67

Заключение

Анализ довинеровских расчетных методик определения эффективных свойств композитов показал недостаточно высокую степень их соответствия полученным экспериментальным данным. Поэтому перспективным направлением развития работы является выявление взаимосвязей между структурными параметрами дисперсно-наполненных композитов и показателями их магнитных свойств.

Достигнутые на экспериментальных образцах показатели выявили недостаточный уровень их магнитной проницаемости для применения в современных электрических машинах, поэтому важным направлением развития этой темы представляется создание прогнозных моделей магнитопроводов с учетом структурного состояния этих материалов.

Новые материалы и технологии позволяют, помимо всего прочего, сократить затраты на производство и сроки изготовления необходимых типоразмеров электрических машин и компонентов, сдерживающие развитие автономных транспортных и робототехнических комплексов.

Список источников

1. Линьков С.А., Сарваров А.С., Бачурин И.В. Анализ систем управления синхронных электроприводов // Электротехнические системы и комплексы. 2014. № 2 (23). С. 25-28.
2. Разработка математической модели и технологии производства магнитомягких материалов для магнитопроводов перспективных высокоскоростных электродвигателей / С. А. Линьков, М. В. Чукин, А. Н. Шеметов [и др.] // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 83-й междунар. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2025. С. 40.
3. Maxwell J.C. Treatise on electricity and magnetism, 1873, vol. 1, 2, 1881.
4. Нетушил А.В. О расчете средней диэлектрической проницаемости смесей // Научные доклады высшей школы. Электромеханика и автоматика. 1959. № 1. С. 203-215.
5. Эдвабник В.Г. К теории обобщенной проводимости смесей // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-2. С. 76.
6. Wiener O. Zur Theorie der Stäbchendoppelbrechung. Lepz. Akad. Ber. 1909, 61, p.113.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1957. 652 с.
8. Свойства порошковых композиционных магнитомягких материалов электротехнического назначения / Е.В. Малая, А.С. Решенкин, Р.А. Гончаров, С.А. Воробьев // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. №5. С. 45-48.
9. Comparison of high-torque electric motors with magnetic cores made of amorphous iron and electrotechnical steel /

F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, R. R. Urazbakhtin [et al.] // International Review of Electrical Engineering. 2020, vol. 15, no. 2, pp. 126-133. DOI: 10.15866/iree.v15i2.17923.

10. Chattopadhyay A review of soft magnetic properties of mechanically alloyed amorphous and nanocrystalline powders / Alican Yakin, Tuncay Simsek, Baris Avar, Telem Simsek, Arun K. // Emergent Materials. 2023, no. 6, pp. 453-481. DOI: 10.1007/s42247-023-00485-0.

References

1. Linkov S.A., Sarvarov A.S., Bachurin I.V. Analysis of control systems for synchronous electric drives. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical Systems and Complexes]. 2014;(2(23)):25-28. (In Russ.)
2. Linkov S.A., Chukin M.V., Shemetov A.N. et al. Development of a mathematical model and technology for the production of soft magnetic materials for the magnetic circuits of advanced high-speed electric motors. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy докладов 83-y mezhdun. nauch.-tekhn. konf.* [Actual problems of modern science, technology, and education: abstracts of the 83rd International Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2025, pp. 40. (In Russ.)
3. Maxwell J.C. Treatise on electricity and magnetism. 1873, vol. 1, 2, 1881.
4. Netushil A.V. On the calculation of the average dielectric constant of mixtures. *Nauchnye doklady vysshey shkoly. Elektromekhanika i avtomatika* [Scientific reports of higher education. Electromechanics and automation]. 1959;(1):203-215. (In Russ.)
5. Edvabnik V.G. To the theory of generalized conductivity of mixtures. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2015;(1-2):76. (In Russ.)
6. Wiener O. Zur Theorie der Stäbchendoppelbrechung. *Lepz. Akad. Ber.* 1909, 61, 113 p.
7. Landau L.D., Lifshits E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Continuous media electrodynamics]. Moscow: State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1957, 652 p. (In Russ.)
8. Malaya E.V., Reshenkin A.S., Goncharov R.A., Vorobyov S.A. Properties of powder composite magnetically soft materials for electricals. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Procurement in Mechanical Engineering]. 2015;(5):45-48. (In Russ.)
9. Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Urazbakhtin R. R. et al. Comparison of high-torque electric motors with magnetic cores made of amorphous iron and electrotechnical steel. *International Review of Electrical Engineering*. 2020;15(2): 26-133. DOI: 10.15866/iree.v15i2.17923.
10. Alican Yakin, Tuncay Simsek, Baris Avar, Telem Simsek, Arun K. Chattopadhyay. A review of soft magnetic properties of mechanically alloyed amorphous and nanocrystalline powders. *Emergent Materials*. 2023;(6):453-481. DOI: 10.1007/s42247-023-00485-0.

Поступила 27.11.2025; принята к публикации 09.12.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 27/11/2025; revised 09/12/2025; published 25/12/2025

Гулин Александр Евгеньевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: walter_chel@mail.ru. ORCID 0000-0002-7722-4112.

Линьков Сергей Александрович — кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: xx_linkov@rambler.ru. ORCID 0000-0002-0774-3910.

Шеметов Андрей Николаевич — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: shemetow-a-n@yandex.ru,. ORCID 0000-0001-7184-2190

Кувшинов Дмитрий Анатольевич — инженер, руководитель отдела, АО «НПО „Андройдная техника”», Магнитогорск, Россия. Email: dmitriy.kuvshinov@npo-at.com. ORCID 0009-0007-2313-2400.

Ефимов Сергей Владимирович — магистрант, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия. ORCID 0009-0004-7169-5898

Alexander E. Gulín – PhD (Eng.), Senior Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: walter_chel@mail.ru. ORCID 0000-0002-7722-4112.

Sergey A. Linkov – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: xx_linkov@rambler.ru. ORCID 0000-0002-0774-3910

Andrey N. Shemetov – PhD (Eng.), Lead Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: shemetow-a-n@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7184-2190

Dmitriy A. Kuvshinov – Engineer, Head of Department, JSC SPA Android Technics, Magnitogorsk, Russia. Email: dmitriy.kuvshinov@npo-at.com. ORCID 0009-0007-2313-2400.

Sergey V. Efimov – Master’s Student, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia. ORCID 0009-0004-7169-5898

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 549:54.055
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-110-118



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОГО И ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА АА7075

Панченко И.А., Дробышев В.К., Лабунский Д.Н., Коновалов С.В.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Алюминиевые сплавы марки 7075 обладают высоким отношением прочности к массе, однако традиционные методы производства этих сплавов сопряжены с риском образования дефектов (микропоры, трещины) и неоднородности свойств материала, затрудняющих его внедрение в существующие технологические циклы металлургического производства. **Цель работы.** Установление влияния режимов ионно-плазменного воздействия на механические свойства (микротвердость) на поверхности образцов сплава АА7075. Основной целью работы является исследование влияния оптимальных параметров электронно-пучкового и ионно-плазменного воздействия на прочностные характеристики алюминиевого сплава 7075. **Используемые методы.** В качестве оборудования представлены современные объекты исследовательской инфраструктуры с использованием одноименного источника электронов в среде аргона. Для механических испытаний использовались установки на усталостную долговечность, одноосное растяжение, а также установка для измерения микротвердости. С помощью микротвердомера по Микро-Виккерсу ГОСТ 9450-76 проведены исследования распределения микротвердости для поиска оптимальных режимов азотирования 9-ти тестовых образцов сплава АА7075. **Новизна.** Получение новых результатов об эволюции механических свойств материалов, изготовленных проволоочно-дугowymi аддитивными технологиями при энергетическом воздействии на их поверхность. **Результат.** Были определены значения микротвердости, прочностные свойства, на основе которых сделаны выводы об оптимальных режимах проведения азотирования, влияние электронно-пучковой, комбинированной обработки на прочность, усталостную долговечность сплава АА7075. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы для подбора оптимальных температурных и временных режимов проведения азотирования состава, а также для разработки новых материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы 7075, предел прочности, усталость, микротвердость, азотирование, электронно-пучковая обработка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10245, <https://rscf.ru/project/22-79-10245/>.

© Панченко И.А., Дробышев В.К., Лабунский Д.Н., Коновалов С.В., 2025

Для цитирования

Исследование влияния электронно-пучкового и ионно-плазменного воздействия на прочностные характеристики сплава АА7075 / Панченко И.А., Дробышев В.К., Лабунский Д.Н., Коновалов С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 110-118. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-110-118>



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

STUDYING THE EFFECT OF ELECTRON BEAM AND ION PLASMA TREATMENT ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF AA7075 ALLOY

Panchenko I.A., Drobyshev V.K., Labunskiy D.N., Konovalov S.V.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Aluminum alloys of the 7075 grade have a high strength-to-weight ratio, however, traditional methods of production of these alloys are associated with the risk of defects (micropores, cracks) and heterogeneity of the material properties, which complicate its implementation in the existing technological cycles of metallurgical production. **Objectives.** The research is aimed at determining the influence of ion-plasma action modes on the mechanical properties (microhardness) on the surface of AA7075 alloy samples. The main objective of the work is to study the influence of optimal parameters of electron-beam and ion-plasma action on the strength characteristics of 7075 aluminum alloy. **Methods Applied.** Modern research infrastructure facilities are presented as equipment, using the similar electron source in an argon environment. Fatigue life, uniaxial tension, special purity units were used for mechanical tests. Using a Vickers microhardness tester (State standard GOST 9450-76), the microhardness distribution was studied to find the optimal nitriding modes for 9 test samples of AA7075 alloy. **Originality.** It lies in obtaining new results on the evolution of mechanical properties of materials manufactured by wire-arc additive technologies under energy impact on their surface. **Result.** The microhardness values and strength properties were determined, on the basis of which conclusions were made on the optimal nitriding modes, the effect of electron-beam and combined treatment on the strength and fatigue life of AA7075 alloy. **Practical Relevance.** The research results can be used to select the optimal temperature and time modes for the composition nitriding, as well as to develop new materials with improved performance characteristics.

Keywords: aluminum alloys 7075, tensile strength, fatigue, microhardness, nitriding, electron beam treatment

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-79-10245, <https://rscf.ru/project/22-79-10245/>.

For citation

Panchenko I.A., Drobyshev V.K., Labunskiy D.N., Konovalov S.V. Studying the Effect of Electron Beam and Ion Plasma Treatment on the Strength Characteristics of AA7075 Alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 110-118. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-110-118>

Введение

Алюминиевые сплавы марки 7075 обладают высоким отношением прочности к массе и используются для изготовления несущих конструкций самолётов (лонжероны, панели фюзеляжа и крыла) [1], а также ответственных деталей в автомобильной промышленности, где требуется сочетание малой плотности с высокой прочностью [2]. Основные легирующие элементы (цинк, магний, медь) обеспечивают превосходные механические свойства, однако традиционные методы производства этих сплавов, такие как литье или сварка, сопряжены с риском дефектов (микропоры, трещины). Современные требования к сложным геометриям, локализованному производству и улучшенным эксплуатационным характеристикам стимулируют развитие технологий аддитивного производства (АП) [3] и инновационных методов комплексной модификации поверхности, таких как электронно-пучковая обработка (ЭПО) [4] и азотирование [5].

Проволочно-дуговое аддитивное производство (WAAM) обеспечивает высокую скорость осаждения

и заданные размеры изделий, позволяя решить такие проблемы, как пористость и образование трещин при затвердевании, путем оптимизации технологического процесса [6-8]. Несмотря на выдающиеся механические характеристики в объёме, термическая обработка (Т6/Т651) не позволяет достичь необходимого уровня твёрдости и износостойкости поверхности, что ограничивает применение AA7075 в условиях интенсивного трения и абразивного износа [9, 10]. Современные исследования активно изучают возможность нитрирования алюминиевых сплавов как способа поверхностного упрочнения и модификации [11]. В процессе азотирования на поверхности образуются соединения Al-N (нитрид алюминия), которые обладают высокой твёрдостью и стойкостью к износу [12]. В сплаве AA7075 плазменное азотирование формирует тонкий (порядка 5–10 мкм) «белый слой» с последующим увеличением твердости с ~76 до ~118 Vickers и толщиной нитридного слоя около 6 мкм [13]. Аналогично в работе [14] сообщили, что плазменное азотирование улучшает износостойкость и усталостную выносливость сплава AA7075, а также

заметно снижает скорость электрохимической коррозии по сравнению с необработанным материалом [15].

Азотирование алюминиевых сплавов также может привести к ряду негативных последствий. Эти неблагоприятные воздействия в первую очередь связаны с изменениями микроструктуры и механических свойств, которые могут ухудшить общие характеристики сплава. В результате азотирования может образоваться толстая оксидная пленка, которая может повлиять на свойства поверхности сплава и привести к повышению шероховатости поверхности и потенциальной концентрации напряжений [16]. Механические характеристики азотированных алюминиевых сплавов могут ухудшаться из-за пористости и дефектов, образующихся в процессе азотирования [17]. Хотя азотирование обычно повышает коррозионную стойкость, оно также может привести к локальным проблемам коррозии, особенно в солевых средах, где азотированный слой может не обеспечивать равномерной защиты [18].

Для минимизации дефектов, связанных с образованием пор в поверхностном слое при использовании данной методики, необходима постобработка. Одним из эффективных решений для снятия концентрации напряжений является модификация структуры материала посредством электронно-пучкового воздействия, которое позволяет повысить плотность и однородность поверхностных слоёв [19]. Несмотря на эффективность, оба метода требуют оптимизации режимов обработки, чтобы минимизировать потерю легирующих элементов (Mg, Zn) и сохранить прочностное состояние сплава AA7075, что является актуальной задачей современной поверхностной инженерии алюминиевых сплавов.

Материалы и методы исследования

В качестве материала исследований использован алюминиевый сплав марки 7075. Образцы из AA7075 изготавливали с использованием 3D-принтера Anycubic Chiron, работающего по технологии моделирования методом послойного наплавления (FDM). В табл. 1 представлен химический состав наплавочной алюминиевой проволоки и полученного наплавленного слоя AA7075.

Образцы на растяжение имели форму пропорциональных лопаток и следующие размеры: толщина 3 мм; ширина 14 мм; рабочая длина 25 мм. Образцы для исследований усталостной долговечности имели форму параллелепипеда размерами 12×4×130 мм с двумя концентраторами напряжений в виде полукруга радиусом 20 мм. Для качественной оценки усталостных характеристик образцов, изготовленных по ГОСТ 25.502-79, их подвергали механической шли-

фовке наждачной бумагой с уменьшением дисперсности абразивных частиц, поскольку качество подготовки поверхности изделий влияет на показатели сопротивления усталости.

Таблица 1. Химический состав алюминиевой проволоки и наплавленного слоя, вес. %
Table 1. Chemical composition of aluminum wire and deposited layer, wt. %

Материал исследования	Al	Si	Fe	Mn	Cu	Mg	Cr	Zn	Ti
Проволока AA7075	Остальное	0,4	0,1	0,3	1,6	2,51	0,18	6,02	0,02
Наплавленный слой	Остальное	0,1	0,1	0,6	0,8	2,8	0,2	4,1	0,1

Электронно-пучковая обработка (ЭПО) образцов сплава AA7075 осуществлялась на установке «СОЛО» ИСЭ СО РАН, входящей в перечень объектов современной исследовательской инфраструктуры Российской Федерации, с использованием одноименного источника электронов в среде аргона особой чистоты (99,999%) при давлении 31 мПа.

Модифицирование поверхности методом азотирования осуществлялось в дуговом разряде при помощи плазменного источника с накалимым катодом при температуре 600°C в течение 1, 3, 5 ч (рис. 1) в газовой смеси 50% аргона и 50% азота.

Замеры микротвердости исследуемых образцов проводились с использованием микротвердомера HVS-1000 по Микро-Виккерсу ГОСТ 9450-76 путём вдавливания алмазной пирамидки. Испытательная нагрузка – 20 г, длительность нагрузки – 10 с.

Механические испытания алюминиевого сплава марки 7075, поверхностно модифицированного электронным пучком, осуществляли путем одноосного растяжения образцов на испытательной машине «SUBRAMAX PMBC-50» с постоянной скоростью 0,5 мм/мин.

Исследования на усталостную долговечность выполнялись на специализированном оборудовании, работающем по схеме асимметричного консольного изгиба. В ходе экспериментов регистрировалось количество циклов, предшествующих разрушению материала. Все испытания осуществлялись при комнатной температуре (~293 К), а частота нагружений образцов изгибом составляла 2,3 Гц. Для достижения минимального порога в 10^5 циклов до появления трещин экспериментально подбирались пиковые значения напряжения и амплитуды циклических воздействий.



Рис. 1. Фотография внешнего вида образцов после электронно-пучкового и ионно-плазменного воздействия при температуре 600°C и времени азотирования 1, 3 и 5 ч:
а, б, в – образцы для испытаний на усталость (1-я партия); г, д, е – образцы для механических испытаний (2-я партия)

Fig. 1. An image of the samples after electron beam treatment and ion plasma exposure at a temperature of 600°C and a nitriding time of 1, 3 and 5 hours: а, б, в are fatigue test samples (1st batch); г, д, е are samples for mechanical tests (2nd batch)

Полученные результаты и их обсуждение

Для поиска оптимальных режимов азотирования 9 тестовых образцов сплава АА7075 без концентраторов напряжений с размерами 15×15×5 мм³ были подвергнуты ионно-плазменной обработке (азотированию). Обработка производилась методом ионно-пучкового азотирования с помощью уникальной системы для бессточного формирования низкоэнергетического ионного пучка. Принцип работы системы заключается в том, что в ней инициируется разряд с внешней инжекцией электронов, плазма которого является источником ионов для пучка, инжектируемого в рабочую вакуумную камеру, заполненную плазмой генератора «ПИНК», где располагаются обрабатываемые образцы. Такой принцип работы обеспечивает компенсацию заряда ионов на обрабатываемой поверхности и, соответственно, позволяет облучать образцы, в том числе диэлектрические либо с диэлектрическим покрытием, находящиеся под «плавающим» потенциалом без риска образования на их поверхности микродуг.

В табл. 2 представлены результаты измерения микротвердости (при нагрузке на индентор 20 г) на

поверхности образцов сплава АА7075 без концентраторов напряжений с размерами 15×15×5 мм³, подвергнутых азотированию при следующих параметрах: температура 450, 520, 600°C; времени азотирования – 1, 3, 5 ч.

Таблица 2. Результаты измерения микротвердости на поверхности образцов сплава АА7075
Table 2. Results of measuring microhardness on the surface of samples of АА7075 alloy

Режим азотирования, температура, °С, и длительность, ч	Микротвердость, ГПа
450_1	0,59
450_3	0,69
450_5	0,59
520_1	0,60
520_3	0,58
520_5	0,57
600_1	0,62
600_3	1,0
600_5	0,53
Исходное состояние	0,96

Изменение микротвердости алюминиевого сплава 7075 после азотирования обусловлено сложным взаимодействием процессов упрочнения за счёт образования нитридов и разупрочнения из-за структурных изменений в сплаве. При азотировании на поверхности формируются нитриды алюминия (AlN) и, возможно, других элементов сплава (Zn, Mg, Cu). Эти соединения повышают твёрдость, особенно при оптимальных режимах (600°C, 3 ч), где достигается максимальное значение 1,0 ГПа. 450°C является умеренной температурой проведения азотирования, замедляющей диффузию азота. Снижение микротвердости в образцах, обработанных в течение 5 ч, может быть вызвано началом роста зёрен или неоднородностью слоя. При температуре азотирования 520°C возникает постепенное снижение твёрдости с увеличением времени от 0,60 до 0,57 ГПа, что указывает на возможное растворение фаз или перестаривание сплава, что снижает его базовую твёрдость. Температура обработки 600°C являлась наиболее оптимальной, судя по микротвердости образцов, подверженных азотированию в течение 3 ч (1,0 ГПа), что объясняется интенсивным образованием нитридов. Однако при времени выдержки азотирования до 5 ч наблюдалось резкое падение микротвердо-

сти до 0,53 ГПа, что связано с деградацией структуры: ростом зёрен или растрескиванием нитридного слоя или перестариванием сплава.

В исходном состоянии (без обработки) предел прочности составил всего ~100,9 МПа (рис. 2), а усталостная выносливость – ~234 748 циклов. Причинами стали высокая пористость и наличие внутренних дефектов, которые служат концентраторами напряжений, ускоряющими зарождение трещин. После ЭПО предел прочности вырос на 97,5% (до 199,3 МПа), а усталостная выносливость увеличилась на 11% (~260 890 циклов). Это связано с локальным переплавлением поверхностного слоя, устранением микропор и релаксацией остаточных напряжений.

Комбинированная обработка (КО), включающая в себя ЭПО и ионно-плазменное воздействие в течение 1 ч, привела к ухудшению свойств: предел прочности упал до 69 МПа (-65% от ЭПО), а усталостная выносливость – до ~141 668 циклов (-45%). Короткое время обработки вызвало перегрев материала, нестабильное окисление поверхности (рис. 3) и образование микротрещин (рис. 3, а). Эти дефекты превратили поверхность в хрупкую зону, ускоряющую разрушение.

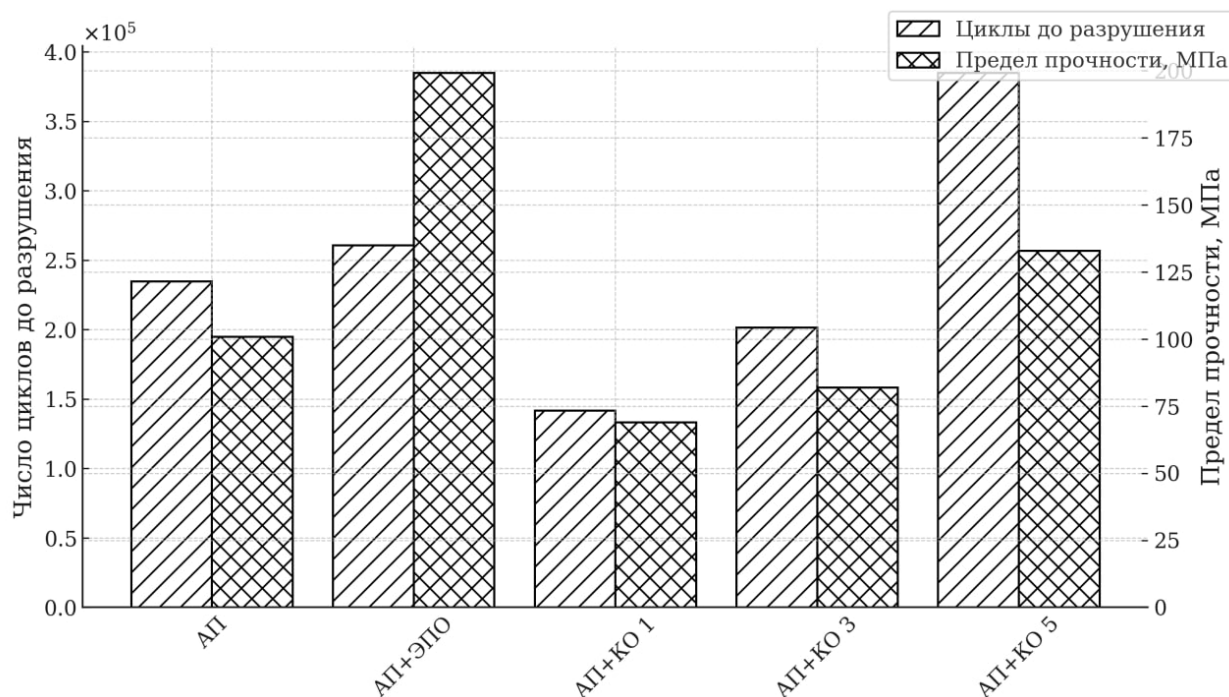


Рис. 2. Количество циклов до усталостного разрушения и предел прочности алюминиевого сплава 7075, изготовленного аддитивным производством, облученного электронно-пучковой обработкой, комбинированной обработкой на протяжении 1, 3, 5 ч

Fig. 2. Number of cycles to fatigue failure and ultimate strength of 7075 aluminum alloy produced by additive manufacturing, irradiated by electron beam treatment, combined processing for 1, 3, 5 hours

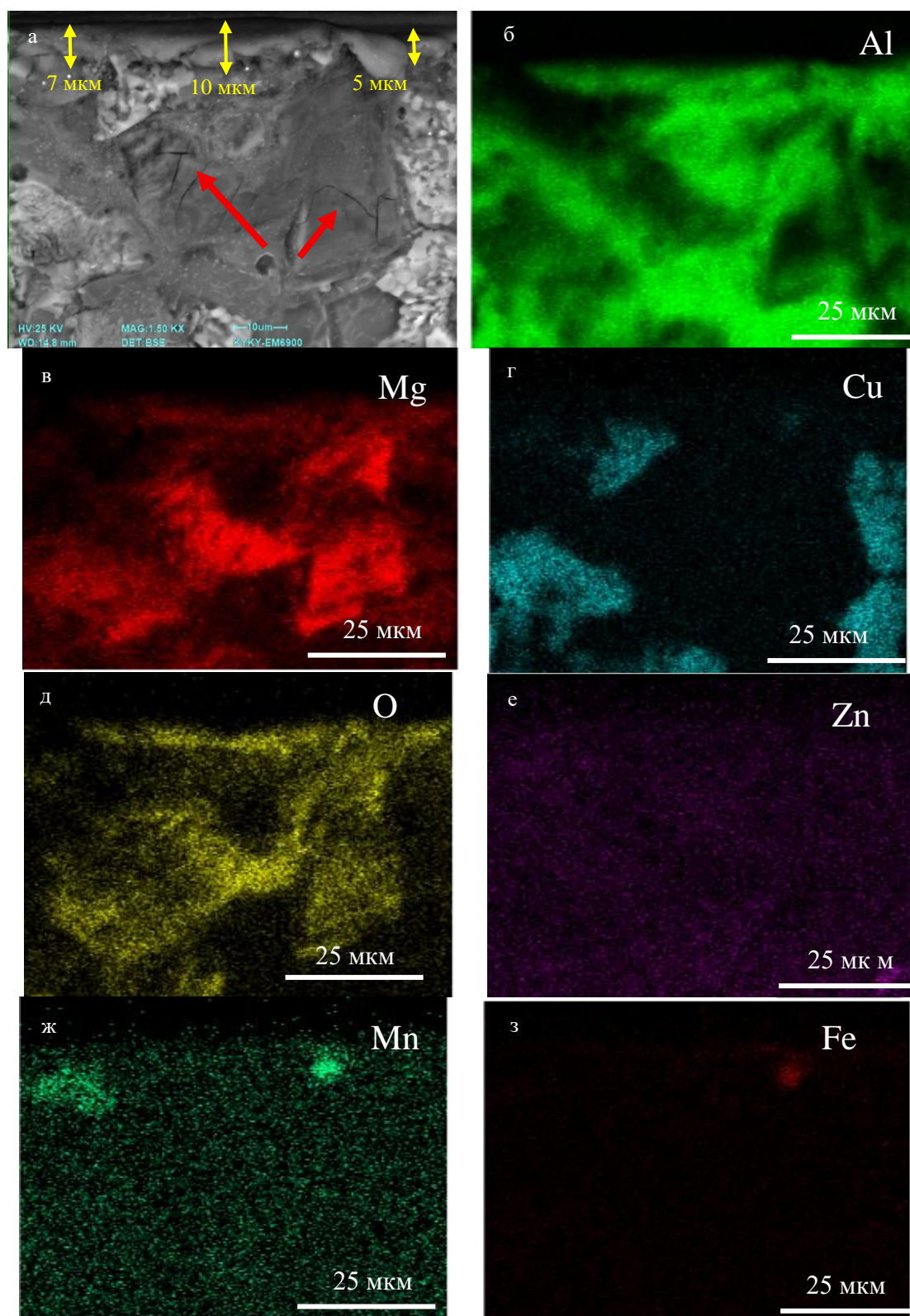


Рис. 3. Распределение химических элементов сплава AA7075 после комбинированной обработки на протяжении 5 ч, где красными стрелками указаны микротрещины: а – электронно-микроскопическое изображение зоны излома; б – Al; в – Mg; г – Cu; д – O; е – Zn; ж – Mn; з – Fe

Fig. 3. Distribution of chemical elements of the AA7075 alloy after combined processing for 5 hours, where red arrows indicate microcracks: а is an electron microscopic image of the fracture zone, б is Al, в is Mg, г is Cu, д is O, е is Zn, ж is Mn, з is Fe

Увеличение времени ионно-плазменной обработки до 3 ч (ЭПО + КО 3 ч) частично компенсировало негативные эффекты: прочность выросла до 82 МПа (+19%), а усталостная выносливость — до ~201 717 циклов (+42%). Более длительное воздействие позволило стабилизировать структуру, снизить концентрацию дефектов и сформировать упрочнённый слой. Однако свойства оставались ниже, чем после ЭПО, из-за недостаточной глубины модифицированной поверхности. После 5-часовой ионно-плазменной обработки (ЭПО + КО 5 ч) предел прочности достиг 133 МПа (+62% от КО 1 ч), а усталостная выносливость ~384 941 циклов (+172%), превысив даже показатели после ЭПО. Тем самым комбинированная обработка, включающая ЭПО (устранение внутренних дефектов) и азотирование (оптимизация поверхностных свойств), позволила преодолеть ограничения аддитивного производства.

Заключение

Микротвердость и прочность коррелируют с плотностью материала: электронно-пучковая обработка и длительная комбинированная обработка уменьшают пористость, повышая оба параметра. Малая продолжительность электронно-пучковой и ионно-плазменной обработки ухудшает микротвердость из-за термических дефектов. Усталостная выносливость зависит от поверхностных свойств: внутренние напряжения (после КО 5 ч) и отсутствие дефектов увеличивают сопротивление зарождению трещин. Хрупкие оксиды (после КО 1 ч) ускоряют разрушение.

Оптимальными параметрами обработки являются ЭПО + КО 5 ч, где сочетается устранение внутренних дефектов после ЭПО и улучшение поверхностных свойств после ионно-плазменной обработки. Таким образом, комбинированная постобработка аддитивно полученного сплава 7075 позволяет не только компенсировать технологические недостатки изготовления сплавов, но и целенаправленно модифицировать структуру материала для достижения требуемых механических свойств.

Список источников

1. Khalid M.Y., Umer R., Khan K.A. Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications // *Results in Engineering*. 2023, vol. 20.
2. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry / Li S.S., Yue X., Li Q., Peng H.-L. // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023, vol. 27, pp. 944–983.
3. A Review of Wire Arc Additive Manufacturing of High Strength 7xxx Series Aluminium Alloys / Ekpemogu A.I., Abioye T.E., Cunningham C., Obolo R., Seman A.A., Ogedengbe // *Advances in Science and Technology*. 2024. T. I.
4. Electron-Ion-Plasma Equipment for Modification of the Surface of Materials and Products / Koval N. et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2023, vol. 87, no. S2, pp. S294–S300.
5. Effect of Nitriding on the Microstructure and Mechanical Properties of AA7075 Alloy / Panchenko I.A., Konovalov S.V., Drobyshev V.K. et al. // *Russ. J. Non-ferrous Metals*. 2024. 65, 162–169. <https://doi.org/10.1134/S1067821225600048>
6. Microstructural evolution and the effect of electron beam melting on the fatigue characteristics of 7075 Al alloy deposited by MIG arc additively manufacturing / Panchenko I.A., Gudala S., Labunskii D., Konovalov S. // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2024, vol. 19, no. 1, pp. 301–310.
7. Исследование структуры и свойств алюминиевого сплава 7075, полученного проволоочно-дуговым аддитивным способом / Д.Н. Лабунский, И.А. Панченко, С.В. Коновалов [и др.] // *Ползуновский вестник*. 2023. № 2. С. 147–154.
8. Panchenko I.A., Drobyshev V.K., Bazhenova M.M. Layered instrumental indentation of alloy AA7075 obtained by the method of additive technologies // *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*. 2025. 22(1), 67–76 (In Russ.). DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.006
9. Domack M.J., Shapiro A.A., Messimer S.L. Effect of RRA thermal treatment and plasma processing on 7075-T6 alloy // *Surf. Coat. Technol.* 2019. T. 357. С. 123–131.
10. Laser powder bed fusion of AA7075 alloy: Influence of process parameters on porosity and hot cracking / Stopyra W., Gruber K., Smolina I., Kuźnicka B. // *Additive Manufacturing*. 2020. vol. 35, art. 101345.
11. Plasma nitriding of aluminium in a pulsed dc glow discharge of nitrogen / S. Naseer, F.U. Khan, N.U. Rehman, A. Qayyum, F. Rahman, M. Zakauallah // *EPJ Appl. Phys.* 2010, vol. 49, no. 2, pp. 21001.
12. Meneses, W., Tuominen, J., Ylä-Autio, A., Wiikinkoski, O., Sabr, A., & Peura, P. Coaxial Wire Laser-based Additive Manufacturing of AA7075 with TiC Nanoparticles. 2023. 1296, 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1296/1/012033>
13. Study of Microstructural and Corrosion Properties of Aluminium Alloy 7075 after Plasma Nitriding / Ahmadi, Hae-rul & Aziz, Rizky & Suprpto, Suprpto & Sujitno, Tjipto & Hapsari, Sophie // *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2020. 21. 1. 10.17146/jsmi.2019.21.1.5649.
14. Corrosion and tribocorrosion behavior of plasma nitrided AA7075 - T651 / Rocha, Leticia & Camarinha, Gabriela & Martins, Gislene & Çaha, Ihsan & Alves, Alexandra & Takahashi, Renata & Toptan, Fatih & Reis // *Danieli Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2023. 20. e2866. 10.4322/2176-1523.20232866.
15. Shahnawaz, M., Bashir, S., Shafique, M. A., & Hussain, T. Study the effects of nitrogen ion implantation on structural and mechanical properties of AA7075. 2018. 5(7), 076507. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/AACEB6>
16. In situ and ex situ examination of plasma-assisted nitriding of aluminium alloys / Quast, M., Mayr, P., Stock, H.-R., Podlesak, H., & Wielage, B. // *Surface & Coatings Technology*. 2001. 135(2), 238–249. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00992-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00992-0)
17. Shin, D.-H., & Kim, S.-J. Effects of Hard Anodizing and Plasma Ion-Nitriding on Al Alloy for Hydrogen

- Embrittlement Portection. 2023. <https://doi.org/10.14773/cst.2023.22.4.221>
18. Study of the influence of the RRA thermal treatment and plasma nitriding on corrosion behavior of 7075-T6 aluminum alloy / Savonov, G. da S., Camarinha, M. G. G., Rocha, L. O., Barboza, M. J. R., Martins, G. V., & Reis, D. A. P. // *Surface & Coatings Technology*. 2019. 374, 736–744. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2019.04.095>
 19. Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering / Devyatkov, V. & Ivanov, Yu & Krysinina, Olga & Koval, Nikolay & Petrikova, Elizaveta & Shugurov, Vladimir // *Vacuum*. 2017. 143. 10.1016/j.vacuum.2017.04.016.
- ### References
1. Khalid M.Y., Umer R., Khan K.A. Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications. *Results in Engineering*. 2023;20.
 2. Li S.S., Yue X., Li Q., Peng H.-L. Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;27:944-983.
 3. Ekpemogu A.I., Abioye T.E., Cunningham C., Obolo R., Seman A.A., Ogedengbe T.I. A Review of Wire Arc Additive Manufacturing of High Strength 7xxx Series Aluminium Alloys. *Advances in Science and Technology*. 2024;1.
 4. Koval N. et al. Electron-Ion-Plasma Equipment for Modification of the Surface of Materials and Products. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2023;87(S2):S294-S300.
 5. Panchenko I.A., Konovalov S.V., Drobyshev V.K. et al. Effect of Nitriding on the Microstructure and Mechanical Properties of AA7075 Alloy. *Russ. J. Non-ferrous Metals*. 2024;65:162-169. <https://doi.org/10.1134/S1067821225600048>
 6. Panchenko I.A., Gudala S., Labunskii D., Konovalov S. Microstructural evolution and the effect of electron beam melting on the fatigue characteristics of 7075 Al alloy deposited by MIG arc additively manufacturing. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2024;19(1):301-310.
 7. Labunsky D.N., Panchenko I.A., Konovalov S.V. et al. Study of the structure and properties of aluminum alloy 7075 obtained by wire-arc additive method. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovskiy vestnik]. 2023;(2):147-154. (In Russ.)
 8. Panchenko I.A., Drobyshev V.K., Bazhenova M.M. Layered instrumental indentation of alloy AA7075 obtained by the method of additive technologies. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya* [Basic Problems of Material Science (BPMS)]. 2025;22(1):67-76 (In Russ.). doi:10.25712/ASTU.1811-1416.2025.01.006
 9. Domack M.J., Shapiro A.A., Messimer S.L. Effect of RRA thermal treatment and plasma processing on 7075-T6 alloy. *Surf. Coat. Technol.* 2019;357:123-131
 10. Stopyra W., Gruber K., Smolina I., Kuźnicka B. Laser powder bed fusion of AA7075 alloy: Influence of process parameters on porosity and hot cracking. *Additive Manufacturing*. 2020;35:101345.
 11. Naseer S., Khan F.U., Rehman N.U., Qayyum A., Rahman F., Zakaullah M. Plasma nitriding of aluminium in a pulsed dc glow discharge of nitrogen. *EPJ Appl. Phys.* 2010;49(2):21001.
 12. Meneses W., Tuominen J., Ylä-Autio A., Wiikinkoski O., Sabr A., Peura P. Coaxial Wire Laser-based Additive Manufacturing of AA7075 with TiC Nanoparticles. 2023;1296:012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1296/1/012033>
 13. Ahmadi Haerul, Aziz Rizky, Suprpto, Sujitno Tjipto, Hapsari Sophie. Study of Microstructural and Corrosion Properties of Aluminium Alloy 7075 after Plasma Nitriding. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2020;21:1. 10.17146/jsmi.2019.21.1.5649.
 14. Rocha Letícia, Camarinha Gabriela, Martins Gislene, Çaha Ihsan, Alves Alexandra, Takahashi Renata, Toptan, Fatih Reis Danieli. Corrosion and tribocorrosion behavior of plasma nitrided AA7075 - T651. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 2023;20:e2866. 10.4322/2176-1523.20232866.
 15. Shahnawaz M., Bashir S., Shafique M. A., Hussain T. Study the effects of nitrogen ion implantation on structural and mechanical properties of AA7075. 2018;5(7):076507. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/AACEB6>
 16. Quast M., Mayr P., Stock H.-R., Podlesak H., Wielage B. In situ and ex situ examination of plasma-assisted nitriding of aluminium alloys. *Surface & Coatings Technology*. 2001;135(2):238-249. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00992-0](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00992-0)
 17. Shin D.-H., Kim S.-J. Effects of Hard Anodizing and Plasma Ion-Nitriding on Al Alloy for Hydrogen Embrittlement Portection. 2023. <https://doi.org/10.14773/cst.2023.22.4.221>
 18. Savonov G.da S., Camarinha M.G.G., Rocha L.O., Barboza M.J.R., Martins G.V., Reis D.A.P. Study of the influence of the RRA thermal treatment and plasma nitriding on corrosion behavior of 7075-T6 aluminum alloy. *Surface & Coatings Technology*. 2019;374:736-744. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2019.04.095>
 19. Devyatkov V., Ivanov Yu., Krysinina Olga, Koval Nikolay, Petrikova Elizaveta, Shugurov Vladimir. Equipment and processes of vacuum electron-ion plasma surface engineering. *Vacuum*. 2017;143. 10.1016/j.vacuum.2017.04.016.

Поступила 08.05.2025; принята к публикации 27.05.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 08/05/2025; revised 27/05/2025; published 25/12/2025

Панченко Ирина Алексеевна – кандидат технических наук, заведующий научной лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: i.g.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Дробышев Владислав Константинович – научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: drobyshev_v.k@mail.ru. ORCID 0000-0002-1532-9226

Лабунский Дмитрий Николаевич – аспирант,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: dabess@yandex.ru

Коновалов Сергей Валерьевич – доктор технических наук, профессор,
проректор по научной и инновационной деятельности,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: konovalov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Irina A. Panchenko – PhD (Eng.), Head of the Scientific Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: i.r.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Vladislav K. Drobyshev – Researcher at the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: drobyshev_v.k@mail.ru. ORCID 0000-0002-1532-9226

Dmitry N. Labunskiy – Postgraduate Student,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: dabess@yandex.ru.

Sergey V. Konovalov – DrSc (Eng.), Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: konovalov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
 УДК 661.728.7
 DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-119-128



ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ МИКРО- И НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ ИЗ МЕДНО-АММИАЧНОГО РАСТВОРА

Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г., Романов Н.К.

Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Высокодисперсная микро- и наноцеллюлоза представляет собой современный экологичный материал, обладающий рядом ценных свойств, определяющих высокий интерес для различных сфер промышленного производства. Среди них можно выделить полимерные композиты, системы очистки воды, тканевую инженерию и др. При этом необходимо отметить, что основной проблемой её широкомасштабного внедрения является высокая стоимость, обусловленная сложностью современных способов изготовления. **Цель работы.** Разработка эффективного метода получения высокодисперсной целлюлозы, доступного для реализации в современных лабораторных и промышленных условиях, путём усовершенствования подходов к химической переработке целлюлозосодержащего сырья. **Используемые методы.** Для достижения поставленной цели использованы методы спектроскопии динамического светорассеяния (DLS), ИК-Фурье-спектроскопии и другие общелабораторные способы исследования. **Новизна.** Новизна представленного подхода обусловлена возможностью гомогенизации целлюлозы в форме растворённого вещества, ведущей к частичному устранению кинетических затруднений, вызванных гетерофазным характером протекания реакции гидролиза в условиях обработки твёрдого сырья, вследствие осуществления реакции на границе раздела фаз системы жидкость–жидкость. **Результат.** Разработан эффективный метод получения высокодисперсной микро- и наноцеллюлозы путём её растворения и осаждения из медно-аммиачного раствора в кислой среде. В результате проведённых исследований предложен механизм протекающих взаимодействий, основанный на частичном гидролизе и сульфировании осаждённого продукта в тонких плёнках. Установлена референтная функциональность способа непосредственного осаждения от постепенного подкисления, верифицируемая интенсивным сульфированием целлюлозы серной кислотой при пониженном содержании её α -кристаллической модификации. Выявлено, что гидрозоль высокодисперсной целлюлозы характеризуется высоким коэффициентом деструкции $2,97$ при степени полимеризации $481,2 \pm 13,7$, при этом размер частиц составляет от 70 до 800 нм со среднечисловым диаметром 156 нм. Отмечена возможность выделения наименьшей размерной фракции со средним диаметром 105 нм в условиях применения метода низкоскоростного центрифугирования. **Практическая значимость.** Выражается в реализации нового подхода к получению высокодисперсной целлюлозы, способствующего формированию дополнительных представлений о механизме оптимизации условий применения и переработки исходного сырья для внедрения представленного продукта в область широкого промышленного производства.

Ключевые слова: целлюлоза, высокодисперсная целлюлоза, медно-аммиачный раствор, осаждение, степень полимеризации

© Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г., Романов Н.К., 2025

Для цитирования

Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г., Романов Н.К. Получение высокодисперсной микро- и наноцеллюлозы методом осаждения из медно-аммиачного раствора // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 119-128. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-119-128>



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

OBTAINING HIGHLY DISPERSED MICRO- AND NANOCELLULOSE FROM COPPER-AMMONIA SOLUTION BY PRECIPITATION

Lukuttsova N.P., Karpikov E.G., Romanov N.K.

Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Highly dispersed micro- and nanocellulose is a modern eco-friendly material with a number of valuable properties that determine high interest for various fields of industrial production. Among them we can distinguish polymer composites, water purification systems, tissue engineering, and others. It should be noted that the main problem of its large-scale implementation is the high cost due to the complexity of modern manufacturing methods. **Objectives.** The research is aimed at developing of an effective method for obtaining highly dispersed cellulose, available for implementation in modern laboratory and industrial conditions, by improving approaches to chemical processing of cellulose-containing raw materials. **Methods applied.** The authors used the methods of dynamic light scattering spectroscopy (DLS), IR-Fourier spectroscopy, and other general laboratory research methods. **Originality.** The originality of the presented approach is due to the possibility of homogenization of cellulose in the form of a dissolved substance, leading to the partial elimination of kinetic difficulties caused by the heterophase nature of the hydrolysis reaction under the conditions of processing solid raw materials, due to the reaction at the interface of the phases of the liquid – liquid system. **Result.** An effective method for obtaining highly dispersed micro- and nanocellulose by dissolving and precipitating it from a copper-ammonia solution in an acidic environment has been developed. As a result of the conducted research, a mechanism of ongoing interactions based on partial hydrolysis and sulfonation of the precipitated product in thin films is proposed. The reference functionality of the method of direct precipitation from gradual acidification has been established, verified by intensive sulfonation of cellulose with sulfuric acid with a reduced content of its α -crystalline modification. It was revealed that the hydrosol of highly dispersed cellulose is characterized by a high coefficient of destruction of 2.97 with a degree of polymerization of 481.2 ± 13.7 , while the particle size ranges from 70 to 800 nm with an average numerical diameter of 156 nm. It is noted that it is possible to isolate the smallest size fraction with an average diameter of 105 nm under the conditions of using the low-speed centrifugation method. **Practical Relevance.** It is expressed in the implementation of a new approach to the production of highly dispersed cellulose, which contributes to the formation of additional ideas about the mechanism for optimizing the conditions of use and processing of raw materials for the introduction of the presented product into large-scale industrial production.

Keywords: cellulose, highly dispersed cellulose, copper-ammonia solution, precipitation, degree of polymerization

For citation

Lukuttsova N.P., Karpikov E.G., Romanov N.K. Obtaining Highly Dispersed Micro- and Nanocellulose from Copper-Ammonia Solution by Precipitation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 119-128. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-119-128>

Введение

В рамках Распоряжения Правительства РФ №312-р от 11 февраля 2021 года «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» [1] в качестве проблемы, сдерживающей развитие лесного комплекса, отмечена недостаточная модернизация инфраструктуры рынка переработки продукции лесных ресурсов, что не позволяет создавать новые высокотехнологичные производства целлюлозосодержащей продукции, в том числе изделий на её основе, полученных из вторичного сырья [2]. Вместе с тем в настоящее время наблюдается рост объёмов производства и потребления целлюлозы как наиболее доступного и широко распространённого биополимера, которые оцениваются в 180 млн т в год [3], что, в свою очередь, приводит к накоплению и необходимости ликвидации её отхо-

дов. Наиболее рациональным способом утилизации, а также развития отмеченных высокотехнологичных производств является расширение подходов к рациональному природопользованию, в частности разработки методов переработки сырья путем получения высокодисперсной (ВДЦ) микроцеллюлозы (МКЦ) и наноцеллюлозы (НЦ) из сырья различной природы [4-8]. Наряду с этим в настоящее время отмечается ключевая роль наноцеллюлозы как инновационного высокотехнологичного бионаноматериала, обладающего широкими перспективами применения в различных отраслях исследовательской деятельности и наукоёмкой промышленности [9].

Известно, что благодаря своей малой плотности ($\approx 1,50 \text{ г/см}^3$) и высокой механической прочности [10], наноцеллюлоза может выступать в качестве эффективного армирующего компонента в составе био-разлагаемых полимерных композитов на основе

крахмала [11] и полилактида (PLA) [12], обеспечивающего повышение прочности и термической устойчивости модифицируемых материалов. Перспективы применения НЦ в промышленных водоочистных фильтрах обусловлены ее способностью к эффективному взаимодействию с ионами тяжёлых металлов, таких как Fe^{3+} , Cu^{2+} , Ag^+ [13], Cd^{2+} , Co^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} [14], а также возможностью модификации поверхности различными функциональными группами в целях повышения сорбционной ёмкости при различных pH [15–17]. Использование нанокристаллической [18] и нанофибриллированной [19] целлюлозы в качестве микродобавки к портландцементу ускоряет его гидратацию и снижает усадку бетона в конструкции, что обуславливает возможность введения ВДЦ в состав строительных материалов. Отсутствие токсичности, химическая инертность, высокая пластичность открывают перспективы функционализации гидро- и аэрогелей наноцеллюлозы и её производных в качестве опорных структур в тканевой инженерии [20, 21].

В настоящее время основным методом получения высокодисперсной целлюлозы является гидролиз твёрдого макроцеллюлозного сырья в серной кислоте (H_2SO_4) [22]. В качестве этапа его предварительной обработки, а также фактора, повышающего эффективность расщепления волокон при получении гидрозолей МКЦ и НЦ, может выступать ферментативная обработка [23–25], способствующая при более мягких условиях гидролиза получению продукта, характеризующегося большей дисперсностью и стабильностью физических свойств. Вместе с тем наиболее распространёнными радикальными окислителями, применяющимися при деструкции макромолекул целлюлозы, являются (2,2,6,6-тетраметилпиперидин-1-ил)оксил (ТЕМПО) [26, 27], а также реагент Фентона, обеспечивающий протекание процесса деструкции целлюлозы посредством окисления сырья пероксидом водорода (H_2O_2) в присутствии ионов железа (II) (Fe^{2+}) [28], и подобные ему окислительные системы, в том числе на основе ионов меди (II) (Cu^{2+}) [29].

Отдельно необходимо отметить роль предварительной механической обработки исходного сырья с точки зрения не только важного этапа подготовки диспергируемого материала [23], но и вполне самостоятельного метода получения микрофибриллированной целлюлозы с характерной толщиной волокон от 50 до 1000 нм [30, 31]. При этом в виде параметра физического воздействия может выступать высокоинтенсивная ультразвуковая обработка, применение которой позволяет контролировать гидрофильные [32] и оптические [33] свойства получаемого продукта. В настоящее время наиболее эффективными признаны комбинированные методы получения НЦ, сочетающие в себе как физическое воздействие, так и химическую обработку, что позволяет снизить степень полимеризации (СП) обработанной таким образом целлюлозы [34]. Кроме того, выделяется биотехнологический метод изготовления ВДЦ [35, 36], в результате применения которого образуется наноцел-

люлоза, обладающая высокой СП (от 2000 до 8000), а также повышенной кристаллическостью и гигроскопичностью [37].

Несмотря на существование разнообразных методов получения микро- и наноцеллюлозы с широким спектром инструментов переработки сырья, имеющиеся на сегодняшний день технологии производства требуют использования длительных трудоёмких операций, применения дорогостоящего оборудования или отличаются высокой стоимостью химических реагентов. Таким образом, в качестве основного ограничения применения НЦ в промышленности выступают высокие производственные затраты [38], что локализует возможности реализации уникальных свойств микро- и наноцеллюлозы областью научно-исследовательских задач.

Материалы и методы исследования

Предлагаемый метод получения ВДЦ основан на растворении исходного сырья в медно-аммиачном растворе ($[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{OH})_2$), последующем подкислении и гидролизе микро- и наночастиц с дальнейшей глубокой очисткой посредством центрифугирования и промывки образующегося золя.

Медно-аммиачный раствор (МАР) приготовлен посредством растворения избытка свежеполученного гидроксида меди (II) ($\text{Cu}(\text{OH})_2$) в водном растворе аммиака ($\text{NH}_{3\text{aq}}$), с массовой долей 25%, отстаиванием и отделением нерастворённого осадка. Содержание меди в растворе устанавливалось методом йодометрического титрования, а аммиака – ацидометрическим титрованием, при этом погрешность определения составила не более 1,0%. Изготовленный раствор является насыщенным относительно концентрации ионов меди (Cu^{2+}), что, согласно ранее проведённым исследованиям, благоприятно влияет на растворимость целлюлозы.

В целях изучения возможности получения ВДЦ на основе целлюлозы с различным химическим составом и физическими свойствами в работе в качестве модельных целлюлозосодержащих препаратов для физико-химической обработки использовались следующие виды сырья: «Бумага фильтровальная Ф» (БФ) для общелабораторных работ и фильтров «Белая лента» ГОСТ 12026 (г. Москва, Российская Федерация), характеризующаяся тонковолокнистой структурой и минимальным содержанием примесей лигнина и гемицеллюлоз [39], вата медицинская гигроскопическая хлопковая (ВМГХ) ГОСТ 5556 (г. Спас-Клепики, Клепиковский район, Рязанская область, Российская Федерация), представляющая, согласно литературным данным и нормативным документам, высокомолекулярную α -целлюлозу высокой чистоты [40], а также фабричная микрокристаллическая целлюлоза (МКЦ) «Анكير-Б» (г. Бийск, Алтайский край, Российская Федерация), обладающая, в соответствии с международными фармакопейными стандартами, низкой степенью полимеризации и повышенной кри-

сталличностью вследствие предварительной химической обработки [41].

Навеска массой $0,5 \pm 0,0002$ г растворялась в 50 см^3 свежеприготовленного МАР при перемешивании в течение 1 ч, после чего фильтровалась через медную сетку с диаметром пор 50 мкм для удаления нерастворённых макроскопических остатков.

Высокодисперсную целлюлозу получали методами подкисления и осаждения в следующем порядке. По окончании растворения МАР объёмом $40,0 \text{ см}^3$ разбавлялся дистиллированной водой объёмом 160 см^3 до достижения концентрации целлюлозы 2 г/дм^3 , затем медленно подкислялся $100,0 \text{ см}^3$ 20%-го раствора серной кислоты (H_2SO_4), взятого в стехиометрическом избытке порядка 25%, после чего перемешивался в течение 15 мин при комнатной температуре и нейтрализовался раствором аммиака для прекращения процесса гидролиза. Изготовленный таким образом продукт охарактеризован как высокодисперсная целлюлоза, полученная подкислением (подкисленная ВДЦ). Согласно другому способу, к 20%-му раствору серной кислоты того же объёма добавлялось $40,0 \text{ см}^3$ МАР целлюлозы при перемешивании. Все последующие операции осуществлялись аналогично вышеописанной последовательности. Образовавшийся продукт представляет собой высокодисперсную целлюлозу, полученную осаждением (осаждённая ВДЦ).

Очистка гидрозоля целлюлозы проводилась путём центрифугирования при частоте вращения 4000 об/мин с перегрузкой 1780 г в течение 5 мин с последующим отделением супернатанта и многократным промыванием дистиллированной водой до достижения рН, близкого к нейтральному.

Размерные параметры частиц коллоидного раствора целлюлозы устанавливались при помощи анализатора Zetasizer Ultra (Malvern Panalytical Ltd, Великобритания) на длине волны $632,8 \text{ нм}$. В работе произведён общий анализ, а также выполнена оценка наименьшей размерной фракции супернатанта, изготовленного центрифугированием золя при частоте вращения 1000 об/мин и перегрузке образца 110 г в течение 5 мин.

Инфракрасная спектроскопия тщательно высушенных при температуре 60°C и диспергированных при помощи измельчителя IKA UTTD basic IVD Solution («IKA-Werke GmbH & Co. KG», Германия) образцов осуществлялась посредством ИК-Фурье спектрометра «ФСМ-1201» (ООО «Инфраспек», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация) в диапазоне частот излучения $450\text{--}4200 \text{ см}^{-1}$ с разрешением 1 см^{-1} .

Степень полимеризации исходного целлюлозосодержащего сырья и полученных образцов ВДЦ определялась методом йодометрического титрования, при этом зафиксирована устойчивая сходимость результатов анализа и допустимое расхождение относительно вискозиметрического метода [42], нормируемого ГОСТ 9105.

Полученные результаты и их обсуждение

По результатам инфракрасной спектроскопии в спектрах ВДЦ подкисленной и осаждённой ВДЦ обнаружены интенсивные пики в области $800\text{--}1190$ и $870\text{--}1180 \text{ см}^{-1}$ соответственно, характерные для валентных колебаний С–О–С-связей [43]. Пики 3327 и 3274 см^{-1} указывают на присутствие О–Н-связей [44], уширенные пики 2790 и 2877 см^{-1} отнесены к С–Н-связям [45], а пики в области 1746 и 1748 см^{-1} – к колебаниям С=О-связей [46] (рис 1).

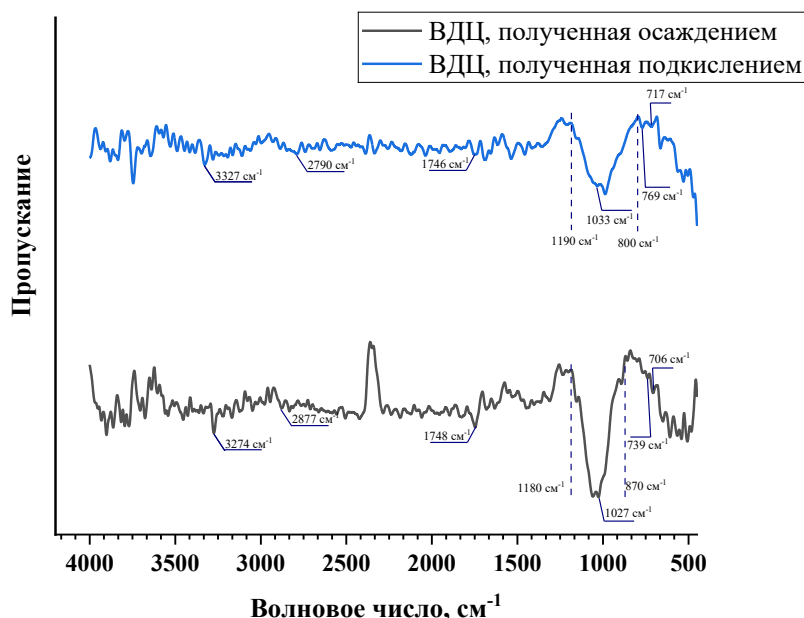


Рис. 1. ИК-спектр ВДЦ, полученной методами подкисления и осаждения

Fig. 1. IR spectra of HDC obtained by acidification and precipitation

Также в исследуемых ИК-спектрах зафиксированы низкоинтенсивные пики 1033 и 1027 см⁻¹, характерные для валентных колебаний сульфатных групп (–SO₃) [47]. При этом пики, нормализованные по интегральной интенсивности для I_α-кристаллической модификации целлюлозы 717 и 706 см⁻¹ и I_β-модификации 769 и 739 см⁻¹ [48-50], рассчитаны в соответствии со следующей зависимостью:

$$\omega_{\alpha} = \frac{S_{750}}{S_{750} + 0,16 \cdot S_{710}}, \quad (1)$$

где ω_{α} – массовая доля α -целлюлозы; S_{750} – площадь пика 750 см⁻¹; S_{710} – площадь пика 710 см⁻¹.

Таким образом, установлено, что относительное содержание I_α-целлюлозы в образце подкисленной ВДЦ составляет 0,83 и 0,57 – в ВДЦ, полученной осаждением. При этом отношение интенсивностей пиков, характерных для сульфатных групп, имеет значение 1 : 4,38. При осаждении выявлено низкое содержание α -целлюлозы, обладающей большей степенью полимеризации и кристалличностью [51], что свидетельствует о более глубокой деградации сырья в ходе осаждения, в отличие от подкисления. Необходимо отметить, что пик поглощения SO₃-групп в ИК-спектре осаждённой ВДЦ является следствием интенсивного сульфирования целлюлозы, что, в свою очередь, указывает на факт наиболее эффективного её взаимодействия с кислотой.

Для описания эффективности процесса химической обработки целлюлозы методом осаждения введён термин «коэффициент деструкции» (K_D), выраженный отношением СП целлюлозы исходного сырья к СП обработанной целлюлозы:

$$K_D = \omega \cdot \frac{P_0}{P_1}, \quad (2)$$

где P_0 – СП целлюлозы в сырье; P_1 – СП целлюлозы в продукте переработки; ω – практический выход процесса переработки.

Результаты определения средней степени полимеризации в исходном сырье и образцах ВДЦ, а также показатели эффективности процесса химической обработки представлены в табл. 1.

Согласно полученным данным, установлено, что СП целлюлозы, осаждённой из медно-аммиачного раствора, зависит в наибольшей степени от СП рас-

творяемого в МАР целлюлозосодержащего сырья; при этом влияние химического состава и структуры сырьевой целлюлозы на свойства полученной ВДЦ незначительно, что обусловлено фактом потери кристаллической структуры целлюлозы при её растворении в МАР и приобретения аморфной формы в составе полиядерного комплексного соединения [52]. Благодаря исследованию целлюлозосодержащего сырья продемонстрирована возможность получения ВДЦ осаждением растворённой в МАР целлюлозы различной структуры и степени полимеризации, при этом предлагаемый метод осаждения ВДЦ из медно-аммиачного раствора в кислой среде показывает наибольшую эффективность гидролиза для наиболее высокомолекулярной целлюлозы, что связано со стерической доступностью аморфных областей в целлюлозе с высокой СП [53]; выраженного влияния содержания примесей на процесс гидролиза не обнаружено, что согласуется с литературными данными [54]. Наибольший выход продукта наблюдается при переработке БФ, характеризующейся наибольшей растворимостью в МАР благодаря тонковолокнистой структуре и наименьшему количеству примесей, препятствующих растворению [55, 56]. Сопоставление коэффициентов деструкции подтверждает наибольшую химическую эффективность метода осаждения по сравнению с методом подкисления.

На рис. 2 представлен образец гидрозоля ВДЦ с концентрацией целлюлозы 1%, полученный методом осаждения.

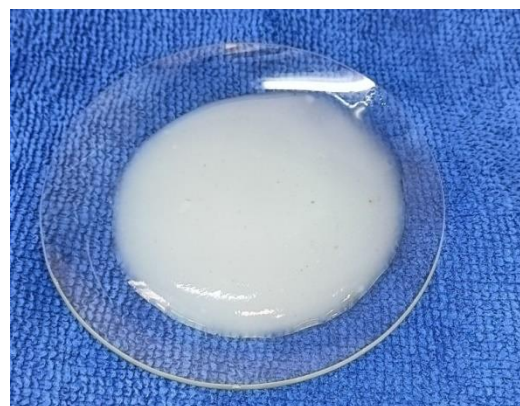


Рис. 2. Образец гидрозоля высокодисперсной целлюлозы

Fig. 2. Hydrogel sample of high-dispersity cellulose

Таблица 1. Результаты определения показателей эффективности процесса химической обработки целлюлозы, а также её средней степени полимеризации в исходном сырье и образцах ВДЦ
Table 1. Determination results of cellulose processing efficiency indicators and average DP of raw materials and HDC samples

Наименование сырья		СП сырья, P_0	СП ВДЦ, P_1	Практический выход процесса переработки ω , %	Коэффициент деструкции с учётом выхода
ВМГХ	Подкисление	1983,9±38,2	849,5±45,3	77	1,80
	Осаждение		481,2±13,7	72	2,97
БФ		771,3±24,1	391,0±12,2	89	1,76
МКЦ		417,4±11,6	361,0±13,5	72	0,83

Авторами предложен механизм осаждения целлюлозы из медно-аммиачного раствора (рис. 3), предполагающий формирование её микрочастиц в ходе взаимодействия малых объёмов вязкого МАР с подвижным раствором серной кислоты при интенсивном перемешивании с последующим частичным гидролизом и сульфированием ВДЦ в тонких плёнках. Возможность реализации метода переработки в относительно мягких условиях, а также уменьшения времени взаимодействия сырья с кислотой при высокой эффективности предложенного способа обусловлена гомогенизацией целлюлозы в форме растворённого вещества, ведущей к частичному устранению кинетических затруднений, вызванных гетерофазным характером протекания реакции гидролиза в условиях обработки твёрдого сырья, вследствие осуществления реакции на границе раздела фаз системы жидкость – жидкость.

Методом DLS-спектроскопии произведён анализ размерных параметров дисперсной системы гидрозоля ВДЦ, полученного осаждением из МАР, в результате чего обнаружены частицы с гидродинамическим (эквивалентным) диаметром от 107 до 767 нм, наибольшее содержание которых отмечается во фракциях 140-150 и 450-550 нм при среднемассовом диаметре 332 нм и среднечисловом 156 нм. Вместе с тем в образцах, подвергнутых низкоскоростному центрифугированию, выявлено смещение указанных размеров в область от 69 до 643 нм, наиболее характерное для крупных частиц, более 300 нм, при среднемассовом гидродинамическом диаметре 192 нм и среднечисловом 105 нм. Объёмная доля наночастиц с гидродинамическим диаметром, не превышающим 100 нм, составила 21%, а частичная доля – 54%. Гранулометрический состав зольей представлен на рис. 4.

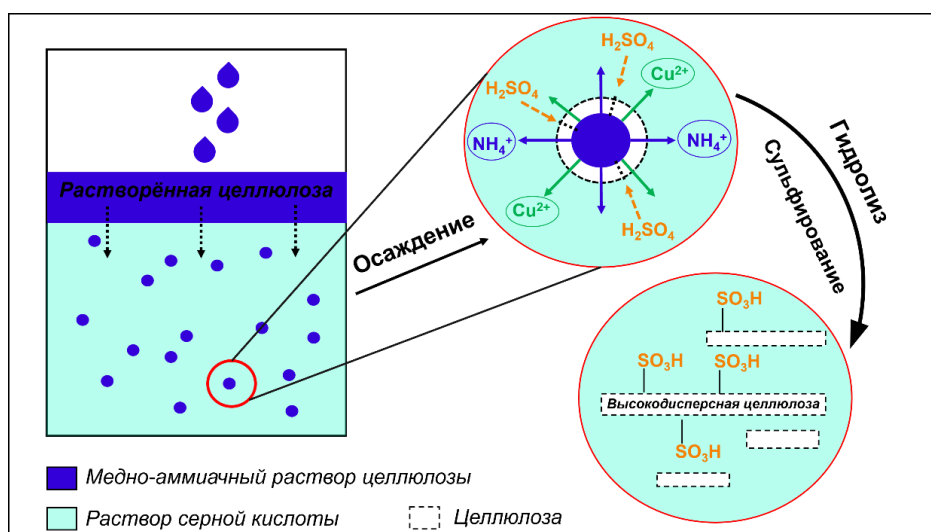


Рис. 3. Схема осаждения ВДЦ из медно-аммиачного раствора
Fig. 3. Scheme of HDC precipitation from copper-ammonia solution

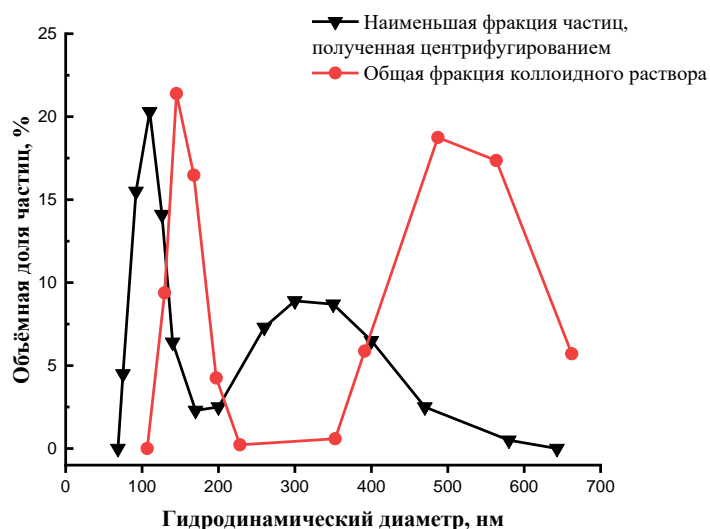


Рис. 4. Гранулометрический анализ ВДЦ, полученной методом осаждения
Fig. 4. Granulometric analysis of HDC obtained by precipitation

Таким образом, установлено, что ВДЦ, полученная предложенным методом, представляет собой смесь нано- и микроцеллюлозы; продемонстрировано, что реализация методов разделения частиц по размерам, а в частности центрифугирование, предполагает возможность количественного выделения наноразмерной фракции высокодисперсной целлюлозы.

Заключение

Таким образом, разработан эффективный метод переработки целлюлозосодержащего сырья. Показано, что осаждение целлюлозы при подкислении медно-аммиачного раствора является рациональным методом получения гидрозолей ВДЦ, представленных микро- и наноразмерными частицами со средним гидродинамическим диаметром 156 нм и общим выходом до 89%.

Отмечена возможность выделения наименьшей размерной фракции со средним диаметром 105 нм в условиях применения метода низкоскоростного центрифугирования. Выявлено, что гидролиз целлюлозы наиболее функционален при осаждении ВДЦ из МАР в кислой среде, в ходе которого коэффициент деградации достигает 2,97 с учётом выхода. Вариативность условий осаждения оставляет возможность повышения эффективности предложенного метода в ходе дальнейших исследований.

Список источников

- О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации»: постановление Правительства от 22 октября 2021 года № 1814 // Собрание законодательства Российской Федерации. М., 2021. № 44 (ч. III). Ст. 7422.
- О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: указ президента РФ от 28 февраля 2024 года № 145 // Собрание законодательства Российской Федерации. М., 2024. № 10. Ст. 1373.
- Godlewska K., Jastrzebski M. Paper and board production and consumption 2015 in Poland // Biul. Stowarzyszenia Pap. Pol. Bull. Pol. Papermak. Assoc. 2016, vol. 11, pp. 30-32.
- Comparable characterization of nanocellulose extracted from bleached softwood and hardwood pulps / Li B. et al. // Paper and Biomaterials. 2018, vol. 3, no. 4, pp. 35-44.
- A comparative study of cellulose nanofibrils disintegrated via multiple processing approaches / Qing Y. et al. // Carbohydrate polymers. 2013, vol. 97, no. 1, pp. 226-234.
- Characterization of pulp derived nanocellulose hydrogels using AVAP® technology / Kyle S. et al. // Carbohydrate polymers. 2018, vol. 198, pp. 270-280.
- Preparation and characterization of cellulose nanofibers from de-pectinated sugar beet pulp / Li M. et al. // Carbohydrate Polymers. 2014, vol. 102, pp. 136-143.
- Johar N., Ahmad I., Dufresne A. Extraction, preparation and characterization of cellulose fibres and nanocrystals from rice husk // Industrial Crops and Products. 2012, vol. 37, no. 1, pp. 93-99.
- Dufresne A. Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial // Materials today. 2013, vol. 16, no. 6, pp. 220-227.
- Production of nanocellulose fibers from pinecone biomass: Evaluation and optimization of chemical and mechanical treatment conditions on mechanical properties of nanocellulose films / Rambabu N. et al. // Industrial Crops and Products. 2016, vol. 83, pp. 746-754.
- Comparison of mechanical reinforcement effects of cellulose nanocrystal, cellulose nanofiber, and microfibrillated cellulose in starch composites / Cheng G. et al. // Polymer Composites. 2019, vol. 40, no. S1, pp. E365-E372.
- Development of nanocellulose-reinforced PLA nanocomposite by using maleated PLA (PLA-g-MA) / Ghasemi S. et al. // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2018, vol. 31, no. 8, pp. 1090-1101.
- Nanocelluloses and their phosphorylated derivatives for selective adsorption of Ag⁺, Cu²⁺ and Fe³⁺ from industrial effluents / Liu P. et al. // Journal of hazardous materials. 2015, vol. 294, pp. 177-185.
- Hokkanen S., Repo E., Sillanpää M. Removal of heavy metals from aqueous solutions by succinic anhydride modified mercerized nanocellulose // Chemical engineering journal. 2013, vol. 223, pp. 40-47.
- Enhancing adsorption of heavy metal ions onto biobased nanofibers from waste pulp residues for application in wastewater treatment / Sehaqui H. et al. // Cellulose. 2014, vol. 21, pp. 2831-2844.
- Nanocellulose-based adsorbents for heavy metal ion / Si R. et al. // Polymers. 2022, vol. 14, no. 24, p. 5479.
- Madivoli E. S. et al. Adsorption of selected heavy metals on modified nano cellulose. 2016.
- Effects of alumina nanofibers and cellulose nanocrystals on durability and selfhealing capacity of ultrahigh-performance fiber-reinforced concretes / Cuenca E. [et al.] // Journal of Materials in Civil Engineering. 2022, vol. 34, no. 8, 04022154.
- Natural cellulose nanofibers as sustainable enhancers in construction cement / Jiao L. [et al.] // PLoS One. 2016, vol. 11, no. 12, p. 168422.
- A review on micro-to nanocellulose biopolymer scaffold forming for tissue engineering applications / Khalil H. P. S. A. et al. // Polymers. 2020, vol. 12, no. 9, p. 2043.
- Nanocellulose based hydrogel or aerogel scaffolds for tissue engineering / Wei Z. et al. // Cellulose. 2021, vol. 28, no. 12, pp. 7497-7520.
- Preparation of nanocellulose: A review / Islam M. T. et al. // AATCC Journal of Research. 2014, vol. 1, no. 5, pp. 17-23.
- Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong gels / Pääkkö M. et al. // Biomacromolecules. 2007, vol. 8, no. 6, pp. 1934-1941.
- Production of nanocellulose by enzymatic hydrolysis: Trends and challenges / Ribeiro R. S. A. et al. // Engineering in life sciences. 2019, vol. 19, no. 4, pp. 279-291.
- An environmentally friendly method for enzyme-assisted preparation of microfibrillated cellulose (MFC) nanofibers / Henriksson M. et al. // European polymer journal. 2007, vol. 43, no. 8, pp. 3434-3441.

26. Preparation and characterization of nanocellulose obtained by TEMPO-mediated oxidation of organosolv pulp from reed stalks / Barbash V. A. et al. // *Applied Nanoscience*. 2022, vol. 12, no. 4, pp. 835-848.
27. Effect of TEMPO-oxidation and rapid cooling on thermo-structural properties of nanocellulose / Haniffa M. A. C. M. et al. // *Carbohydrate polymers*. 2017, vol. 173, pp. 91-99.
28. Modified fenton oxidation of cellulose fibers for cellulose nanofibrils preparation / Li Q. et al. // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2018, vol. 7, no. 1, pp. 1129-1136.
29. Патент RU 2705957 C08B 15/00, B82B 3/00. Способ получения нанокристаллической целлюлозы с использованием Cu(II) катализатора / Торлопов М.А., Удоратина Е.В., Володин А.А. Патентообладатели: ФГБОУ науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук». Заявка № 2019118607, заявл. 15.06.2019, опубл. 12.11.2019.
30. Dufresne A. Nanocellulose: from nature to high performance tailored materials. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2017.
31. Optimizing cellulose fibrillation for the production of cellulose nanofibrils by a disk grinder / Hu C. et al. // *Holzforschung*. 2015, vol. 69, no. 8, pp. 993-1000.
32. Wang S., Cheng Q. A novel process to isolate fibrils from cellulose fibers by high-intensity ultrasonication, Part 1: Process optimization // *Journal of applied polymer science*. 2009, vol. 113, no. 2, pp. 1270-1275.
33. Beck S., Bouchard J., Berry R. Controlling the reflection wavelength of iridescent solid films of nanocrystalline cellulose // *Biomacromolecules*. 2011, vol. 12, no. 1, pp. 167-172.
34. Barbash V. A., Yaschenko O. V., Shniruk O. M. Preparation and properties of nanocellulose from organosolv straw pulp // *Nanoscale Research Letters*. 2017, vol. 12, pp. 1-8.
35. Bacterial nanocellulose production and application: a 10-year overview / Jozala A. F. et al. // *Applied microbiology and biotechnology*. 2016, vol. 100, pp. 2063-2072.
36. Molecular aspects of bacterial nanocellulose biosynthesis / Jacek P. et al. // *Microbial biotechnology*. 2019, vol. 12, no. 4, pp. 633-649.
37. Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material / Klemm D. et al. // *Angewandte chemie international edition*. 2005, vol. 44, no. 22, pp. 3358-3393.
38. Industrial application of nanocelluloses in papermaking: a review of challenges, technical solutions, and market perspectives / Balea A. et al. // *Molecules*. 2020, vol. 25, no. 3, p. 526.
39. Ioelovich M. Methods for determination of chemical composition of plant biomass // *Journal SITA*. 2015, vol. 17, no. 4, pp. 208-214.
40. Structure of cellulose and microcrystalline cellulose from various wood species, cotton and flax studied by X-ray scattering / Leppänen K. et al. // *Cellulose*. 2009, vol. 16, no. 6, pp. 999-1015.
41. Топтунов Е. А., Севастьянова Ю. В. Порошковые целлюлозные материалы: обзор, классификация, характеристики и области применения // *Химия растительного сырья*. 2021. № 4. С. 31-45.
42. Лукутцова Н.П., Карпиков Е.Г., Романов Н.К. Исследование степени полимеризации высокодисперсного модификатора на основе целлюлозы для строительных композитов // *Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления*. 2025. № 1 (96). С. 81-90.
43. Langkilde F.W., Svantesson A. Identification of celluloses with Fourier-transform (FT) mid-infrared, FT-Raman and near-infrared spectrometry // *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 1995, vol. 13, no. 4-5, pp. 409-414.
44. Fengel D. Characterization of cellulose by deconvoluting the OH valency range in FTIR spectra. 1992.
45. Alemdar A., Sain M. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues—Wheat straw and soy hulls // *Bioresource technology*. 2008, vol. 99, no. 6, pp. 1664-1671.
46. Kataoka Y., Kiguchi M. Depth profiling of photo-induced degradation in wood by FT-IR microspectroscopy // *Journal of Wood Science*. 2001, vol. 47, no. 4, pp. 325-327.
47. Hydrolysis of cellulose by amorphous carbon bearing SO₃H, COOH, and OH groups / Suganuma S. et al. // *Journal of the American Chemical Society*. 2008, vol. 130, no. 38, pp. 12787-12793.
48. Lin N., Dufresne A. Surface chemistry, morphological analysis and properties of cellulose nanocrystals with gradiented sulfation degrees // *Nanoscale*. 2014, 6, 5384–5693.
49. Corgié S. C., Smith H. M., Walker L. P. Enzymatic transformations of cellulose assessed by quantitative high-throughput fourier transform infrared spectroscopy (QHT-FTIR) // *Biotechnology and bioengineering*. 2011, vol. 108, no. 7, pp. 1509-1520.
50. Cellulose synthesized by *Acetobacter xylinum* in the presence of multi-walled carbon nanotubes Yan Z. et al. // *Carbohydrate Research*. 2008, vol. 343, no. 1, pp. 73-80.
51. Morphology and physico-mechanical threshold of α -cellulose as filler in an E-SBR composite / Chowdhury S. G. et al. // *Molecules*. 2021, vol. 26, no. 3, p. 694.
52. Studies on structure of cuprammonium cellulose III. Structure of regenerated cellulose treated by cuprammonium solution / Miyamoto I. et al. // *Polymer journal*. 1996, vol. 28, no. 3, pp. 276-281.
53. Level-off degree of polymerization / Battista O. A. et al. // *Industrial & Engineering Chemistry*. 1956, vol. 48, no. 2, pp. 333-335.
54. Properties and hydrolysis behavior of celluloses of different origin / Kashcheyeva E. I. et al. // *Polymers*. 2022, vol. 14, no. 18, p. 3899.
55. Lignin enhances cellulose dissolution in cold alkali / Costa C. et al. // *Carbohydrate Polymers*. 2021, vol. 274, p. 118661.
56. Theoretical and experimental study of dissolution mechanism of cellulose / Dias Y. J. et al. // *Journal of Molecular Liquids*. 2020, vol. 312, p. 113450.

References

1. Resolution of the Government of the Russian Federation “On Amendments to the State Program of the Russian Federation “Scientific and Technological Development of the Russian Federation” No. 1814 dated October 22, 2021.

- Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii* [Collection of Legislation of the Russian Federation]. Moscow, 2021. No. 44 (Part III). Article 7422. (In Russ.)
2. Decree of the President of the Russian Federation "On the Strategy of Scientific and Technological Development of the Russian Federation" No. 145 dated February 28, 2024. *Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii* [Collection of Legislation of the Russian Federation]. Moscow, 2024. No. 10. Article 1373. (In Russ.)
3. Godlewska K., Jastrzebski M. Paper and board production and consumption 2015 in Poland. *Biul. Stowarzyszenia Pap. Pol. Bull. Pol. Papermak. Assoc.* 2016;11:30-32.
4. Li B. et al. Comparable characterization of nanocellulose extracted from bleached softwood and hardwood pulps. *Paper and Biomaterials.* 2018;3(4):35-44.
5. Qing Y. et al. A comparative study of cellulose nanofibrils disintegrated via multiple processing approaches. *Carbohydrate polymers.* 2013;97(1):226-234.
6. Kyle S. et al. Characterization of pulp derived nanocellulose hydrogels using AVAP® technology. *Carbohydrate polymers.* 2018;198:270-280.
7. Li M. et al. Preparation and characterization of cellulose nanofibers from de-pectinated sugar beet pulp. *Carbohydrate Polymers.* 2014;102:136-143.
8. Johar N., Ahmad I., Dufresne A. Extraction, preparation and characterization of cellulose fibers and nanocrystals from rice husk. *Industrial Crops and Products.* 2012;37(1):93-99.
9. Dufresne A. Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial. *Materials today.* 2013;16(6):220-227.
10. Rambabu N. et al. Production of nanocellulose fibers from pinecone biomass: Evaluation and optimization of chemical and mechanical treatment conditions on mechanical properties of nanocellulose films. *Industrial Crops and Products.* 2016;83:746-754.
11. Cheng G. et al. Comparison of mechanical reinforcement effects of cellulose nanocrystal, cellulose nanofiber, and microfibrillated cellulose in starch composites. *Polymer Composites.* 2019;40(S1):E365-E372.
12. Ghasemi S. et al. Development of nanocellulose-reinforced PLA nanocomposite by using maleated PLA (PLA-g-MA). *Journal of Thermoplastic Composite Materials.* 2018;31(8):1090-1101.
13. Liu P. et al. Nanocelluloses and their phosphorylated derivatives for selective adsorption of Ag⁺, Cu²⁺ and Fe³⁺ from industrial effluents. *Journal of hazardous materials.* 2015;294:177-185.
14. Hokkanen S., Repo E., Sillanpää M. Removal of heavy metals from aquatic solutions by succinic anhydride modified mercerized nanocellulose. *Chemical engineering journal.* 2013;223:40-47.
15. Sehaqui H. et al. Enhancing adsorption of heavy metal ions onto biobased nanofibers from waste pulp residues for application in wastewater treatment. *Cellulose.* 2014;21:2831-2844.
16. Si R. et al. Nanocellulose-based adsorbents for heavy metal ion. *Polymers.* 2022;14(24):5479.
17. Madivoli E.S. et al. Adsorption of selected heavy metals on modified nano cellulose. 2016.
18. Cuenca E. et al. Effects of alumina nanofibers and cellulose nanocrystals on durability and selfhealing capacity of ultrahigh-performance fiber-reinforced concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering.* 2022;34(8):04022154.
19. Jiao L. et al. Natural cellulose nanofibers as sustainable enhancers in construction cement. *PLoS One.* 2016;11(12):168422.
20. Khalil H.P.S.A. et al. A review on micro-to nanocellulose biopolymer scaffold forming for tissue engineering applications. *Polymers.* 2020;12(9):2043.
21. Wei Z. et al. Nanocellulose based hydrogel or aerogel scaffolds for tissue engineering. *Cellulose.* 2021;28(12):7497-7520.
22. Islam M.T. et al. Preparation of nanocellulose: A review. *AATCC Journal of Research.* 2014;1(5):17-23.
23. Pääkkö M. et al. Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong gels. *Biomacromolecules.* 2007; 8(6):1934-1941.
24. Ribeiro R.S.A. et al. Production of nanocellulose by enzymatic hydrolysis: Trends and challenges. *Engineering in life sciences.* 2019;19(4):279-291.
25. Henriksson M. et al. An environmentally friendly method for enzyme-assisted preparation of microfibrillated cellulose (MFC) nanofibers. *European polymer journal.* 2007;43(8):3434-3441.
26. Barbash V.A. et al. Preparation and characterization of nanocellulose obtained by TEMPO-mediated oxidation of organosolv pulp from reed stalks. *Applied Nanoscience.* 2022;12(4):835-848.
27. Haniffa M.A.C.M. et al. Effect of TEMPO-oxidation and rapid cooling on thermo-structural properties of nanocellulose. *Carbohydrate polymers.* 2017;173:91-99.
28. Li Q. et al. Modified fenton oxidation of cellulose fibers for cellulose nanofibrils preparation. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering.* 2018;7(1):1129-1136.
29. Torlopov M.A., Udoratina E.V., Volodin A.A. *Sposob polucheniya nanokristallicheskoy tsellyulozy s ispolzovaniem Cu(II) katalizatora* [A method for obtaining nanocrystalline cellulose using a Cu(II) catalyst]. Patent RU, no. 2705957, 2019.
30. Dufresne A. Nanocellulose: from nature to high performance tailored materials. *Walter de Gruyter GmbH & Co KG*, 2017.
31. Hu C. et al. Optimizing cellulose fibrillation for the production of cellulose nanofibrils by a disk grinder. 2015;69(8):993-1000.
32. Wang S., Cheng Q. A novel process to isolate fibrils from cellulose fibers by high intensity ultrasonication, Part 1: Process optimization. *Journal of applied polymer science.* 2009;113(2):1270-1275.
33. Beck S., Bouchard J., Berry R. Controlling the reflection wavelength of iridescent solid films of nanocrystalline cellulose. *Biomacromolecules.* 2011;12(1):167-172.
34. Barbash V.A., Yaschenko O.V., Shniruk O.M. Preparation and properties of nanocellulose from organosolv straw pulp. *Nanoscale Research Letters.* 2017;12:1-8.
35. Jozala A.F. et al. Bacterial nanocellulose production and application: a 10-year overview. *Applied microbiology and biotechnology.* 2016;100:2063-2072.
36. Jacek P. et al. Molecular aspects of bacterial nanocellulose biosynthesis. *Microbial biotechnology.* 2019;12(4):633-649.
37. Klemm D. et al. Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte chemie international edition.* 2005;44(22):3358-3393.

38. Balea A. et al. Industrial application of nanocelluloses in papermaking: a review of challenges, technical solutions, and market perspectives. *Molecules*. 2020;25(3):526.
39. Ioelovich M. Methods for determination of chemical composition of plant biomass. *Journal SITA*. 2015;17(4):208-214.
40. Leppänen K. et al. Structure of cellulose and microcrystalline cellulose from various wood species, cotton and flax studied by X-ray scattering. *Cellulose*. 2009;16(6):999-1015.
41. Toptunov E.A., Sevastyanova Yu.V. Powdered cellulose materials: review, classification, characteristics and applications. *Khimiya rastitel'nogo syrya* [Chemistry of plant raw materials]. 2021;(4):31-45. (In Russ.)
42. Lukutsova N.P., Karpikov E.G., Romanov N. K. Research on polymerization degree of highly dispersed cellulose-based modifier for construction composites. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i upravleniya* [Bulletin of the East Siberian State University of Technology and Management]. 2025;(1(96)):81-90. (In Russ.)
43. Langkilde F.W., Svantesson A. Identification of celluloses with Fourier-transform (FT) mid-infrared, FT-Raman and near-infrared spectrometry. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 1995;13(4-5):409-414.
44. Fengel D. Characterization of cellulose by deconvoluting the OH valency range in FTIR spectra. 1992.
45. Alemdar A., Sain M. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues—Wheat straw and soy hulls. *Bioresource technology*. 2008;99(6):1664-1671.
46. Kataoka Y., Kiguchi M. Depth profiling of photo-induced degradation in wood by FT-IR microspectroscopy. *Journal of Wood Science*. 2001;47(4):325-327.
47. Suganuma S. et al. Hydrolysis of cellulose by amorphous carbon bearing SO₃H, COOH, and OH groups. *Journal of the American Chemical Society*. 2008;130(38):12787-12793.
48. Lin N., Dufresne A. Surface chemistry, morphological analysis and properties of cellulose nanocrystals with graduated sulfation degrees. *Nanoscale*. 2014;6:5384-5693.
49. Corgié S.C., Smith H.M., Walker L.P. Enzymatic transformations of cellulose assessed by quantitative high-throughput fourier transform infrared spectroscopy (QHT-FTIR). *Biotechnology and bioengineering*. 2011;108(7):1509-1520.
50. Yan Z. et al. Cellulose synthesized by *Acetobacter xylinum* in the presence of multi-walled carbon nanotubes. *Carbohydrate Research*. 2008;343(1):73-80.
51. Chowdhury S.G. et al. Morphology and physico-mechanical threshold of α -cellulose as filler in an E-SBR composite. *Molecules*. 2021;26(3):694.
52. Miyamoto I. et al. Studies on structure of cuprammonium cellulose III. Structure of regenerated cellulose treated by cuprammonium solution. *Polymer journal*. 1996;28(3):276-281.
53. Battista O.A. et al. Level-off degree of polymerization. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1956;48(2):333-335.
54. Kashcheyeva E.I. et al. Properties and hydrolysis behavior of celluloses of different origin. *Polymers*. 2022;14(18):3899.
55. Costa C. et al. Lignin enhances cellulose dissolution in cold alkali. *Carbohydrate Polymers*. 2021;274:118661.
56. Dias Y.J. et al. Theoretical and experimental study of dissolution mechanism of cellulose. *Journal of Molecular Liquids*. 2020;312:113450.

Поступила 23.06.2025; принята к публикации 06.10.2025; опубликована 25.12.2025

Submitted 23/06/2025; revised 06/10/2025; published 25/12/2025

Лукутцова Наталья Петровна – доктор технических наук, профессор,
Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия.
Email: natluk58@mail.ru. ORCID 0000-0002-8913-1570

Карпиков Евгений Геннадиевич – старший преподаватель,
Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия.
Email: johnjk@mail.ru. ORCID 0009-0000-4092-3000.

Романов Николай Кадерович – студент,
Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия.
Email: niknikromanoff@yandex.ru. ORCID 0009-0002-4847-9789.

Natalia P. Lukutsova– DrSc(Eng.), Professor,
Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk, Russia.
Email: natluk58@mail.ru. ORCID 0000-0002-8913-1570

Evgeny G. Karpikov– Senior Lecturer,
Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk, Russia.
Email: johnjk@mail.ru. ORCID 0009-0000-4092-3000.

Nikolay K. Romanov – Student,
Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk, Russia.
Email: niknikromanoff@yandex.ru. ORCID 0009-0002-4847-9789.

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 006.001
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-129-138



ВАЛОРИЗАЦИЯ ЗНАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ СТАНДАРТИЗАЦИИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Аронов И.З.¹, Рыбакова А.М.¹, Иванов А.В.²

¹Московский государственный институт международных отношений, Москва, Россия

²Российский институт стандартизации, Москва, Россия

Аннотация. В современной экономике научные знания играют важную роль, связанную с развитием инноваций. Способность трансформировать знания в экономические результаты обеспечивает странам значительные технические и технологические преимущества. Поэтому расширение каналов трансформации знаний представляется важным резервом валоризации знаний через трансфер инноваций. Документы по стандартизации, которые не предполагают консенсус в технических комитетах по стандартизации, являются таким каналом трансформации знаний и могут в значительной мере содействовать повышению ценности знаний путем трансфера инноваций. В статье представлен критический анализ современного состояния применения инструментов стандартизации для повышения ценности научных знаний. Для выполнения настоящего исследования были критически проанализированы подходы к применению инструментов стандартизации для валоризации знаний и трансфера инноваций в Европейском Союзе (ЕС), Германии, Италии, Нидерландах и др., установленные в нормативных документах этих стран и ЕС, рассмотрены документы по стандартизации, разработанные в рамках принятых подходов, и представлены соответствующие обобщения. Рассмотрены актуальные базовые документы ЕС, содержащие рекомендации по привлечению заинтересованного университетского и исследовательского сообщества к деятельности по стандартизации, а также опыт разработки документов по стандартизации вида CWA (соглашения семинара) для целей трансфера инноваций. Кроме того, представлен опыт участия университетского и исследовательского сообщества в создании документов по стандартизации вне технических комитетов по стандартизации в Германии (DIN SPEC), Италии (UNI/PdR) и Нидерландах (NTA) для валоризации знаний. В настоящее время Китай также рассматривает возможность применения документов по стандартизации, не связанных с консенсусом, для трансфера инноваций. Установлено, что соглашения семинаров IWA, организуемых в рамках ИСО, преследуют иные цели, не связанные с трансфером инноваций, поскольку валоризация знаний носит в основном страновой характер. Показано, что в России также имеется возможность применения документов по стандартизации для целей распространения инноваций, не предполагающих консенсус, – предварительные национальные стандарты, технические отчеты (спецификации). Показано, что в России также имеется возможность применения документов по стандартизации, не предполагающих консенсус, для целей распространения инноваций, – предварительные национальные стандарты, технические отчеты (спецификации).

Ключевые слова: научные знания, валоризация, стандартизация, инновации, трансфер инноваций, соглашение семинара

© Аронов И.З., Рыбакова А.М., Иванов А.В., 2025

Для цитирования

Аронов И.З., Рыбакова А.М., Иванов А.В. Валоризация знаний с применением инструментов стандартизации: современное состояние // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 129-138. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-129-138>



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

VALORIZATION OF KNOWLEDGE USING STANDARDIZATION TOOLS: CURRENT STATE

Aronov I.Z.¹, Rybakova A.M.¹, Ivanov A.V.²

¹Moscow State Institute of International Relations, Moscow, Russia

²Russian Standardization Institute, Moscow, Russia

Abstract. In the modern economy, scientific knowledge plays important role for development of innovations. The ability to transform knowledge into economic results provides countries with significant technical and technological advantages. Therefore, the expansion of knowledge transformation channels seems to be an important reserve for knowledge valorization through innovation transfer. Standardization documents that do not imply consensus in technical committees are such a channel for knowledge transformation and can significantly contribute to increasing the value of knowledge through innovation transfer. The article presents a critical analysis of the current state of the application of standardization tools to increase the value of scientific knowledge. To carry out this study, the approaches to the use of standardization tools for knowledge valorization and innovation transfer in the European Union (EU), Germany, Italy, the Netherlands, etc., established in the regulatory documents of these countries and the EU, were critically analyzed, standardization documents developed within the framework of accepted approaches were reviewed, and relevant generalizations were presented. The current basic EU documents containing recommendations for involving the interested university and research community in standardization activities, as well as the experience of developing standardization documents of the CWA type (workshop agreements) for the purposes of innovation transfer are considered. In addition, the experience of participation of the university and research community in the creation of standardization documents outside technical committees in Germany (DIN SPEC), Italy (UNI/PdR) and the Netherlands (NTA) for knowledge valorization is presented. Currently, China is also considering the possibility of using non-consensus standardization documents for innovation transfer. It has been established that the IWA workshop agreements organized within the ISO framework pursue other goals not related to innovation transfer, since knowledge valorization is mainly of a country-specific nature. It has been shown that there is also an opportunity to use non-consensus standardization documents for the purposes of disseminating innovations such as preliminary national standards, technical reports (specifications) in Russia. It has been established that Russia allows the use of non-consensus standardization documents such as preliminary national standards, technical reports (specifications) for the innovations dissemination.

Keywords: scientific knowledge, valorization, standardization, innovation, innovation transfer, workshop agreement

For citation

Aronov I.Z., Rybakova A.M., Ivanov A.V. Valorization of Knowledge Using Standardization Tools: Current State. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 129-138. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-129-138>

Введение

Президент России В. В. Путин в своем видеообращении к участникам просветительского марафона отметил¹, что знания должны вновь стать одной из важнейших ценностей общества. Знания рассматриваются как ключевой неиссякаемый ресурс для развития современной экономики [1-7]. В свою очередь, экономика, базирующаяся на знаниях, признает высокую ценность результатов исследований, в том числе НИОКР, как основы технологического развития и производства.

Сам процесс повышения ценности знаний называют валоризацией, этот термин впервые был введен К. Марксом в рамках концепции прибавочной стоимости в первом томе «Капитала» [4]. В экономике знаний это понятие применяют в контексте коммерциализации знаний [8]. Одним из важных каналов валоризации знаний является трансфер инноваций [9].

Косвенно о степени валоризации знаний свидетельствуют индикаторы инновационной деятельности, информация о которых ежегодно публикуется в

статистическом сборнике «Индикаторы инновационной деятельности», выпускаемом с 2007 года Институтом статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ в партнерстве с Минэкономразвития России и Росстатом². В сборнике за 2024 год отмечается, что «по интенсивности инновационных затрат Россия входит в топ-10 европейских стран, а возглавляют его Швеция (3,5%) и Германия (3,4%). Аналогичный российскому уровень демонстрирует Финляндия (2,5%), близкие значения у Франции (2,4%) и Австрии (2,3%)»³.

Однако исследователи, анализирующие эффективность валоризации знаний, отмечают, что «...российская наука пока не достигла уровня коммерциализации, сравнимого с передовыми международными практиками, что снижает ее эффективность как драйвера устойчивого экономического развития страны» [10].

В современных условиях способность трансформировать знания в экономические результаты обеспечивает странам значительные технические и техноло-

¹<https://tass.ru/obschestvo/11444089>

²<https://www.novostiitkanala.ru/news/detail.php?ID=182736>

³Ibid

гические преимущества. Поэтому расширение каналов трансформации знаний представляется важным резервом валоризации знаний, в качестве которого может выступать современная стандартизация [11], однако для этого следует в должной мере популяризировать применение инструментов современной стандартизации [12]. О недостаточности усилий в этом направлении, например, свидетельствует последний сборник «Индикаторы инновационной деятельности», в котором стандартизация, к сожалению, не упомянута.

Тем не менее зарубежный опыт подтверждает, что современные инструменты стандартизации широко используются для валоризации знаний и трансфера инноваций. В связи с этим формулируется цель статьи – проанализировать новые возможности валоризации знаний и повышения уровня их коммерциализации с использованием инструментов стандартизации на основе анализа наилучшей практики.

Материалы и методы исследования

Достижение цели настоящей статьи связано с анализом ключевых кейсов, позволяющих выявить наилучшую практику валоризации знаний и трансфера инноваций с применением инструментов стандартизации.

Для выполнения настоящего исследования были критически проанализированы подходы к применению инструментов стандартизации для валоризации знаний и трансфера инноваций в Европейском Союзе (ЕС), Германии, Италии, Нидерландах и др., установленные в нормативных документах этих стран и ЕС, рассмотрены документы по стандартизации, разработанные в рамках принятых подходов, и представлены соответствующие обобщения.

Базовые документы ЕС

Прежде всего, рассмотрим положения Рекомендаций Совета (ЕС) 2022/2415 от 2 декабря 2022 года «О руководящих принципах валоризации знаний»⁴. В этом документе подчеркивается важность валоризации знаний для создания социальной и экономической ценности путем преобразования данных, наука и результатов исследований в устойчивые продукты, услуги, решения и политику, основанную на знаниях, приносящую пользу обществу. При этом уже в преамбуле документа определена связь инноваций и инструментов стандартизации и необходимость управления этим взаимодействием на основе положений «Новой промышленной стратегии для Европы» 2020 и 2021 годов. В документе в качестве одного из приоритетов рассматривается «...повышение осведомленности ученых и новаторов о возможностях стандартизации и вовлечение европейского исследовательского сообщества, связанного с НИОКР, в деятельность по стандартизации на ранних этапах...». В этом же документе Европейской Комиссии поручает-

ся разработать Кодекс практики для исследователей по стандартизации, чтобы укрепить связь между стандартизацией и НИОКР.

Обращает на себя внимание следующий нюанс: необходимость и целесообразность вовлечения научного сообщества также в процесс регулирования, *в том числе и технического регулирования* (курсив – авторов статьи).

На кого рассчитаны эти Рекомендации? Прежде всего, это, конечно, академические круги, европейские университеты и другие высшие заведения, государственные и частные исследовательские организации, научные и сетевые сообщества, промышленные предприятия, включая малые и средние предприятия, стартапы, спин-оффы⁵, предприниматели, исследователи, ученые, преподаватели и студенты, а также национальные органы по стандартизации.

В резолютивной части документа отмечается необходимость обеспечить, чтобы финансируемая государством научно-исследовательская и инновационная деятельность учитывала максимально широкое общественное использование и повышение ценности интеллектуальных активов, созданных в ходе научно-исследовательской и инновационной деятельности. С этой целью предлагается укреплять практику использования результатов исследований и научных знаний для разработки и реализации государственной политики, а также разработки и пересмотра стандартов как носителей новых знаний.

Второй документ, Кодекс практики по стандартизации в Европейском исследовательском пространстве⁶, конкретизирует роль и место стандартизации в продвижении инноваций и, следовательно, в валоризации знаний. Осознание преимуществ стандартизации, говорится в документе, является важной предпосылкой для успешного вовлечения субъектов исследований в деятельность по стандартизации. Чем раньше участники R&I⁷ включатся в процесс разработки документов по стандартизации, интегрированный в общий процесс R&I, тем раньше они смогут вывести свои инновации, основанные на стандартах, на конкурентные мировые рынки, что приведет к существенной валоризации знаний.

В документе отмечается важная роль высших учебных заведений (вуз), государственных и частных исследовательских компаний для продвижения инноваций с применением инструментов стандартизации. В частности, вузам предлагается разработать политику стандартизации как самостоятельный документ или как часть политики оценки интеллектуальной собственности или результатов исследований. В свою очередь, политика высших учебных заведений и

⁵В контексте рассматриваемого документа спин-оффы – это специально выделенные материнской компанией, занятой основным бизнесом, структуры непрофильного бизнеса для завоевания конкурентного преимущества, например, в сфере НИОКР.

⁶Code of Practice on Standardisation in the ERA (Commission Recommendation (EU) 2023/498).

⁷R&I – Research and Innovations, исследование и инновации.

научно-исследовательских организаций в отношении стандартов и стандартизации должна поощрять исследователей к активному участию в технических комитетах соответствующих органов по стандартизации с целью использования их опыта в стандартизации. Кроме того, участие в деятельности по стандартизации должно надлежащим образом учитываться в научной оценке ученого/исследователя.

В процессе реализации проектов НИОКР должна формироваться отчетность и осуществляться мониторинг, отражающие в том числе деятельность по стандартизации, а также документы по стандартизации должны найти более широкое применение при постановке задач и реализации проектов НИОКР.

Рассмотрим подробнее современный опыт разработки документов по стандартизации, наиболее активно используемых в валоризации знаний путем трансфера инноваций. В этой статье мы коснемся документов, разрабатываемых вне традиционной деятельности технических комитетов по стандартизации, но с их участием и под их контролем и руководством.

Европейская практика разработки CWA (соглашение семинара рабочей группы)

Европейские организации по стандартизации разрабатывают не только консенсусные стандарты (EN), документы неполного консенсуса вида технические спецификации (ENTS), технические отчеты (ENTR), но и еще один вид документов – CWA.

CWA — это документ, разработанный и согласованный участниками временной рабочей группы, называемой семинаром CEN и/или CENELEC (соглашение семинара). Участие в семинаре является открытым для всех заинтересованных сторон, включая неевропейские страны, а его надлежащее функционирование обеспечивается членом CEN и/или CENELEC, управляющим его секретариатом. Начиная с 2000 года, европейская организация по стандартизации опубликовала более 400 таких документов, часть которых затем стала основой европейских стандартов.

В настоящее время подход к CWA изменился в сторону их применения в целях ускорения трансфера инноваций, что связано в том числе с новой стратегией стандартизации, определенной Европейской комиссией.⁸ Он сформулирован в Руководстве CEN – CENELEC 29 «Соглашения о семинарах CEN и/или CENELEC – быстрый путь к стандартизации» (выпуск 3, март 2024 г.)⁹. В частности, в документе сказано: «На инновационных рынках часто возникает потребность в быстрой разработке справочного документа в качестве отправной точки для рыночного

внедрения инновационных решений и содействия дальнейшим инновациям на рынке. Однако, если инновационные технологии... ещё не достигли достаточной степени стабильности (уровня технологической готовности – TRL), европейский стандарт может быть не лучшим способом удовлетворения этой потребности из-за характера процесса стандартизации».

Основными требованиями к CWA являются быстрый срок разработки, отсутствие противоречий с европейскими стандартами, изложение документа по форме и правилам CEN – CENELEC и упоминание членов семинара в предисловии к документу; максимальный срок действия документа должен составлять не более 6 лет.

CWA не предназначены для поддержки требований регламентов ЕС. При этом существование технического комитета в той же области не препятствует проведению семинара; технические комитеты могут принимать участие в семинаре и получать информацию о его работе. После публикации, если тема окажется актуальной для рынка, CWA может стать источником будущей темы в рабочей программе технического комитета. CEN и CENELEC являются исключительными владельцами прав на воспроизведение CWA.

Процедуры разработки CWA, согласно Руководству CEN - CENELEC 29, включают:

- *стадию инициирования*, на которой предложение заинтересованных лиц¹⁰ рассматривается руководством CEN – CENELEC и техническими комитетами,¹¹ формируется концепция (описание) документа, формируется рабочая группа (семинар), определяется план работ; продолжительность этой стадии не может превышать 90 дней;

- *операционную стадию*, включающую открытие семинара, доработку плана работ и установление ответственности секретариата семинара, собственно разработку документа и предоставление его на публичное обсуждение, доработку проекта и публикацию документа; в общем случае эта стадия занимает от 40 до 60 дней.

В 2017 году CEN и CENELEC договорились о том, что CWA, отражающие результаты в НИОКР, будут размещены в открытом доступе на веб-сайтах CEN и CENELEC¹². Сегодня в открытом доступе находятся 125 таких документов, для их получения не требуется даже регистрации. Финансирование разработки этих CWA осуществляется с помощью бюджетных средств (в рамках программ ЕС Horizon и Horizon Europe¹³).

⁸ COM(2022) 31. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social committee and the Committee of the Regions «An EU Strategy on Standardisation Setting global standards in support of a resilient, green and digital EU single market», <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/48598>

⁹CEN- CENELEC GUIDE 29, <https://www.cencenelec.eu/media/Guides/CEN-CLC/cenclcguid29.pdf>

¹⁰Представителей бизнес-сообщества, научных или академических кругов, или национальных органов – членов CEN-CENELEC, или технических комитетов.

¹¹ Для решения вопросов «противоречит ли предложение действующим стандартам» и «есть ли аргументы против разработки CWA».

¹²Решение CEN/CA 29/2017 и Решение CENELEC/CA 146/14.

¹³Ключевые программы ЕС по финансированию исследований и инноваций.

Как показал проведенный анализ фонда документов CEN и CENELEC, 82% всех CWA начиная с 2020 года, разработаны по результатам НИОКР. Ежегодно количество таких документов увеличивается (**рис. 1**).

Проведенный выборочный анализ CWA за 2024 и 2025 годы показал, что активное участие в их разработке принимают представители исследовательских организаций (см. **таблицу**).

CWA 50751 «Методология управления производственными процессами на основе данных» разработан семинаром из 15 организаций, более половины семинара составляли представители 9 университетов и исследовательских центров. Аналогично разработку CWA 18211 «Эталонная архитектура для применения

решений ИИ в перерабатывающей промышленности — опыт s-X-AIPi» вели представители 9-ти организаций, включая 4 института. Более трети участников многочисленного семинара, образованного для разработки CWA 18237 «Дальновидные действия, основанные на природоохранных принципах, для здоровья, благополучия и устойчивости в городах», также составили представители университетов. Даже в разработке CWA 18150 «Беспилотные авиационные системы – Противодействие беспилотным летательным аппаратам – Тестирование», кроме органов власти и компаний-разработчиков, участвовали 3 высших учебных заведения.

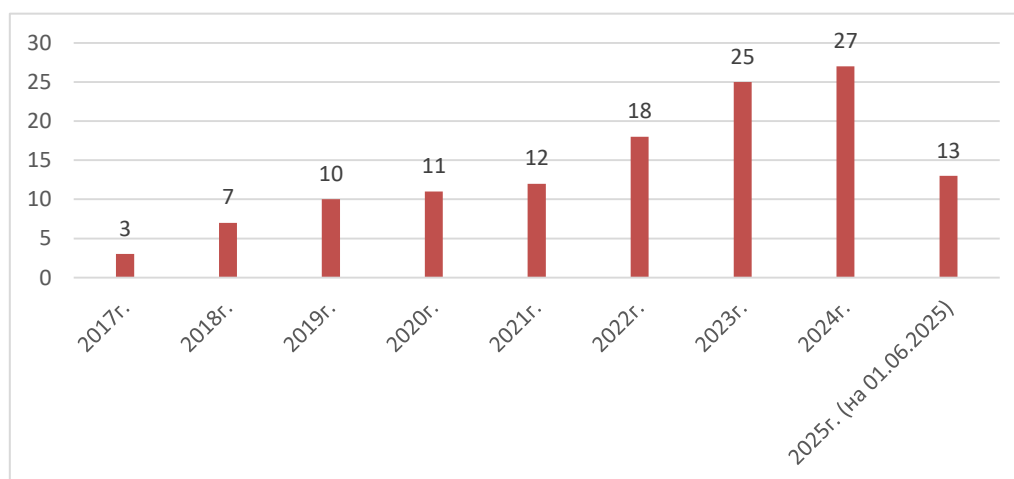


Рис. 1. Количество CWA, разработанных на основе результатов НИОКР

Fig. 1. Number of CWA developed on R&D results

Таблица. Участие исследовательского сообщества в разработке CWA (фрагмент)

Table. Participation of the research community in the development of CWA (excerpt)

Обозначение CWA	Год принятия	Наименование CWA	Участие в разработке представителей исследовательских организаций
CWA 18150	2024	Беспилотные авиационные системы - Противодействие беспилотным летательным аппаратам - Тестирование	Королевская военная академия Бельгии Военный технический университет имени Ярослава Домбровского (Польша) Университет Севильи (Испания)
CWA 50751	2024	Методология управления производственными процессами на основе данных	Университет Кастилии-Ла-Манчи (Испания) Центр нанотехнологий и технических материалов, функциональных и интеллектуальных технологий (Испания) Политехнический университет Каталонии (Испания) Университет Бар-Илан (Израиль) Высшая техническая школа Кайзерслаутерн (Германия)
CWA 18211	2025	Эталонная архитектура для применения решений ИИ в перерабатывающей промышленности — опыт s-X-AIPi	Технологический центр CARTIF (Испания) Институт строительной физики Фраунгофера (Германия) Научно-исследовательский центр фармацевтической инженерии (Германия) Миланский политехнический институт (Италия)
CWA 18237	2025	Дальновидные действия, основанные на природоохранных принципах, для здоровья, благополучия и устойчивости в городах	Центр городского совершенства Института Штихтинга (Германия) E2ARC Архитектура и исследования для городов (Германия) Технический университет Крита (Греция) Мальтийский университет Университет Жана Мулена (Франция) Падуанский университет (Италия) Eurac Research (Италия)

Германия: разработка DIN SPEC в целях трансфера инноваций

На сайте DIN¹⁴ «национального органа по стандартизации» Германии есть специальный раздел (страница), посвященный исследованиям и инновациям¹⁵, где рассматриваются три аспекта: как использовать стандартизацию при проведении исследований, как оценить вклад стандартов в деятельность компании и как ускорить выход инновации на рынок с помощью разработки DIN SPEC.

DIN SPEC — «самый быстрый способ превратить исследование в рыночный продукт», документ неполного консенсуса, разрабатываемый по специальным правилам (процедура DINPAS) в небольших рабочих группах или «мастерских» всего за несколько месяцев.

Инициировать работу над DIN SPEC и/или участвовать в разработке DIN SPEC могут компании, организации, научно-исследовательские институты и частные лица. Работа DIN, как и CEN-CENELEC (см. выше), заключается в том, чтобы убедиться, что DIN SPEC не противоречит каким-либо существующим/разрабатываемым стандартам. Как и в случае CWA, работа над документом начинается с установочного совещания, а содержание документа разрабатывается в ходе семинаров. Затем DIN Media обеспечивает публикацию и предоставление DIN SPEC широкому кругу клиентов¹⁶.

Разработка DIN SPEC может быть поддержана различными программами государственного финансирования. DIN предлагает DIN-Connect – программу финансирования стартапов и малых/средних предприятий, призванную вносить инновационные идеи в стандартизацию. Кроме того, проекты, направленные на устойчивое развитие или цифровизацию, могут

получить финансирование в рамках специальных программ Федерального министерства экономики и защиты климата Германии (BMWK). Значительная часть финансирования предоставляется в виде безвозвратных грантов.

Разработанные документы предоставляются пользователям бесплатно (после регистрации на сайте DIN).

Далее на основе анализа фонда стандартов DIN представлена динамика разработки DIN SPEC, начиная с 2017 года, когда была создана процедура разработки документа в целях трансфера инноваций (рис. 2). Очевидно, что количество этих документов увеличивается от года к году (за исключением «пандемийных» 2020–2021 годов), по сравнению с 2017 годом – почти в 8 раз.

Как и в CWA, в предисловии к DIN SPEC приводится перечень участников разработки. Так, в разработке DIN SPEC 92001-1 «Искусственный интеллект – Процессы жизненного цикла и Требования к качеству – Часть 1: Мета модель качества» принимали участие представители 18-ти организаций, в том числе 7 университетов, включая Университет Отто-фон-Герике-Магдебург, Университет Оснабрюка, Университет Тюбингена, Рейнско-Вестфальский технический университет Ахена.

На сайте DIN размещены отзывы участников разработки DIN SPEC, в частности д-р Герхард Гудерган, руководитель исследований, Исследовательский институт рационализации FIR при Рейнско-Вестфальском техническом университете Ахена отмечает: «Благодаря переходу на DIN SPEC инновационные решения становятся доступными и применимыми для всех желающих. Поэтому мы используем стандартизацию именно как инструмент для передачи результатов НИОКР».

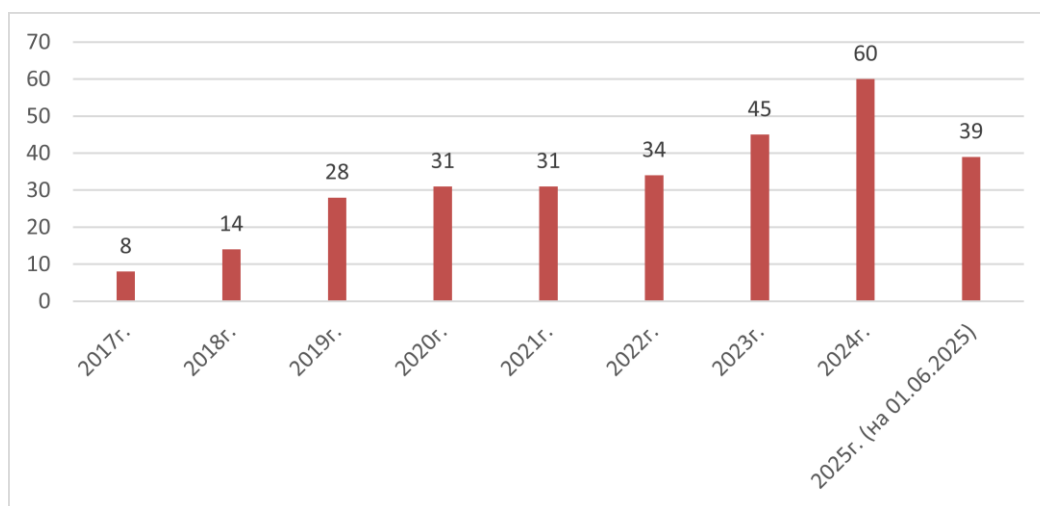


Рис. 2. Динамика разработки DIN SPEC
Fig. 2. Dynamics of DIN SPEC development

¹⁴Немецкий институт стандартизации.

¹⁵<https://www.din.de/de/forschung-und-innovation>

¹⁶<https://www.din.de/en/innovation-and-research/din-spec-en>

Италия: разработка UNI/PdR в целях трансфера инноваций

К документам по стандартизации UNI (национальный орган по стандартизации Италии) относит «справочные практики» (UNI/PdR) – документы неполного консенсуса, разработанные в рамках ограниченной рабочей группы под оперативным руководством UNI.

UNI/PdR, как указано в статье 35 Устава UNI, представляют собой «преднормативные» документы, которые оперативно реагируют на конкретные потребности рынка, консолидируя «современный уровень техники». UNI/PdR рассматривают темы, которые являются инновационными, в том числе связанные с новыми технологическими решениями для продукции, услуг, организаций и профессионалов, социальными инновациями, апробированными на местном и районном уровнях; UNI/PdR «предназначены для передачи знаний, полученных в результате прикладных исследований или национальных/европейских исследовательских проектов»¹⁷. Следует отметить, что эти документы в Италии разрабатываются также в целях реализации национального законодательства. Например, Закон Италии 4/2013, который вводит положения для профессий, не организованных в профессиональные ордена или коллегии, предусматривает установление требований к таким профессиям в «справочных практиках»; Закон 103/2024 об упрощении контроля за экономической деятельностью также определяет использование UNI/PdR для оценки риска.

Разработка UNI/PdR осуществляется путем обсуждения технического содержания экспертами «Круглого стола» (специально созданного технического комитета), отобранными по согласованию с

инициатором разработки. UNI/PdR остаются в силе в течение срока, не превышающего 5 лет, в течение которого они могут быть преобразованы в стандарт UNI, техническую спецификацию UNI/TS или технический отчет UNI/TR либо отозваны.

Согласно Регламенту разработки справочных практик, UNI/PdR финансируются «на основе анализа затрат и выгод посредством поручения, предоставленного UNI предлагающей стороной, консорциумом или группой организаций, с целью покрытия расходов, что позволяет UNI распространять их бесплатно». В настоящее время на сайте UNI после регистрации можно получить бесплатно 179 UNI/PdR (рис. 3), разработанных с 2017 по 2025 годы.

Анализ сведений об участниках разработки UNI/PdR, предназначенных для трансфера инноваций, показал значимое участие представителей исследовательского сообщества. Так, UNI/PdR 158:2024 «Рекомендации по сокращению выбросов микропластика при производстве и распределении продуктов питания» разработаны «Круглым столом» из 14 участников, четверо из которых представляли университеты Италии; в разработке UNI/PdR 148:2023 «Агроэлектрические системы – интеграция сельскохозяйственной деятельности и фотоэлектрических систем» принимали участие 12 специалистов, четверо из них – представители университетов.

Нидерланды: техническое соглашение

В 2021 году NEN (национальный орган по стандартизации Нидерландов) принял решение о внесении в состав документов по стандартизации еще одного документа – NTA, или «нидерландского техни-

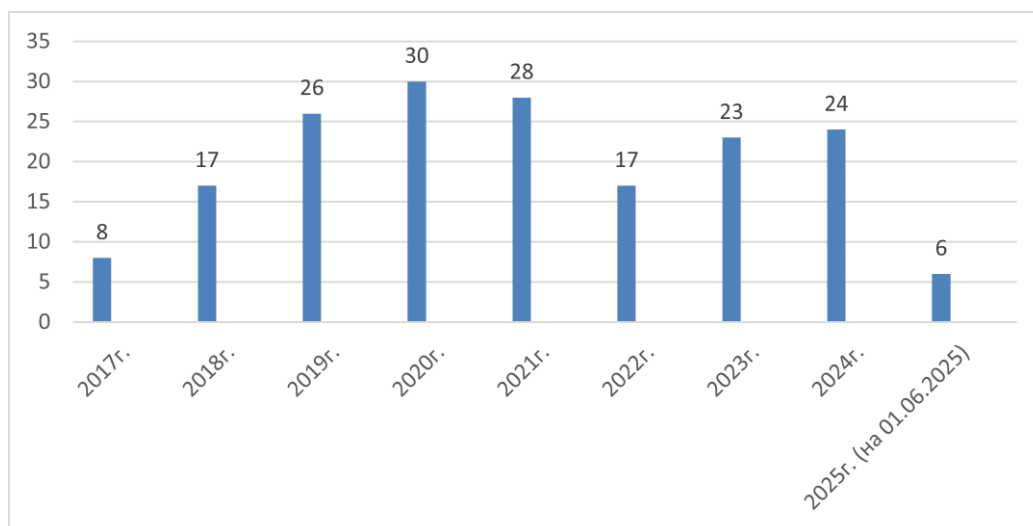


Рис. 3. Динамика разработки UNI/PdR

Fig. 3. Dynamics of UNI/PdR development

¹⁷UNI. Регламент разработки справочных практик (2022 г.), https://www.uni.com/wp-content/uploads/2023/01/2022_Regolamento_PdR_A.pdf

ческого соглашения», вскоре была утверждена процедура его разработки.¹⁸ Согласно этому документу, NTA представляет «публичное соглашение между двумя или более заинтересованными сторонами», не требует публичного обсуждения и достижения консенсуса для принятия, что обеспечивает короткие сроки разработки. NTA следует разрабатывать в секторах, где «происходит стремительное развитие».¹⁹ В настоящее время на официальном сайте NEN размещено 21 бесплатное NTA, 6 из них разработаны в 2025 году.

Характерно, что в Нидерландах NTA рассматривается как инструмент выработки согласованных требований для последующего регулирования инновационных отраслей. Так, 9 июля 2025 года исполняющая обязанности Министра по вопросам климата и зеленого роста Софи Херманс представила Палате представителей парламента страны доклад «Путь к интероперабельности и энергетической гибкости: разработка стандартов для устройств с высокой нагрузкой на интеллектуальные сети». В нем предлагается разработка NTA для зарядных станций, тепловых насосов, солнечных инверторов и домашних аккумуляторов, при этом NTA для зарядных станций уже разработаны, NTA для тепловых насосов разрабатывается.²⁰

Документы по стандартизации вида соглашений семинаров (рабочих групп) для целей коммерциализации знаний в настоящее время применяются и в других странах, например Швеции и др.

Сегодня даже в жестко регулируемой системе стандартизации КНР происходят изменения, которые должны обеспечить трансфер инноваций с применением инструментов стандартизации. В апреле этого года Государственное управление регулирования рынка КНР (SAMR) опубликовало уведомление № 7 о пересмотренных «Правилах управления национальными руководящими техническими документами по стандартизации». Документ разработан «в целях регулирования разработки и управления национальными руководящими техническими документами по стандартизации, содействия технологическим инновациям и трансформации научно-технических достижений, распространения опыта стандартизации»²¹. Согласно этому документу, «новые технологии с определенными перспективами применения, находящиеся в стадии разработки, могут быть сформулированы как руководящие технические документы» (аналогичные техническим спецификациям). Такой доку-

мент по стандартизации будет иметь код «GB/Z»,²² разрабатываться в течение 6 месяцев и приниматься простым большинством в технических комитетах по стандартизации.

А что же Международная организация по стандартизации (ИСО)? В состав документов ИСО входят соглашения семинара, IWA²³, срок их разработки не более одного года, однако цели гораздо более широкие, чем, например, у CWA. Это в первую очередь быстрая разработка документов по стандартизации в чувствительных сферах, там, где стандарты ИСО по ряду причин не могут быть приняты, поскольку консенсус обеспечить не удастся. В настоящее время действуют 15 соглашений семинара, в 2024 году были приняты два таких документа – IWA 45:2024 IWA «Устойчивые цепочки поставок критически важных минералов» и IWA 48:2024 «Рамки для внедрения принципов экологии, социальной ответственности и управления (ESG)» (предоставляется бесплатно в формате HTML); в текущем году опубликованы IWA 44:2025 «Глобальный медиа-идентификатор (GMI) для каналов распространения и брендов» и IWA 49:2025 «Дружелюбные к детям междисциплинарные и межведомственные службы реагирования для детей, ставших жертвами насилия – требования и рекомендации». Вообще следует иметь в виду, что цели стандартизации, связанные с валоризацией знаний и трансфером инноваций, носят в первую очередь стратегический характер.

Заключение

Таким образом, на сегодняшний день уже накоплен значительный зарубежный и международный опыт разработки документов по стандартизации, направленных на коммерциализацию знаний – спектр этих документов расширяется, а методология их разработки и применения совершенствуется.

В Российской Федерации также внедрены схожие инструменты стандартизации, такие как разработка предварительных национальных стандартов, технических спецификаций (отчетов), однако потенциал применения этих инструментов в полной мере еще не раскрыт, в связи с чем необходимо отметить, что:

1. Опыт разработки и применения таких документов, как CWA, DIN SPEC, UNIPdr и др., требует дополнительного детального изучения и содержит новые возможности для развития национальной системы стандартизации.

2. Применение инструментов стандартизации является эффективным механизмом продвижения инноваций на рынке и служит дополнительным стимулом для технологического развития.

3. Разработка документов по стандартизации на основе результатов выполнения НИОКР и НИР эф-

²² В отличие от обязательных национальных стандартов с кодом «GB» и «рекомендуемых» национальных стандартов с кодом «GB/T».

²³ International Workshop Agreement, IWA.

¹⁸ Procedure NTA,

https://www.nen.nl/media/PDF/Procedure_NTA_0823.pdf

¹⁹ <https://www.nen.nl/verschillende-typen-afspraken>

²⁰ <https://www.nen.nl/nieuws/nen-biedt-routekaart-voor-slimme-apparaten-en-energieflexibiliteit-aan-tweede-kamer/>

²¹ <https://baike.baidu.com/item/%E5%9B%BD%E5%AE%B6%E6%A0%87%E5%87%86%E5%8C%96%E6%8C%87%E5%A7%BC%E6%80%A7%E6%8A%80%E6%9C%AF%E6%96%87%E4%BB%B6%E7%AE%A1%E7%90%86%E8%A7%84%E5%AE%9A/124513>

фективно содействует масштабированию наилучших практик, что ставит задачи по развитию и популяризации деятельности по стандартизации в части инновационной продукции.

4. В настоящее время многие отечественные организации, находящиеся под научно-методическим руководством РАН (институты РАН), научно-исследовательские институты, вузы, то есть носители новых знаний, участвуют в работах по стандартизации. Например, по нашим оценкам около 14% институтов РАН, 14% вузов, 27% исследовательских структур являются членами технических комитетов по стандартизации.

Это значительный ресурс, позволяющий содействовать трансферу инноваций с применением современных инструментов стандартизации, которые предлагаются университетскому и исследовательскому сообществу страны. Дело за малым – освоить действующие инструменты стандартизации на практике для валоризации научных знаний.

Список источников

1. Варавва М.Ю. Ценность и специфика научного знания как экономического ресурса // Вестник ИЭ РАН. 2017. №4. С. 77–89.
2. Карнаух И.В. Становление экономики знаний в России: проблемы и пути решения // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 3: Экономика. Экология. 2019. № 1. С. 66–74.
3. Кочергин Д.Г., Жернов Е.Е. Роль экономики знаний в диверсификации региональной экономики в России // Мир экономики и управления. 2019. № 4. С. 52–65.
4. Каунов Е.Н., Макеева Е.Д. Валоризация научного знания // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Экономика. 2025. № 1. С. 6–18. DOI: 10.18384/2949-5024-2025-1-6-18.
5. Lina Diana. Knowledge valorization in E.U.A critical assessment for Romania // Journal of Public Administration, Finance and Law. 2022, no. 11, pp. 150-157.
6. Baycan T. Knowledge Commercialization and Valorization in Regional Economic Development. Cheltenham, UK: Edward ElgarPublishing. Chapters, in: Tüzün Baycan (ed.), Knowledge Commercialization and Valorization in Regional Economic Development, chapter 1. 2013, pp. 3-20.
7. Coman A.C., Lupu D., & Nuță F. M. The impact of public education spending on economic growth in Central and Eastern Europe. An ARDL approach with structural break // Economic Research-Ekonomska Istraživanja. 2022, pp.1-18. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2022.2086147>.
8. Сидорова А.А. Сотрудничество университетов и бизнеса: направления взаимодействия // Вестник РУДН. Серия: экономика. 2019. Т.27. №2. С. 290-302.
9. Сагиева Г.С. Развитие коммерциализации знаний и технологий в России // ЭКО. 2012. №11. С. 72-87.
10. Балыхин Г.А., Филиппов В.М. Роль управления знанием в устойчивом развитии // Инновационный путь развития регионов России: сб. ст. М.: РУДН, 2014. С. 4-10.
11. Аронов И.З., Рыбакова А.М. Анализ европейского опыта применения инструментов стандартизации для трансфера инноваций // Стандарты и качество. 2021. № 8. С. 28-32.
12. Аронов И.З., Рыбакова А.М. Обзор европейских исследований, посвященных связи инноваций и стандартизации // Стандарты и качество. 2021. № 5. С. 52-57.

References

1. Varavva M.Yu. Value and specificity of scientific knowledge as an economic resource. *Vestnik IE RAN* [Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences]. 2017;(4):77-89.(In Russ.)
2. Karnaukh I.V. Formation of the knowledge economy in Russia: problems and solutions. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3: Ekonomika. Ekologiya* [Bulletin of Volgograd State University. Series 3: Economy. Ecology]. 2019;1:66-74. (In Russ.)
3. Kochergin D.G., Zhernov E.E. The role of the knowledge economy in diversifying the regional economy in Russia. *Mir ekonomiki i upravleniya* [The World of Economics and Management]. 2019;(4):52-65. (In Russ.)
4. Kaunov E.N., Makeeva E.D. Valorization of Scientific Knowledge. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta prosveshcheniya. Seriya: Ekonomika* [Bulletin of the State University of Education. Series: Economy]. 2025;(1):6-18. (In Russ.) DOI: 10.18384/2949-5024-2025-1-6-18.
5. Lina Diana. Knowledge valorization in E.U.A critical assessment for Romania. *Journal of Public Administration, Finance and Law*. 2022;(11):150-157.
6. Baycan T. Knowledge Commercialization and Valorization in Regional Economic Development. Cheltenham, UK: Edward ElgarPublishing. Chapters, in: Tüzün Baycan (ed.), Knowledge Commercialization and Valorization in Regional Economic Development, chapter 1. 2013:3-20.
7. Coman A.C., Lupu D., Nuță F.M. The impact of public education spending on economic growth in Central and Eastern Europe. An ARDL approach with structural break. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*. 2022:1-18. Available at: <https://doi.org/10.1080/1331677X.2022.2086147>.
8. Sidorova A.A. Cooperation of universities and businesses: areas of interaction. *Vestnik RUDN. Seriya: ekonomika* [RUDN Bulletin. Series: Economics]. 2019; 27(2):290-302. (In Russ.)
9. Sagieva G.S. Development of commercialization of knowledge and technologies in Russia. *ECO* [ECO]. 2012;(11):72-87. (In Russ.)
10. Balykhin G.A., Filippov V.M. The role of knowledge management in sustainable development. *Innovatsionniy put razvitiya regionov Rossii: sbornik statey* [Innovative path of development of Russian regions: collection of articles]. Moscow: RUDN, 2014. Pp. 4-10. (In Russ.)
11. Aronov I.Z., Rybakova A.M. Analysis of the European experience of applying standardization tools for innovation transfer. *Standarty i kachestvo* [Standards and quality]. 2021;(8):28-32. (In Russ.)
12. Aronov I.Z., Rybakova A.M. Review of European studies devoted to the relationship between innovation and standardization. *Standarty i kachestvo* [Standards and quality]. 2021;(5):52-57. (In Russ.)

Поступила 06.08.2025; принята к публикации 27.10.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 06/08/2025; revised 27/10/2025; published 25/12/2025

Аронов Иосиф Зиновьевич – доктор технических наук, профессор,
Московский государственный институт международных отношений (университет), Москва, Россия.
Email: aronoviz48@gmail.com. ORCID 0000-0003-0251-1958

Рыбакова Анна Михайловна – кандидат биологических наук, доцент,
Московский государственный институт международных отношений (университет), Москва, Россия.
Email: anna.rybakova57@mail.ru.

Иванов Алексей Владимирович – заместитель генерального директора,
Российский институт стандартизации, Москва, Россия.
Email: a.v.ivanov@gostinfo.ru

Iosif Z. Aronov – DrSc (Eng.), Professor,
Moscow State Institute of International Relations, Moscow, Russia.
Email: aronoviz48@gmail.com. ORCID 0000-0003-0251-1958

Anna M. Rybakova – PhD(Eng.), Associate Professor,
Moscow State Institute of International Relations, Moscow, Russia.
Email: anna.rybakova57@mail.ru.

Aleksey V. Ivanov – Deputy General Director
Russian Standardization Institute, Moscow, Russia.
Email: a.v.ivanov@gostinfo.ru

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.562.64
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-139-146



ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ ДЕФЕКТНОСТИ В ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ШАРОВЫХ ШАРНИРОВ

Столяров Ф.А.¹, Гун И.Г.², Полякова М.А.¹

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

²АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Обеспечение заданного уровня качества автомобильных компонентов отечественного производства является необходимостью и серьезным конкурентным преимуществом при поставках на OEM-предприятие. Шаровые шарниры подвески и рулевого управления являются одними из наиболее ответственных узлов с точки зрения обеспечения безопасности и комфорта эксплуатации транспортного средства. Долговечность шаровых шарниров в эксплуатации зависит от множества факторов, основным из которых на данный момент является обеспечение герметичности в сложных дорожно-климатических условиях Российской Федерации. С этой точки зрения актуальной задачей является задание таких требований к герметичности шарниров, выполнение которых позволило бы обеспечить заданный уровень качества шаровых шарниров в гарантийный период эксплуатации автомобиля. **Цель работы.** Обеспечение заданного уровня качества шаровых шарниров на основе модернизации методики испытания уплотнительной системы на герметичность. **Используемые методы.** Анализ, метод DFMEA, метод «5 почему», метод опережающей стандартизации. **Новизна.** Предложена модернизированная методика испытаний уплотнительной системы шаровых шарниров на герметичность. **Результат.** На основе ужесточения требований и режимов испытания на герметичность была модернизирована конструкция уплотнительной системы шарниров стоек стабилизатора. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволили обеспечить заданный уровень качества в гарантийный период эксплуатации шарниров стоек стабилизатора.

Ключевые слова: опережающая стандартизация, шаровой шарнир, герметичность, методика испытания, гарантийный период эксплуатации

© Столяров Ф.А., Гун И.Г., Полякова М.А., 2025

Для цитирования

Столяров Ф.А., Гун И.Г., Полякова М.А. Практическое применение методов опережающей стандартизации для снижения уровня дефектности в эксплуатации на примере шаровых шарниров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 139-146. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-139-146>



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

PRACTICAL APPLICATION OF ADVANCED STANDARDIZATION METHODS TO REDUCE THE DEFECT LEVEL IN OPERATION USING THE EXAMPLE OF BALL JOINT

Stolyarov F.A.¹, Gun I.G.², Polyakova M.A.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² JSC BelMag, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): Ensuring the specified quality level of domestically produced automotive components is a necessity and a serious competitive advantage when supplying to an OEM enterprise. Suspension and steering ball joints are among the most critical components in terms of ensuring the safety and comfort of vehicle operation. The durability of ball joints in operation depends on many factors, the main one of which at the moment is ensuring tightness in the difficult road and climatic conditions of the Russian Federation. From this point of view, a relevant task is to set such requirements for the tightness of joints, the fulfillment of which would ensure the specified quality level of ball joints during the quality warrant period of vehicle. **Objectives.** The research is aimed at ensuring a specified level of quality of ball joints based on the modernization of the sealing system testing method for tightness. **Methods applied.** The authors used such methods as analysis, DFMEA method, Five whys, forward standardization method. **Originality.** A modernized method for testing the sealing system of ball joints for tightness is proposed. **Result.** Based on the toughening of requirements and testing modes for tightness, the design of the sealing system of the stabilizer link's joints was modernized. **Practical Relevance.** The obtained results made it possible to ensure the specified level of quality during the quality warrant period of operation of the stabilizer links.

Keywords: advanced standardization, ball joint, tightness, test method, warranty period of operation

For citation

Stolyarov F.A., Gun I.G., Polyakova M.A. Practical Application of Advanced Standardization Methods to Reduce the Defect Level in Operation Using the Example of Ball Joint. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 139-146. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-139-146>

Введение

Обеспечение заданного уровня качества автомобильных компонентов отечественного производства играет немаловажную роль в конкурентной борьбе за возможность поставлять продукцию на OEM(original equipment manufacturer)-завод и за долю рынка при продажах в сеть запчастей. На данный момент в связи со сложившейся экономической ситуацией последних лет (санкционная политика, волатильность курса рубля, политика защиты внутреннего рынка) для отечественных, а также зарубежных OEM-производителей особенно актуальна задача повышения уровня локализации входящих в состав автомобиля компонентов. В связи с этим увеличивается уровень спроса на автомобильную продукцию отечественного производства с сохранением уровня качества, заданным зарубежными ведущими поставщиками и автопроизводителями.

Шаровые шарниры подвески и рулевого управления автомобилей являются ответственными узлами [1], поскольку потеря их работоспособности влечет появление аварийных ситуаций, сопряженных с угрозой безопасности потребителя. Помимо обеспечения безопасной эксплуатации, немаловажным остается уровень комфорта водителя, эксплуатирующего транспортное средство. С этой точки зрения шаровые

шарниры, как наиболее подвижные элементы подвески, направляющего аппарата и рулевого управления автомобиля в случае некоторых неисправностей могут издавать посторонние шумы.

Одним из способов достижения заданного уровня качества автокомпонентов, в частности шаровых шарниров, является внедрение принципа комплексной стандартизации, когда регламентируются все требования как к изделию в сборе и его комплектующим, так и к условиям эксплуатации продукта и факторам воздействия на него.

В Российской Федерации к шаровым шарнирам предъявляются обязательные требования со стороны ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств», а также необязательные (применяемые по согласованию сторон) требования ГОСТ Р 52433-2005 «Шарниры шаровые. Технические требования и методы испытаний». Однако стоит отметить, что требования указанных документов сводятся к обеспечению безопасности шарниров в эксплуатации, в частности требования к усилию вырыва, выдавливания, твердости поверхностного слоя шаровых пальцев и т.д. Решению данных вопросов посвящено множество работ отечественных и зарубежных авторов [2-6]. Однако данных требований недостаточно для разработки качественной продукции.

В отечественной и зарубежной литературе [7-9] описываются различные методики испытаний шаровых шарниров на износ, позволяющих определить долговечность. Данные методики заключаются в сложном движении шарового пальца относительно корпуса, подразумевающего одновременное качание и вращение с приложением к шаровому пальцу различных по знаку и направлению нагрузок. Стоит отметить, что предложенные методики не позволяют моделировать реальные условия эксплуатации и многие факторы, оказывающие влияние на долговечность шарового шарнира, а именно пониженные и повышенные температуры, влага, дорожные реагенты, твердые частицы и т.д. В некоторых открытых источниках описываются способы обеспечения герметичности шарниров [10, 11], однако в данных работах уделяется внимание формированию неразъемного шарнирного соединения и герметичности после операции запрессовки или закатки.

Поэтому со стороны OEM-производителей к комплексу предъявляемых дополнительных требований [12, 13], выполнение которых позволит обеспечить надежность в эксплуатации. Однако большинство современных OEM-спецификаций разработаны европейскими компаниями для автомобилей, эксплуатация которых планируется в мягком европейском климате. В связи с этим актуальна задача модернизации требований к автокомпонентам для обеспечения заданного уровня качества в эксплуатации на основе принципов опережающей стандартизации.

Материалы и методы исследования

Большая часть дефектов шаровых шарниров в эксплуатации связана с появлением посторонних шумов, а именно скрипов и стуков, что подтверждается анализом диаграммы распределения по дефектам зарекомендованных стоек стабилизатора (рис. 1). Сами стуки вызваны появлением повышенного свободного перемещения пальца в шарнире (люфта).

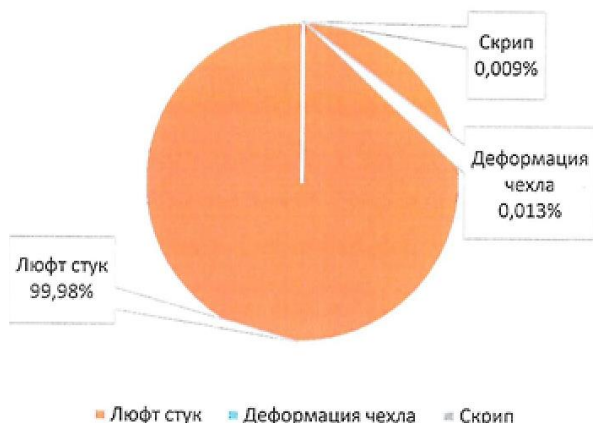


Рис. 1. Распределение типов дефектов шарниров стойки стабилизатора автомобиля LADA Vesta
Fig. 1. Distribution of defect types of the stabilizer link joints of the LADA Vesta car

В данной работе в качестве объекта исследования рассмотрим шаровой шарнир стойки стабилизатора поперечной устойчивости автомобиля LADA Vesta. По результатам многолетней эксплуатации выявлено, что наибольшее число рекламаций приходится именно на шарниры стоек из-за близкого расположения нижнего шарнира к дорожному полотну. В таком случае на нижний шарнир попадает значительное количество пыли, воды, дорожных реагентов и прочего, которые приводят к деградации характеристик шарнира. В таком случае характерными признаками потери герметичности является деградация смазки и наличие ржавчины на сфере шарнира (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид зарекомендованного шарнира стойки стабилизатора

Fig. 2. External view of the warrantly claimed stabilizer link joint

Используя различные методы поиска корневых причин, например 8D, «5 почему», диаграмму Исикавы или FMEA, выявлено, что корневой причиной выхода шарнира из строя является нарушение герметичности уплотнительного соединения, которое состоит из чехла защитного и пружинного и уплотнительного колец (рис. 3).

В большинстве случаев потеря герметичности происходит в области сопряжения защитного чехла с ответными деталями, а именно с пальцем и корпусом (или вкладышем).

Герметичность шарового шарнира является комплексным показателем качества шарового шарнира, зависящим от множества факторов. Данными факторами являются: материал чехла (тип резиновой смеси); способ изготовления детали; геометрия чехла (длина образующей, геометрия гофры, форма горловин, форма заплечика и т.д.). Также важно учитывать применяемую в шарнире марку смазки и геометрию и свойства ответных деталей, а именно пружинного и уплотнительного колец. Геометрия посадочного места и микрорельеф поверхности на корпусе и пальце тоже оказывают значительное влияние на герметичность шарового шарнира, в частности на величину износа в процессе эксплуатации.

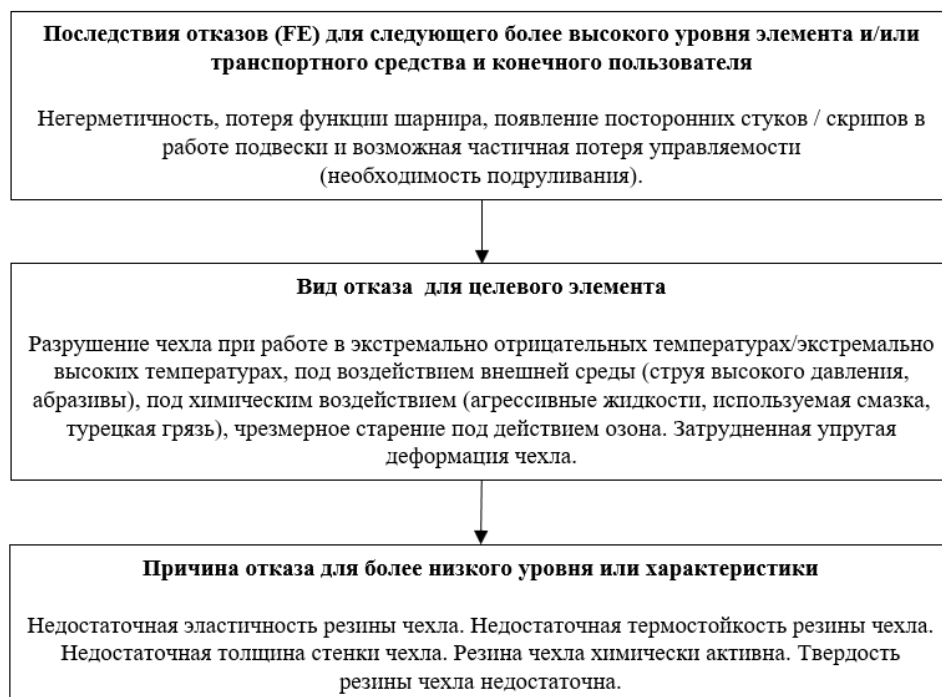


Рис. 3. Выявление корневых причин негерметичности посредством DFMEA-анализа
Fig. 3. Identifying root causes of leaks using DFMEA Analysis

Оценка герметичности уплотнительной системы шаровых шарниров на различных стадиях работы над проектом [12-14] сводится, как правило, к нескольким коротким тестам (длительность менее 8 ч) и нескольким длинным тестам (длительность 8 ч и более). Короткие тесты позволяют выявить ошибки проектирования за небольшой промежуток времени и без значительных затрат на эксперимент, однако полное соответствие продукции критериям положительного результата данных испытаний не дает гарантий безотказной эксплуатации шарниров, в особенности в сложных дорожно-климатических условиях Российской Федерации. Длительные тесты с этой точки зрения позволяют с большей вероятностью говорить о соответствии продукта заданному уровню качества в случае их успешного прохождения. Однако, как было отмечено ранее, большинство OEM-спецификаций и, как следствие, требований к герметичности были разработаны европейскими или американскими компаниями для европейских и американских дорожно-климатических условий. Поэтому иногда при полном соответствии продукции заданным требованиям возникают серьезные проблемы в эксплуатации в дорожной сети и климате Российской Федерации.

В данной работе рассматривается длительное испытание для комплексной оценки герметичности, а именно «SBFT» (Sealing below function test). Методика проведения «SBFT» подразумевает полное погружение шарниров в жидкость и осуществление качания и вращения пальца относительно корпуса по специальным режимам (табл. 1).

Таблица 1. Стандартные режимы «SBFT»
Table 1. Standard modes of SBFT

Параметр	Погружение в воду	Погружение в раствор воды и этиленгликоля
Температура жидкой среды, °C	+23	-15
Угол качания пальца, град	Индивидуально	Индивидуально
Частота качания, Гц	0,1	0,1
Количество циклов качания	10 000	2 500
Угол вращения пальца, град	Индивидуально	Индивидуально
Частота вращения, Гц	0,4	0,4
Количество циклов вращения	40 000	10 000

Само испытание проводится на специализированном испытательном оборудовании для оценки герметичности шаровых шарниров автомобилей (рис. 4).

Для «SBFT» имеются следующие критерии положительного результата:

- отсутствие коррозии пальца шарового в области контакта с защитным чехлом;
- отсутствие свободной воды во внутреннем объеме шарнира;
- отсутствие трещин и расслоений на защитном чехле;
- износ защитного чехла в различных зонах не более заданного значения;
- отсутствие выступания смазки из-под чехла;
- прирост содержания воды в смазке не более 0,6% (определяется по методу Карла-Фишера).



Рис. 4. Испытательный стенд для проверки герметичности шаровых шарниров

Fig. 4. Test bench for checking the tightness of ball joints

Данная методика была применена в процессе работ по проекту для испытания уплотнительной системы шарниров стоек стабилизатора. Были получены удовлетворительные результаты, однако уровень дефектности в поставках составлял 131 дефект на тысячу автомобилей в течение трехлетней эксплуатации, что не укладывалось в цели по качеству.

Исходя из этого, было принято решение о модернизации конструкции уплотнительной системы на основе ужесточения требований к герметичности и модернизации методики испытаний.

Доработка методик проводилась совместно со специалистами АО «АвтоВАЗ» с учетом условий кинематики шарнира и факторов окружающей среды в реальных условиях эксплуатации.

Модернизированы следующие режимы испытаний (табл. 2):

- отрицательная температура понижена до -20°C . В таком случае снижаются упругие характеристики резины чехла, что негативно отражается на плотности прилегания горловин чехла в сопряжении с ответными деталями и увеличении сопротивления упругой деформации гофры чехла;

- увеличена частота вращения пальца при обеих температурах. В таком случае увеличивается модуль упругости резины и сокращается время на гистерезис резины чехла и возврат его формы к начальному положению [15]. В этом случае повышается риск возникновения щели между горловиной чехла и пальцем. Также при увеличении частоты движения и числа циклов повышается риск износа горловины чехла.

Также подобрана концентрация этиленгликоля в растворе с водой для испытания при отрицательной температуре. Выбрана концентрация этиленгликоля 44%, обеспечивающая его максимальную текучесть при минимальной температуре проведения испытаний.

На рис. 5 представлен внешний вид образцов шарниров стоек стабилизатора, установленных в испытательную оснастку.

Таблица 2. Модернизированная методика «SBFT»
Table 2. Modernized modes of SBFT

Параметр	Погружение в воду	Погружение в раствор воды и этиленгликоля
Температура жидкой среды, $^{\circ}\text{C}$	+23	-20
Угол качания пальца, град	Индивидуально	Индивидуально
Частота качания, Гц	0,1	0,1
Количество циклов качания	200 000*	50 000*
Угол вращения пальца, град	Индивидуально	Индивидуально
Частота вращения, Гц	2	2
Количество циклов вращения	200 000	50 000

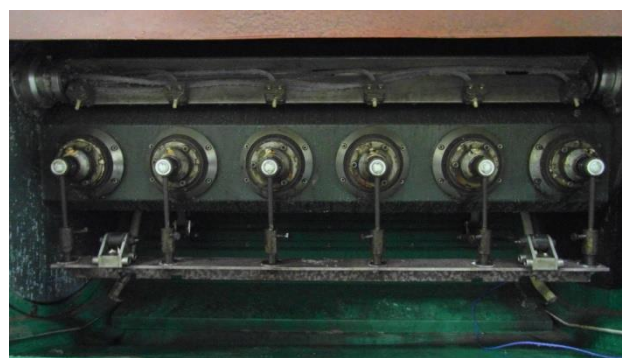


Рис. 5. Фото образцов, установленных в оснастку
Fig. 5. Photos of samples installed in the tooling

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты испытаний различных конструкций уплотнительной системы шарниров стоек стабилизатора представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты проведения испытаний системы уплотнения шаровых шарниров на герметичность

Table 3. Ball joint sealing test results

Тип испытываемой конструкции	Тип методики испытания	
	Стандартная методика (-15 / +23 $^{\circ}\text{C}$)	Модернизированная методика (-20 / +23 $^{\circ}\text{C}$)
Старая конструкция	Приrost содержания воды в смазке 0,09–0,31%	Приrost содержания воды в смазке 1,414–5,772%
Модернизированная конструкция	Приrost содержания воды в смазке 0,03–0,17%	Приrost содержания воды в смазке 0,05–0,16%

На рис. 6 представлен внешний вид образцов после проведения испытания.



Рис. 6. Фотографии образцов после проведения испытания: а – старая конструкция по стандартной методике; б – старая конструкция по модернизированной методике; в – модернизированная конструкция по стандартной методике; г – модернизированная конструкция по модернизированной методике

Fig. 6. Photos of samples after testing: а is old design using standard method, б is old design using modernized method, в is modernized design using standard method, г is modernized design using modernized method

Из таблиц и рисунков видно, что старая конструкция не прошла испытание по модернизированной методике по следующим критериям: содержание воды в смазке более 0,6 %, а также присутствует свободная вода (капли) в пространстве под чехлом и на проточке пальца.

Для оценки корректности количества испытанных образцов необходимо определить минимальное достаточное количество опытов. Минимальное число опытов определяется по формуле [16]

$$n_{\min} \geq \left(\frac{\sigma t}{a \cdot k_t} \right)^2, \quad (1)$$

где \bar{a} – среднее арифметическое; σ – среднеквадратичное отклонение; k_t – требуемая точность измерений в относительных единицах; t – критерий Стьюдента, выбираемый в зависимости от числа проведенных опытов или числа степеней свободы и заданной доверительной вероятности.

Для полученных в результате обработки результатов значений минимальное число опытов составляет 2, что соответствует техническим спецификациям заказчиков OEM-уровня и количеству проведенных опытов для каждого теста: 6.

По результатам испытаний была утверждена измененная конструкция уплотнительной системы шарнира стойки и был произведен запуск серийного производства измененной продукции. По результатам 3-летней эксплуатации выявлено снижение уровня дефектности на 130,6 единиц до 0,4 дефектов в трехлетней эксплуатации на тысячу автомобилей, что соответствует целям по качеству.

Заключение

Таким образом, применение принципов комплексной и опережающей стандартизации на практике позволяет повысить уровень качества производимой продукции в эксплуатации, что и было показано на примере модернизации конструкции уплотнительной системы шаровых шарниров стоек стабилизатора.

Сама модернизация конструкции проводилась на основе ужесточения требований и режимов проведения испытаний на герметичность. В результате была получена продукция, уровень дефектности в эксплуатации которой укладывается в цели по качеству в гарантийный период. Сам подход может быть реализован для всех шаровых шарниров, а также для иных автомобильных компонентов.

Список источников

1. Раймпель Й. Шасси автомобиля: Рулевое управление /пер. с нем. В.Н. Пальянова; под ред. А.А. Гальбрейха. М.: Машиностроение, 1987. 232 с.: ил.
2. Расчетное определение показателей прочности шаровых шарниров элементов шасси автомобиля путём моделирования процесса статических испытаний / И.А. Михайловский, И.Г. Гун, В.В. Сальников [и др.] // Журнал автомобильных инженеров. 2014. № 2(85). С. 20-24.
3. Расчетное определение усилия начала пластической деформации при изгибе пальца шарового наружного рулевого наконечника автомобиля посредством моделирования процесса статических испытаний / Гун И.Г., Вахитов А.Р., Столяров Ф.А., Смирнов А.В., Михайловский И.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №2. С. 23–31.
4. Исследование процесса формирования неразъемных соединений шаровых шарниров легких коммерческих автомобилей / И.Г. Гун, И.Ю. Мезин, И.А. Михайловский, Д.А. Пестерев, Е.Г. Касаткина // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21, № 5(124). С. 24-31.
5. Rutci A., Eren F.S. Investigation of suspension ball joint pull out force based on FEA method and experimental study // International symposium on innovate technologies in engineering and science. Alanya, 2018. Pp. 1002-1009.
6. Sin B.U., Lee K.H. Process Design of a Ball Joint, Considering Caulking and Pull-Out Strength. Dong-A University, Republic of Korea, 2014. Pp. 146-151.
7. Raes S., Devreese T., De Pauw J., De Beets P. Design of A Tribological Ball Joint Tester. 2015. 6(1), pp. 1-5.
8. Гун И.Г., Михайловский И.А., Лапчинский В.В. Проведение испытаний шаровых шарниров передней под-

- вески легковых автомобилей с целью определения эксплуатационного ресурса // Прогрессивные технологии в транспортных системах : сборник докладов Шестой российской научно-технической конференции, Оренбург, 18–20 ноября 2003 года. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2003. С. 75–78.
9. Разработка, моделирование и совершенствование процессов производства шаровых шарниров автомобилей / И.Г. Гун, И.А. Михайловский, Д.С. Осипов [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1(45). С. 52–57.
 10. Tian H.B., Liu X.H., & Yu Z.T. Study on the Ball Joint Sealing of Aluminium Control Arms // Materials Science Forum. 2011, pp. 758–761.
 11. Анализ существующих способов формирования соединения и основные требования к качеству при сборке шаровых шарниров передней подвески автомобилей / Ю.В. Калмыков, И.А. Михайловский, В.В. Сальников, Д.А. Пестерев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 4(28). С. 47–50.
 12. 31-05-123. Environmental sealing test procedure. Sealing bellows function test, Renault, 2007, 13 p.
 13. AK-LH 14. Suspension ball joint. Requirements and testing. Working Committee: AUDI BMW Daimler Chrysler Porsche Volkswagen. 2004. 34 p.
 14. 7832.050.176, Robert Bosch Automotive Steering GmbH. 2016, 55 p.
 15. Семенов В.К., Белкин А.Е. Экспериментальное исследование гистерезисных свойств протекторных резин в условиях циклического нагружения, характерного для автомобильных шин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 2. С. 9–14.
 16. Бойко А.Ф., Кудеников Е.Ю. Точный метод расчета необходимого количества повторных опытов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 8. С. 128–132.
 4. Gun I.G., Mezin I.Yu., Mikhailovskiy I.A., Pesterev D.A., Kasatkina E.G. Study of the process of forming permanent joints of ball joints of light commercial vehicles. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of the Irkutsk State Technical University]. 2017;21(5(124)):24–31. (In Russ.)
 5. Rutci A., Eren F.S. Investigation of suspension ball joint pull out force based on FEA method and experimental study. International symposium on innovate technologies in engineering and science, Alanya. 2018:1002–1009.
 6. Sin B.U., Lee K.H. Process Design of a Ball Joint, Considering Caulking and Pull-Out Strength. Dong-A University, Republic of Korea. 2014:146–151.
 7. Raes S., Devreese T., De Pauw J., De Beets P. Design of A Tribological Ball Joint Tester. 2015;6(1):1–5.
 8. Gun I.G., Mikhailovskiy I.A., Lapchinskiy V.V. Conducting tests of ball joints of the front suspension of passenger cars to determine the service life. *Progressivnye tekhnologii v transportnykh sistemakh : Sbornik dokladov shestoy rossiiskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Progressive technologies in transport systems: Collection of reports of the sixth Russian scientific and technical conference]. Orenburg: Orenburg State University, 2003, pp. 75–78. (In Russ.)
 9. Gun I.G., Mikhailovskiy I.A., Osipov D.S., Kutsependik V.I., Salmikov V.V., Gun E.I., Smirnov A.V., Smirnov A.V. Development, modeling and improvement of production processes for ball joints of automobiles. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014;(1(45)):52–57. (In Russ.)
 10. Tian H.B., Liu X.H., Yu Z.T. Study on the Ball Joint Sealing of Aluminium Control Arms. Materials Science Forum. 2011:758–761.
 11. Kalmykov Yu.V., Mikhailovskiy I.A., Salmikov V.V., Pesterev D.A.. Analysis of existing methods of forming a connection and basic quality requirements for the assembly of ball joints of the front suspension of cars. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009;(4(28)):47–50. (In Russ.)
 12. 31-05-123. Environmental sealing test procedure. Sealing bellows function test, Renault. 2007, 13 p.
 13. AK-LH 14. Suspension ball joint. Requirements and testing. Working Committee: AUDI BMW Daimler Chrysler Porsche Volkswagen. 2004, 34 p.
 14. 7832.050.176. Robert Bosch Automotive Steering GmbH. 2016, 55 p.
 15. Semenov V.K., Belkin A.E. Experimental study of hysteresis properties of tread rubbers under cyclic loading conditions typical for automobile tires. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering]. 2013;(2):9–14. (In Russ.)
 16. Boyko A.F., Kudenikov E.Yu. An accurate method for calculating the required number of repeated experiments. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Vestnik of the Shukhov Belgorod State Technological University]. 2016;8:128–132. (In Russ.)

References

1. Reimpell J. Shassi avtomobilya: *Rulevoe upravlenie* [Car chassis: Steering]. Translated from German by Palyanov V.N., ed. by Galbreikh A.A. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 232 p. (In Russ.)
2. Mihailovskiy I.A., Gun I.G., Salmikov V.V., Kutsependik V.I., Gun E.I., Vdovin D.S. Estimated determination of the strength indicators of ball joints of the vehicle chassis elements by simulating a static test process. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers]. 2014;(2(85)):20–24. (In Russ.)
3. Gun I.G., Vakhitov A.R., Stolyarov F.A., Smirnov A.V., Mikhailovskiy I.A. Calculation of starting force of plastic deformation when bending an outer tie rod ball stud by the simulation of static tests. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(2): 23–31. (In Russ.)

Поступила 03.06.2025; принята к публикации 05.11.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 03/06/2025; revised 05/11/2025; published 25/12/2025

Столяров Федор Алексеевич – аспирант,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: stolyarov.f.a@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7785-8417

Гун Игорь Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, генеральный директор,
АО НПО «БелМаг», Магнитогорск, Россия.
Email: goun@belmag.ru. ORCID 0000-0002-6201-661X

Полякова Марина Андреевна – доктор технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Fedor A. Stolyarov – Postgraduate Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: stolyarov.f.a@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7785-8417

Igor G. Gun – DrSc (Eng), Professor, General Director
JSC BelMag, Magnitogorsk, Russia.
Email: goun@belmag.ru. ORCID 0000-0002-6201-661X

Marina A. Polyakova – DrSc (Eng), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9.0
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-147-155



МЕТОДОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ В ФОРМЕ КОЛПАЧКА, БЛИЗКИХ К РАВНОРАЗМЕРНЫМ, ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЗАГРУЗКИ

Пантюхина Е.В.¹, Богодяж А.Е.¹, Васин С.А.¹, Бахно А.Л.²

¹Тульский государственный университет, Тула, Россия

²ПАО «Императорский Тульский оружейный завод», Тула, Россия

Аннотация. Развитие современных промышленных производств с использованием цифровых технологий требует создания новых подходов к управлению качеством изделий массовых производств на всех этапах их жизненного цикла. Высокие требования к качеству выпускаемых изделий должны способствовать разработке и внедрению в единую систему цифрового управления производственного процесса целого комплекса мер, обеспечивающих не только поддержание требуемого уровня качества изделия, но и его прогнозирование, включая меры по предупреждению причин возникновения брака и его устранению. Одним из важных этапов производственных процессов является автоматическая загрузка в автоматизированное оборудование технологических линий различных заготовок в требуемом положении и с заданной производительностью. Для штучных заготовок широко используют механические дисковые бункерные загрузочно-ориентирующие устройства. В работе представлены методология, позволяющая обеспечить качество изделий в форме колпачка, представляющая собой комплекс современных систем и методов контроля новых технологических процессов их производства, структура систем автоматической загрузки различных изделий в форме колпачка в технологическое оборудование в требуемом положении; показаны этапы разработки конструктивных ограничений на органы захвата и ориентирования изделий механических дисковых бункерных загрузочных устройств, изложена методология исследования и проектирования механических дисковых бункерных загрузочных устройств для изделий в форме колпачка.

Ключевые слова: качество изделий массовых производств, автоматическая загрузка, ориентирование заготовок, бункерное загрузочно-ориентирующее устройство

© Пантюхина Е.В., Богодяж А.Е., Васин С.А., Бахно А.Л., 2025

Для цитирования

Методология обеспечения качества изделий в форме колпачка, близких к равноразмерным, при автоматизации процессов загрузки / Пантюхина Е.В., Богодяж А.Е., Васин С.А., Бахно А.Л. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 147-155. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-147-155>



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

METHODOLOGY FOR ENSURING THE QUALITY OF CAP-SHAPED PRODUCTS CLOSE TO EQUIDIMENSIONAL DURING THE AUTOMATION OF FEEDING PROCESSES

Pantyukhina E.V.¹, Bogodyazh A.E.¹, Vasin S.A.¹, Bakhno A.L.²

¹ Tula State University, Tula, Russia

² PJSC Imperial Tula Arms Plant, Tula, Russia

Abstract. The development of modern industrial production using digital technologies requires the creation of new approaches to quality management of mass produced items at all stages of their life cycle. High requirements for the quality of manufactured products should contribute to the development and implementation of a whole range of measures in a single digital management system of the production process that ensure not only maintaining the required level of product quality, but also its forecasting, including measures to prevent the causes of defects and their elimination. One of the important stages of production processes is the automatic feeding of various blanks into the automated equipment of technological lines in the required position and the specified capacity. Mechanical disk hopper feeding-orienting devices are widely used for piece blanks. The paper presents the methodology that allows to ensure the quality of cap-shaped products, which is a set of modern systems and methods for monitoring new technological processes of their production, the structure of systems for automatic feeding of various cap-shaped products into technological equipment in the required position. The stages of development of design limitations for gripping and orienting elements of products of mechanical disk hopper feeders are shown; the methodology of research and design of mechanical disk hopper loading devices for cap-shaped products is described.

Keywords: quality of mass produced items, automatic feeding, blanks orientation, hopper feeding-orienting device

For citation

Pantyukhina E.V., Bogodyazh A.E., Vasin S.A., Bakhno A.L. Methodology for Ensuring the Quality of Cap-Shaped Products Close to Equidimensional During the Automation of Feeding Processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 147-153. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-147-153>

Введение

Комплексная автоматизация производственных процессов на предприятиях должна осуществляться на основе использования современных компьютерных технологий, систем искусственного интеллекта, контрольно-измерительных приборов, устройств для сбора и передачи данных. Это приведет к повышению эффективности функционирования технологического оборудования, увеличению его производительности и надежности, оптимизации технологических процессов с учетом оптимальных параметров качества выпускаемой продукции. Внедрение цифровых технологий в производственный процесс с целью повышения его эффективности должно опираться на перспективные методы и средства управления качеством изделий на всех этапах жизненного цикла [1–4].

В условиях динамично расширяющейся номенклатуры выпускаемых изделий необходимостью внедрения новых технологий их производства, освоение и выпуск которых должны осуществляться в кратчайшие сроки, необходимо решить множество задач для эффективной реализации производственного процесса [5]. К наиболее важным из них относятся комплексное исследование производства на основе единой цифровой системы менеджмента качества, а также совершенствование и разработка систем автоматической

загрузки изделий, которые необходимо подавать к технологическому оборудованию, в том числе роторным линиям, в заданном положении и с требуемыми производительностью и надежностью [6].

Решение данных задач может включать в себя разработку новой технологии и выбор технологических параметров производства и параметров качества изделий, построение математических моделей процессов производства и функционирования технологического оборудования, прогнозирование параметров качества изделий, проведение экспериментальных исследований.

Анализ деятельности некоторых предприятий, массово выпускающих изделия, позволил выявить проблемы, связанные с отсутствием или формальным внедрением статистических методов управления качеством [7–9]. Это приводит к отсутствию стабильного качества процесса изготовления изделий и, как следствие, высокой доле брака в выпускаемых партиях готовой продукции. Данная ситуация является недопустимой в условиях высокой конкуренции и требует коренной перестройки производства с созданием современной системы менеджмента качества. Такая система должна включать современные цифровые технологии и средства цифровизации, позволяющие собирать, структурировать и обрабатывать большие массивы данных.

Цель настоящей работы – разработка методологии обеспечения качества изделий массовых производств в форме колпачка и разработка систем их автоматической загрузки на базе механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств, позволяющих обеспечить стабильную и производительную загрузку автоматизированного оборудования для процессов вытяжки заготовок, сборки, оценки качества изделий и других операций технологического процесса. Решение поставленных задач базируется на использовании общих принципов системы управления качеством и теории вероятности.

Общая концепция обеспечения качества изделий массовых производств в форме колпачка при автоматической загрузке

Основными составляющими комплексной методологии обеспечения качества изделий массовых производств являются цели, задачи, законы и принципы, методы и функции, технология и практика управления.

Такая структура комплексной методологии обеспечения качества может использоваться как при традиционных технологиях производства изделий, так и при внедрении новых. При этом следует стремиться к тому, чтобы технологический процесс изготовления изделия не был материалоемким, энергоемким и обеспечивал заданные свойства изделий. Например, при изготовлении стальных изделий в форме колпачка предлагается использовать технологический процесс с ключевой операцией полугорячего выдавливания из прутка (рис. 1).

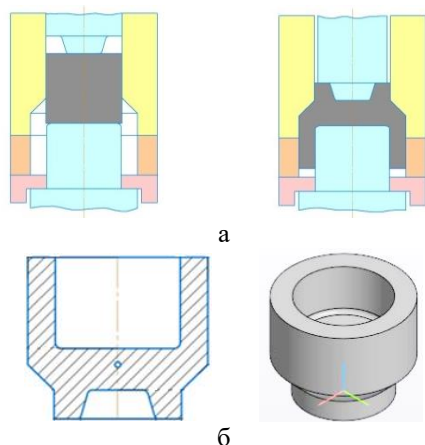


Рис. 1. Этапы двухстороннего полугорячего выдавливания (а) и готовое изделие в форме колпачка (б)

Fig. 1. Double-sided semi-hot extrusion stages (a) and cap-shaped finished product (б)

Изготовление рассматриваемого изделия осуществляется из стального прутка следующим образом [10]. Стальной пруток нарезается на отдельные заготовки 1, которые сначала подвергаются химической и термической обработке, а затем на прессе с помощью

верхнего пуансона 2 и нижнего пуансона 3 осуществляется полугорячее выдавливание с раздачей, результатом которого является готовое изделие в форме колпачка 4. Готовое изделие в дальнейшем должно подаваться в требуемом ориентированном положении на рабочие позиции технологического оборудования (например, для дальнейшей вытяжки, сборки, упаковки) с помощью специальных систем автоматической загрузки (рис. 2).

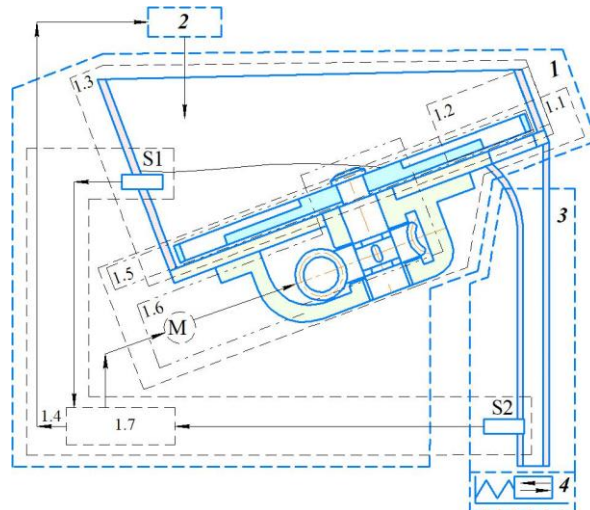


Рис. 2. Структура системы автоматической загрузки штучных изделий

Fig. 2. Structure of the automatic feeding system

Система загрузки состоит из бункерного загрузочно-ориентирующего устройства 1 для ориентирования изделий, включающего захватывающий (1.1), ориентирующий (1.2), бункерный (1.3) и управляющий (1.4) механизмы, органы для захвата (1.5), привод (1.6) и блок управления (1.7), транспортного устройства 2 для подачи изделий в систему, накопительного устройства 3 для обеспечения запаса изделий из-за вероятностного принципа работы бункерного загрузочно-ориентирующего устройства, выдающего устройства 4 для синхронной подачи изделий к рабочим органам оборудования, датчиков контроля уровня засыпки заготовок в бункере бункерного механизма, обеспечивающего необходимый запас заготовок (S1) и переполнения (или опорожнения) накопительного устройства изделиями (S2), а также привода (М).

Усовершенствованное бункерное загрузочно-ориентирующее устройство с криволинейным копиром для изделий в форме колпачка и его основные параметры показаны на рис. 3 [11]. Принцип его функционирования основан на смещении центра масс. Изделия удерживаются в органе захвата, если их центр масс располагается ниже крайней верхней точки захватывающего органа. В противном случае они выпадают из органов захвата в процессе пассивного ориентирования, который в различных бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах реализуется по-разному [12].

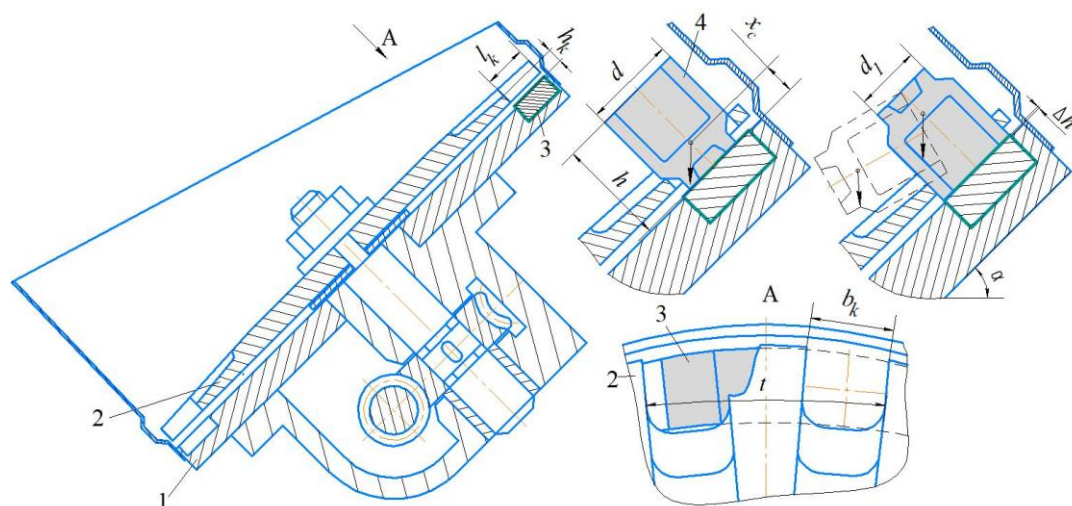


Рис. 3. Усовершенствованное бункерное загрузочно-ориентирующее устройство для изделий в форме колпачка: 1 – основание бункера; 2 – диск с органами захвата; 3 – криволинейный копиер; 4 – изделие в форме колпачка

Fig. 3. Improved hopper feeding-orienting device for cap-shaped products: 1 is hopper base; 2 is disc with gripping elements; 3 is curved cam; 4 is cap-shaped product

Для надежного функционирования усовершенствованного устройства необходимо определить диапазоны конструктивных параметров органов захвата изделий и условия их ориентирования с помощью криволинейного копира.

Захват изделий в бункерном загрузочном устройстве осуществляется в нижней части бункера. Для обеспечения захвата длина l_k и ширина b_k захватывающего органа определяются по известным формулам и зависят от высоты h и диаметра большего d торца изделия. Чем больше размеры захватывающего органа, тем больше вероятность захвата изделий, но при выборе их оптимальных размеров необходимо, чтобы в захватывающие органы одновременно не попали сразу несколько изделий.

Ориентирование изделий происходит в верхней части бункера. Чтобы неправильно захваченные органами захвата изделия выпали обратно в нижнюю часть бункера под действием силы тяжести, а правильно захваченные изделия остались в органах захвата, необходимо определить высоту h_k захватывающих органов. Высота h_k зависит от размеров изделия (высоты h , диаметров большего d и меньшего d_1 торцов, координаты центра масс x_c), угла наклона вращающегося диска α и высоты выступа копира Δh над неподвижным основанием и определяется условием

$$x_c - 0,5d_1 \cdot \cot \alpha + \Delta h \leq h_k \leq h - x_c - 0,5d_1 \cdot \tan \alpha - \Delta h. \quad (1)$$

Размер высоты захватывающих органов должен быть выбран из указанного диапазона в зависимости от параметров изделия и угла наклона бункера [13].

Это обеспечит надежное функционирование устройства при ориентировании изделий.

Для оценки производительности усовершенствованного бункерного загрузочного устройства необходимо разработать математическую модель вероятности захвата. Методология комплексного подхода для оценки производительности и вероятности захвата приведена в работе [14].

Для того чтобы изделие отвечало требованиям качества по свойствам материала и размерам, необходимо реализовать комплекс мер в рамках новой методологии обеспечения качества.

Новая методология обеспечения качества стальных изделий в форме колпачка

Новая методология обеспечения качества стальных изделий в форме колпачка при автоматизации процессов их загрузки включает в себя следующие этапы (рис. 4).

Согласно представленной методологии, на первом этапе осуществляется определение контролируемых показателей качества изделий в форме колпачка, которые могут быть как количественными, так и качественными.

Построение математических моделей процессов производства и функционирования технологического оборудования позволят определить свойства изделий, оптимальные параметры процесса и оборудования. Одновременно с этим создается цифровой двойник изделия [12], в который закладываются его геометрические размеры и свойства материала (например, пределы текучести и прочности) и который позволяет учесть нагружение фактическим давлением и оценить твердость изделия [13].



Рис. 4. Этапы методологии обеспечения качества изделий в форме колпачка

Fig. 4. Stages of cap-shaped product quality assurance methodology

Определение параметров технологического процесса и оборудования, влияющих на показатели качества, позволит обеспечить их значение в пределах поля допуска. При необходимости проектируется новый технологический процесс изготовления изделия с созданием его цифрового двойника.

После изготовления опытных партий с тщательным пооперационным контролем, позволяющим выявить и устранить недостатки технологии, собираются данные статистического контроля по каждому из контролируемых параметров изделия в форме колпачка. Сбор данных реализуется с применением современных оптических систем контроля, которые позволяют получить значения геометрических размеров с высокой точностью и скоростью измерения. Массив полученных данных позволяет обучить и построить искусственную нейронную сеть, применяе-

мую в дальнейшем для прогнозирования параметров качества.

Для прогнозирования параметров качества наиболее производительной искусственной нейронной сетью является многослойный персептрон. Применяв его для прогнозирования наружного диаметра изделия в форме колпачка, на который влияют диаметр прутка, диаметр матрицы выдавливания, диаметры нижнего и верхнего пуансонов, получена нейронная сеть для прогнозирования наружного диаметра колпачка (рис. 5).

Применение на предприятии современных инспекционных контролирующих машин позволит оперативно осуществлять оценку качества большого количества изделий и своевременно принять корректирующее и управляющее воздействие на процесс в случае необходимости.

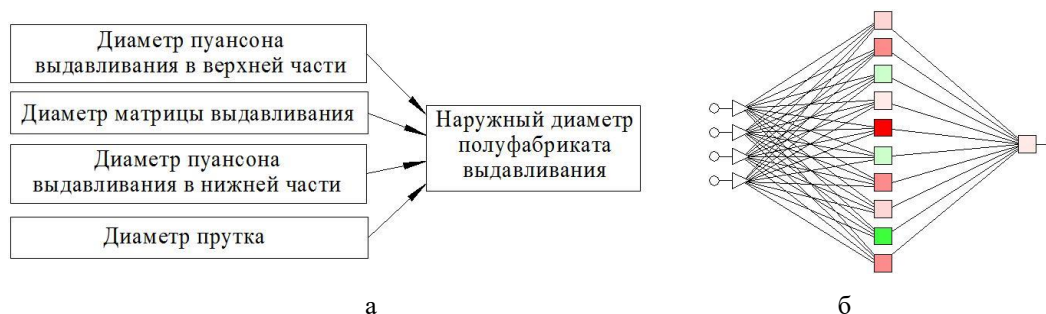


Рис. 5. Схема зависимости наружного диаметра изделий в форме колпачка от влияющих параметров (а) и прогнозирующая искусственная нейронная сеть (б)

Fig. 5. Diagram of dependence of external diameter of cap-shaped products on influencing parameters (а) and predictive artificial neural network (б)

Разработка математической модели производительности усовершенствованного устройства

Для прогнозирования и повышения производительности усовершенствованного бункерного загрузочного устройства на начальных этапах проектирования возникают задачи определения вероятности захвата изделий η и разработки адекватных математических моделей производительности F , которые способны учесть все особенности функционирования устройства, включая вероятностный принцип его работы при захвате изделий:

$$F = \eta \cdot \frac{60v}{t}, \quad (2)$$

где t , v – шаг (см. рис. 3) и окружная скорость органов захвата.

Вероятность захвата η , согласно разработанной концепции, определяется выражением

$$\eta = p_i p_c (1 - \varepsilon \cdot v^4), \quad (3)$$

где p_i , p_c – вероятности нахождения изделий по направлению к органу захвата в положении, благоприятном для захвата, и вероятность того, что захвату не помешает взаимосцепляемость изделий; ε – коэффициент, определяемый предельной окружной скоростью органов захвата, как $v_{пред}$, при которой в карман не успеет запасть ни одно изделие.

Вероятность p_i зависит от той поверхности изделия, которой он должен упасть на вращающийся диск устройства, и той стороны изделия, которой он должен повернуться к органу захвата (рис. 6).

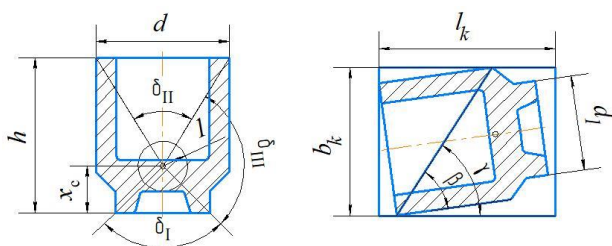


Рис. 6. Расчетные схемы для определения вероятности p_i

Fig. 6. Probability p_i calculation schemes

Каждая из сторон изделия характеризуется углом δ_i , а вероятность падения на данную сторону определится как $p_i = 0,5(1 - \cos 0,5\delta_i)$. С помощью расчетной схемы (рис. 6, а) определяем:

$$\delta_I = 2 \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{a^2}{4b^2}}},$$

$$\delta_{II} = 2 \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{c^2}{4(1-b)^2}}},$$

$$\delta_{III} = 180 - 0,5(\delta_I + \delta_{II}), \quad (4)$$

где $a = d/h$, $b = x_c/h$, $c = d_1/h$.

Затем необходимо определить вероятность $p_{i_{max}}$ и вероятность $p_{i_{min}}$, в которой углы γ и β определяются размерами кармана и изделия с помощью расчетной схемы (рис. 6, б):

$$p_{i_{max}} = p_{II} + \frac{p_{III}}{2\pi} (\delta_{II} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha}),$$

$$p_{i_{min}} = p_{II} + \frac{p_{III}}{2\pi} (\gamma - \beta), \quad (5)$$

где μ – коэффициент трения между изделиями и элементами вращающегося диска устройства.

Зона захвата изделий в усовершенствованном бункерном загрузочном устройстве определяется по формуле

$$\varphi_g = 2 \arccos \frac{\mu \cdot \sin 2\alpha + \mu \cdot \sqrt{\sin^2 2\alpha - 4 \sin^2 \alpha \cdot (1 + \mu^2) \cdot \cos 2\alpha}}{2 \sin^2 \alpha \cdot (1 + \mu^2)}. \quad (6)$$

Вероятность p_i определится по выражению

$$p_i = 1 - (1 - p_{i_{max}})^3 (1 - p_{i_{min}})^{\frac{R\varphi_g}{d}}, \quad (7)$$

где R – радиус диска в зоне расположения органов захвата.

Вероятность p_c определяется по выражению

$$p_c = 1 - \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot \sum F_i} \sum_{i=1}^n \left[\sqrt{\xi_{i_x}^2 + \xi_{i_y}^2} \cdot (F_1 + F_2)_i \right], \quad (8)$$

где F_i , $\sum_{i=1}^n F_i$ – площади каждой из n сторон изделия и их сумма; ξ_i – допустимые углы, на которые можно повернуть два соприкасающихся различными поверхностями изделия по осям x (ξ_{i_x}) и y (ξ_{i_y}), без разъединения с учетом коэффициента трения между изделиями μ_0 .

Коэффициент $\varepsilon = \frac{1}{v_{lim}^4}$ в рассматриваемом усовершенствованном бункерном загрузочном устрой-

стве для изделий в форме колпачка определится по выражению

$$\varepsilon = \frac{1}{v_{\text{lim}}^4} = \quad (9)$$

$$= \frac{1}{g^2 [a + 0,4x_c + 0,8\Delta - 0,2\sqrt{(\sqrt{5}d - 2\Delta + 4x_c)(\sqrt{5}d + 2\Delta + 4x_c)}]^2}.$$

Обобщенная математическая модель производительности с учетом полученных выше выражений имеет следующий вид:

$$F = [1 - (1 - p_{i_{\text{max}}})^3 (1 - p_{i_{\text{min}}})^{\frac{R\varphi_g}{d}}] p_c (1 - \frac{v^4}{v_{\text{lim}}^4}) \cdot \frac{60v}{t}. \quad (10)$$

Методами компьютерного моделирования с помощью полученной математической модели вероятности захвата и производительности устройства было получено, что для изделий с соотношением a от 1,1 до 1,5 максимальная производительность устройства составляет от 160 до 300 шт./мин в зависимости от коэффициента трения.

Математические модели производительности усовершенствованных бункерных загрузочных устройств с вращающимися роликами для полимерных трехсоставных колпачков и ступенчатых изделий с визуализацией были представлены в работах [14, 15]. Полученные теоретически математические модели вероятности захвата и производительности с высокой точностью совпадали с моделями, полученными в результате экспериментальных исследований.

Заключение

В результате проведенных исследований была представлена методология обеспечения качества стальных изделий в форме колпачка, которая может быть применима и к другим видам изделий массовых производств, а также концепция построения математических моделей вероятности захвата и производительности бункерных загрузочно-ориентирующих устройств на примере новых изделий, разработанных для повышения эффективности технологического процесса и требующих автоматизации процесса из загрузки в технологическое оборудование.

В результате анализа были сделаны следующие выводы. Применение перспективных статистических методов в совокупности с современным программным обеспечением с реализацией теории искусственных нейронных сетей, разработка и внедрение цифровых двойников позволяет выстроить на предприятии систему управления качеством, соответствующую тенденциям развития производства в условиях цифровизации. Усовершенствованное бункерное загрузочно-ориентирующее устройство обеспечит надежное ориентирование изделий в форме колпачка при нахождении конструктивных параметров органов захвата в полученных диапазонах. Максимальная производительность усовершенствованного бункерного загрузочно-ориентирующего устройства для

изделий в форме колпачка с соотношением высоты к большему диаметру в диапазоне от 1,1 до 1,5 составляет от 160 до 300 шт./мин.

Список источников

1. Malykhina G.F., Guseva A.I., Militsyn A.V. Spatial-temporal digital twin models as a direction for the development of cross-cutting digital technologies: Advances in Economics, Business and Management Research // Proceedings of the International Scientific-Practical Conference "Business Cooperation as a Resource of Sustainable Economic Development and Investment Attraction" (ISPCBC 2019). 2019. С. 74–77.
2. Rozhok A.P., Zykova K.I., Sushev S.P., et al. The use of digital twin in the industrial sector // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "Innovative Technologies for Environmental Protection in the Modern World" 2021. С. 012032.
3. Управление качеством технологических процессов: монография / Т.Н. Антипова [и др.]. Королёв: Научный консультант, 2015. 189 с.
4. Пантохин О.В., Васин С.А. Цифровые технологии в управлении качеством // Качество, инновации, образование. 2021. № 1. С. 22–27.
5. Пантюхин О.В., Пантюхина Е.В., Дьякова Э.В. Экономические аспекты управления качеством изделий массовых производств // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 1. С. 502–507.
6. Прейс В.В. Надежность автоматических роторно-конвейерных линий для сборки многоэлементных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. № 10. С. 17–22.
7. Методология реализации принципов встроенного качества / Клейменов С.И., Козловский В.Н., Клентак А.С., Антипова О.И. // Стандарты и качество. 2024. № 9. С. 94–100.
8. Горелов А.С. Концепция построения систем автоматизированного статистического контроля продукции массовых производств // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. Тула, 2019. С. 300–303.
9. Морозов В.Б., Горелов А.С. Планирование непрерывного статистического контроля с учетом надежности оборудования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 4. С. 24–29.
10. Лялин В.М., Пещеров А.В. Анализ процесса высокоскоростной полугорячей штамповки выдавливанием // Теория и практика производства проката: сб. науч. тр. Липецк: ЛГТУ, 2001. С. 246–251.
11. Патент на полезную модель № 221163 РФ. Бункерное загрузочно-ориентирующее устройство для объемных заготовок с асимметрией по торцам / В. В. Прейс, Е. В. Пантюхина, Э. В. Дьякова. Заявка № 2023108057 от 30.03.2023; опубл. 23.10.2023, Бюл. № 30.
12. Дьякова Э.В. Способы ориентирования близких к равноразмерным деталей с асимметрией по торцам в механических бункерных загрузочных устройствах // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 10. С. 105–110.

13. Дьякова Э.В., Пантюхина Е.В. Разработка конструктивных ограничений на параметры захватывающих и ориентирующих органов дискового бункерного грузозахватного устройства для асимметричных деталей, близких к равноразмерным // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2023. № 20. С. 125-130.
14. Васин С.А., Пантюхина Е.В. Методика определения вероятности захвата асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных грузозахватно-ориентирующих устройствах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2023. № 3. С. 64-88.
7. Kleimenov S.I., Kozlovskiy V.N., Klentak A.S., Antipova O.I. Methodology for implementing the principles of embedded quality. *Standarty i kachestvo* [Standards and quality]. 2024;(9):94-100 (In Russ.).
8. Gorelov A.S. The concept of building automated statistical control systems for mass production products. *Otechestvennii i zarubezhnyi opyt obespecheniya kachestva v mashinostroenii: sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Domestic and foreign experience of quality assurance in mechanical engineering: collection of reports of All-Russian Scientific and Technical Conference]. Tula, 2019. Pp. 300-303. (In Russ.).
9. Morozov V.B., Gorelov A.S. Planning of continuous statistical monitoring, taking into account the reliability of the equipment. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences]. 2022;(4):24-29. (In Russ.).
10. Lyalin V.M., Peshchero A.V. Analysis of the process of high-speed semi-hot stamping by extrusion. *Teoriya i praktika proizvodstva prokata: sb. nauch. trudov* [Theory and practice of rolled products production: collection of scientific papers]. Lipetsk: LGTU, 2001. Pp. 246-251. (In Russ.).
11. Preys V.V., Pantyukhina E.V., Dyakova E.V. *Bunkernoe zagruzochno-orientiruyushchee ustroystvo dlya obemnykh zagotovok s asimmetriey po tortsam* [Hopper loading and orienting device for bulk workpieces with asymmetry at the ends]. Patent RU, no. 221163, 2023.
12. Dyakova E.V. Methods of orienting parts close to equal-sized with asymmetry at the ends in mechanical hopper loading devices. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences]. 2021;(10):105-110 (In Russ.).
13. Dyakova E.V., Pantyukhina E.V. Development of design constraints on the parameters of the gripping and orienting bodies of a disk hopper loading device for asymmetric parts close to equivalent dimensions. *Transportnoe, gornoe i stroitelnoe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo* [Transport, mining and construction engineering: science and production]. 2023;(20):125-130 (In Russ.).
14. Vasin S.A., Pantyukhina E.V. A method for determining the probability of capturing asymmetric parts of the shape of bodies of rotation in disk hopper loading and orienting devices. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of MSTU named after N.E. Bauman. Mechanical Engineering Series]. 2023;(3):64-88 (In Russ.).

References

1. Malykhina G.F., Guseva A.I., Militsyn A.V. Spatial-temporal digital twin models as a direction for the development of cross-cutting digital technologies: Advances in Economics, Business and Management Research. Proceedings of the International Scientific-Practical Conference "Business Cooperation as a Resource of Sustainable Economic Development and Investment Attraction" (ISPCBC 2019). 2019:74-77.
2. Rozhok A.P., Zykova K.I., Sushev S.P., et al. The use of digital twin in the industrial sector: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. Innovative Technologies for Environmental Protection in the Modern World. 2021:012032.
3. Antipova T.N. et al. *Upravlenie kachestvom tekhnologicheskikh protsessov: monografiya* [Quality management of technological processes: monograph]. Korolyov: Nauchnyi consultant, 2015, 189 p. (In Russ.).
4. Pantyukhin O.V., Vasin S.A. Digital technologies in quality management. *Kachestvo, innovatsii, obrazovanie* [Quality, innovation, education]. 2021;(1):22-27 (In Russ.).
5. Pantyukhin O.V., Pantyukhina E.V., Dyakova E.V. Economic aspects of quality management of mass-produced products. *Izvestiya TulGU. Nauki o zemle* [News of the Tula State University. Earth Sciences]. 2022;(1):502-507 (In Russ.).
6. Preys V.V. Reliability of automatic rotary conveyor lines for assembling multi-element products. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembly in mechanical engineering, instrument engineering]. 2003;(10):17-22 (In Russ.).

Поступила 26.08.2025; принята к публикации 01.09.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 26/08/2025; revised 01/09/2025; published 25/12/2025

Пантюхина Елена Викторовна – доктор технических наук, профессор,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: e.v.pant@mail.ru. ORCID 0000-0003-0200-7321

Богодяж Артем Евгеньевич – соискатель,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: angry@narod.ru.

Васин Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор-консультант,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: vasin_sa53@mail.ru.

Бахно Александр Львович – кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора, ПАО «Императорский Тульский оружейный завод», Тула, Россия.
Email: Bahno.al@tulatoz.ru.

Elena V. Pantyukhina – DrSc (Eng.), Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: e.v.pant@mail.ru. ORCID 0000-0003-0200-7321

Artem E. Bogodyazh – Degree-Seeking Applicant,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: angry@narod.ru.

Sergey A. Vasin – DrSc (Eng.), Consulting Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: vasin_sa53@mail.ru.

Alexander L. Bakhno - PhD (Eng.), First Deputy General Director,
PJSC Imperial Tula Arms Plant, Tula, Russia.
Email: Bahno.al@tulatoz.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.5:629.7
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-156-167



СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Антипов Д.В., Загидуллин Р.С.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация. С каждым годом такие известные производители авиакосмической техники, как SpaceX, Boeing, Airbus, United Launch Alliance, Rocket Lab и др., в конструкциях своих изделий наращивают количество деталей и узлов, получаемых различными технологиями аддитивного производства. Вместе с тем отечественные производители авиакосмической техники еще на этапе 3D-печати первых опытных образцов деталей и узлов столкнулись с различного рода отклонениями (дефектами, неудовлетворительными геометрическими параметрами) вплоть до разрушения конструкций на этапе испытаний и эксплуатации. Инженерно-практический опыт показал, что источники отклонений напечатанных деталей и узлов авиакосмической техники могут быть как на этапах проектирования и изготовления (предпечатной подготовки и 3D-печати), так и на последующих этапах испытания и эксплуатации. Для решения описанной проблемы возникла необходимость разработать новую структурно-функциональную модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства, которая обеспечит выполнение сквозного развертывания требований и качества системы проектирования, изготовления, испытания и эксплуатации изделий. Авторами предложена структурно-функциональная модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства на базе подходов робастного проектирования (QFD, FMEA, MSA, планирование экспериментов по методу Тагути), математических моделей и конструкторско-технологических подходов обеспечения качества, основанных на применении статистических методов и экспериментальных исследований, в соответствии со стандартами авиакосмической отрасли. По предварительным прогнозам, внедрение предложенной модели позволит отечественным производителям авиакосмической техники сократить количество напечатанных дефектных деталей и узлов на 40-45% и сократить сроки разработки на 20-30% за счет сквозного развертывания требований и качества.

Ключевые слова: авиакосмическая техника, аддитивное производство, качество, структурно-функциональная модель, робастное проектирование, конструкторско-технологические подходы, математическая модель

© Антипов Д.В., Загидуллин Р.С., 2025

Для цитирования

Антипов Д.В., Загидуллин Р.С. Структурно-функциональная модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 156-167. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-156-167>



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

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODEL OF QUALITY ASSURANCE OF AEROSPACE ENGINEERING IN CONDITIONS OF ADDITIVE MANUFACTURING

Antipov D.V., Zagidullin R.S.

Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract. Every year, such well-known aerospace manufacturers as SpaceX, Boeing, Airbus, United Launch Alliance, Rocket Lab and others increase the number of parts and units in their product designs obtained using various additive manufacturing technologies. At the same time, domestic manufacturers of aerospace engineering, even at the stage of 3D printing the first prototypes of parts and units, encountered various types of deviations (defects, unsatisfactory geometric parameters) up to the destruction of structures at the testing and operation stage. Engineering and practical experience has shown that sources of deviations in printed parts and units of aerospace engineering can be both at the design and manufacturing stages (pre-printing treatment and 3D printing), and at subsequent stages of testing and operation. To solve the described problem, it became necessary to develop a new structural and functional model for ensuring the quality of aerospace engineering in the context of additive manufacturing, which will ensure the implementation of end-to-end deployment of requirements and quality of the design, manufacturing, testing and operation system of products. The authors propose a structural and functional model for ensuring the quality of aerospace technology in the context of additive manufacturing based on robust design approaches (QFD, FMEA, MSA, planning of experiments using the Taguchi method), mathematical models and design and technological approaches to quality assurance based on the use of statistical methods and experimental studies in accordance with the standards of the aerospace industry. According to preliminary forecasts, the implementation of the proposed model will allow domestic manufacturers of aerospace engineering to reduce the number of printed defective parts and units by 40-45% and reduce lead time by 20-30% due to the end-to-end deployment of requirements and quality.

Keywords: aerospace engineering, additive manufacturing, quality, structural and functional model, robust design, design and technological approaches, mathematical model

For citation

Antipov D.V., Zagidullin R.S. Structural and Functional Model of Quality Assurance of Aerospace Engineering in Conditions of Additive Manufacturing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 156-167. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-156-167>

Введение

Одним из перспективных направлений промышленного производства изделий авиакосмической техники являются аддитивные технологии. Аддитивные технологии по сравнению с субтрактивными технологиями изготовления обладают рядом преимуществ: возможность формирования сложной и нестандартной геометрии, возможность формирования сетчатых и ячеистых структур, исключение технологической оснастки, минимизация трудовых ресурсов и человеческого воздействия в процессе изготовления, минимизация доводочных операций и т.д. [1].

Ярким примером использования аддитивных технологий в авиакосмической отрасли являются зарубежные компании-производители изделий авиакосмической техники SpaceX, Boeing, Airbus, United Launch Alliance, Rocket Lab [2-6]. В то же время отечественные предприятия-производители изделий авиакосмической техники еще на этапе 3D-печати первых опытных образцов деталей и узлов столкнулись с различного рода отклонениями: дефектами (содержание количества дефектных деталей и узлов

может достигать до 40-50% от общего объема), неудовлетворительными геометрическими параметрами (при этом действительные геометрические отклонения могут достигать 60-80% и более от заданных предельных отклонений на номинальный размер), разрушения на этапе наземной экспериментальной обработки (испытаний) и эксплуатации изделий.

Теоретический анализ работ [7-15] по обеспечению качества проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства (АП) показал, что преобладающее большинство отечественных и зарубежных исследований в области обеспечения качества деталей и узлов в условиях аддитивного производства посвящены главным образом отдельным его этапам: проектированию, предпечатной подготовке и изготовлению, то есть не обеспечено сквозное развертывание требований и качества.

При этом инженерно-практический опыт на предприятиях авиакосмической отрасли показал, что источники отклонений могут быть как на этапах проектирования и изготовления (предпечатной подготов-

ки и 3D-печати), так и на этапах испытаний и эксплуатации изделий.

Возникла необходимость разработать структурно-функциональную модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства, которая обеспечит выполнение сквозного развертывания требований и качества системы проектирования, изготовления (предпечатной подготовки и 3D-печати), испытаний и эксплуатации изделий. При этом важно отметить, модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП должна быть разработана в соответствии со стандартами авиакосмической отрасли, регламентирующими разработку, изготовление, испытания и эксплуатацию изделий авиакосмической техники.

Материалы и методы исследования

Структурно-функциональная модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП разработана на основе процессного и риск-ориентированного подходов в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001-2015 [16]. Процессный подход – применение для управления деятельностью и ресурсами организации системы взаимосвязанных процессов [17].

Этапы разработки и изготовления авиакосмической техники в разработанной модели соответствуют ГОСТ 2.103-2013 [18]. Разработанная структурно-функциональная модель обеспечения качества включает в себя стандарты авиакосмической отрасли, методы робастного проектирования, математические модели и методические рекомендации на основе конструкторско-технологических способов обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП.

Анализ стандартов авиакосмической отрасли авторами произведен в информационно-поисковой системе поиска, хранения и использования нормативно-технических документов «NormaCS» [19].

Методы робастного проектирования для разработки модели обеспечения качества включают в себя развертывание (структурирование) функции качества (Quality Function Deployment, QFD), анализ видов и последствий потенциальных несоответствий (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA), метод анализа измерительных систем (Measurement system analysis, MSA), планирование экспериментов по методу Тагути [20].

Подробное описание применения методов QFD, FMEA, MSA представлено в работах [20-22].

Подробное описание применения планирования экспериментов по методу Тагути представлено в ГОСТ Р ИСО 16336-2020 [23].

Конструкторско-технологическими подходами обеспечения качества в настоящей работе являются подходы, основанные на применении экспериментальных исследований и математико-статических подходах обеспечения качества. Примером такого подхода является работа [24], где для повышения качества FDM 3D-печати проведено нивелирование

вариабельности диаметра прутка филамента. Подход в работе [24] основан на экспериментальном поиске технологических параметров FDM-печати с последующими испытаниями на прочность при растяжении и математико-статистической обработкой результатов испытаний.

Математические (цифровые) модели служат для контроля и оптимизации аддитивных технологических процессов (АТП) [25]. Так, например, в работе [26] представлена модель подачи филамента в процессе послойного синтеза. Такая модель позволяет оптимизировать параметры печати, улучшить качество и точность 3D-печати, а также сократить время печати. В работе [27] представлено моделирование механического поведения стохастически армированных композиционных материалов аддитивного производства. Моделирование позволило понять взаимосвязь между микроструктурой материалов и их макроскопическими свойствами, предоставило данные для оптимизации производственных процессов [27].

Графическое представление структурно-функциональной модели построено в векторном графическом редакторе диаграмм и блок-схем Microsoft Visio.

Полученные результаты и их обсуждение

На основе процессного и риск-ориентированного подходов в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001-2015 и ГОСТ 2.103-2013 разработана структурно-функциональная модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства (рис. 1).

На первом этапе производят анализ требований к изделию авиакосмической техники, изложенных в техническом задании (ТЗ) и техническом предложении (ТП): функциональное назначение, свойства изделия, условия эксплуатации, показатели надежности, массогабаритные характеристики, объем выпуска и т.д. На основе результатов анализа принимают решение о целесообразности применения аддитивных технологий (АТ) для изготовления изделия. Рекомендуется за основу принятия указанного решения применять алгоритм на основе схемы, представленный в ГОСТ Р 59037-2020 [1].

Далее проводится анализ:

- 1) требований к изделиям, получаемым методом АТП;
- 2) требований к материалам, используемым в АП;
- 3) требований к оборудованию для АТП;
- 4) требований к квалификации персонала.

Основные и дополнительные требования к изделиям, получаемым методом АТП, указаны в ГОСТ 57586 – 2017 [28]. Однако следует отметить, что необходимо провести дополнительно анализ специальных требований к изделиям авиакосмической техники: радиационная стойкость, стойкость к электрофизическим воздействиям космического пространства, стойкость к воздействию статического электричества, стойкость к термоциклированию и т.д.

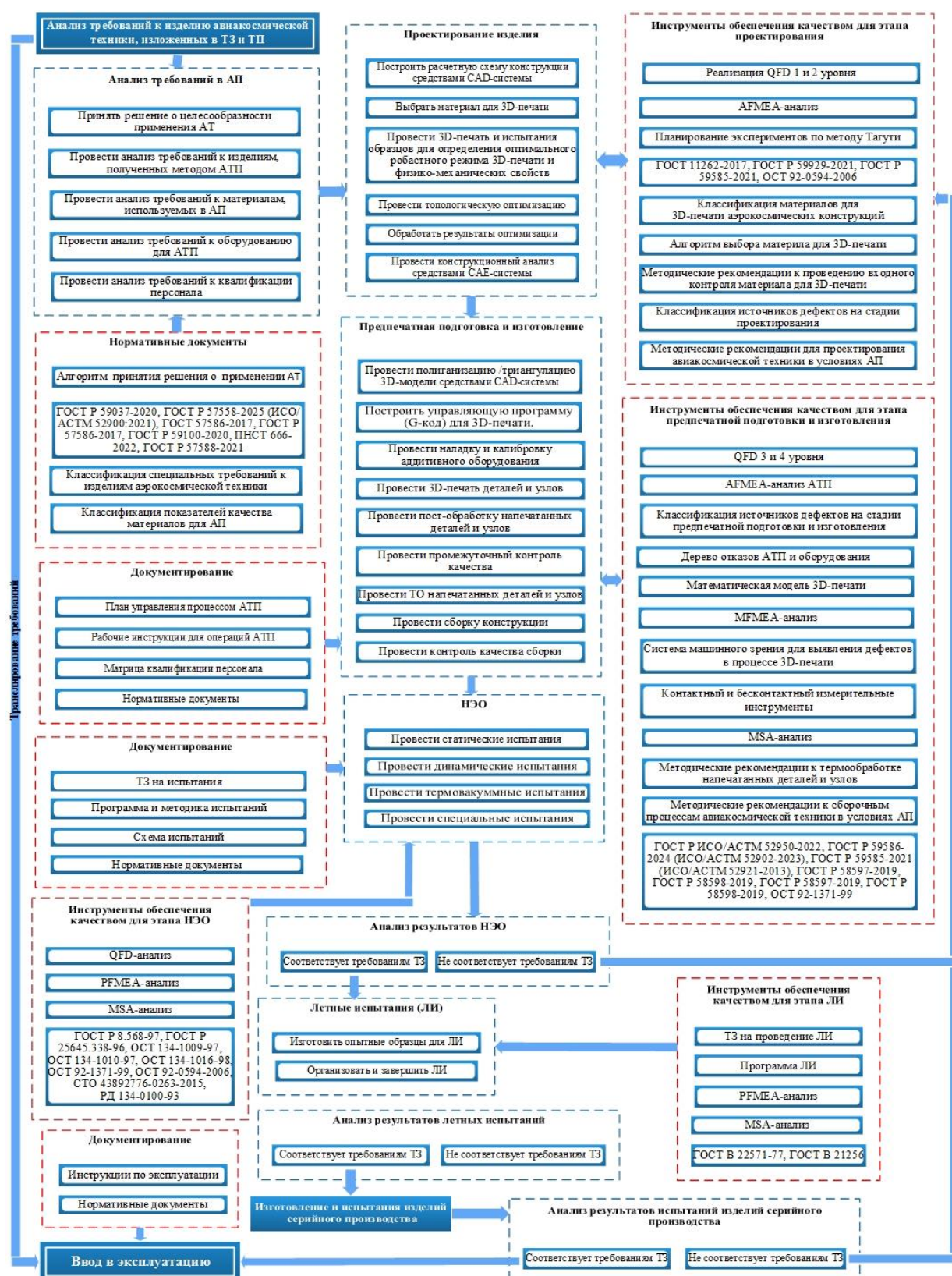


Рис. 1. Структурно-функциональная модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях аддитивного производства

Fig. 1. Structural and functional model of quality assurance of aerospace engineering in the conditions of additive manufacturing

После принятия положительного решения о применении методов АТП для изготовления авиакосмической техники и анализа требований в АП производят проектирование изделия.

На этапе проектирования изделия после реализации QFD 1-го и 2-го уровней и построения средствами CAD-системы расчетной схемы конструкции производят планирование экспериментов по методу Тагути для получения оптимального технологического режима печати по критерию прочности при растяжении, сжатии, изгибе и т.д. (в зависимости от условий эксплуатации изделия).

На рис. 2 продемонстрирована матрица дома качества QFD 1-го уровня для разработки соединительного узла (СУ) датчиков-преобразующей аппаратуры межбакового отсека ракеты-носителя в условиях АП.

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	D demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Column #			
					Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)			
					1	2	3	4
					x	x	▲	▲
				Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")				
					Материал	Тип (традиционная или оптимизированная) конструкции	Уровень унификации материала для изготовления СУ конструкции	Уровень стандартизации и унификации деталей
1	3	11,5	10,0	Требования назначения	○	▲		
2	9	11,5	10,0	Прочность конструкции	○	○		
3	9	11,5	10,0	Жесткость конструкции	○	○		
4	9	10,3	9,0	Требования минимальной массы конструкции	○	○		
5	9	11,5	10,0	Требования живучести и стойкости к внешним воздействиям	○	▲		
6	9	9,2	8,0	Требования к технологичности	○	○	○	○
7	9	8,0	7,0	Требования к материалам	○	▲	○	○
8	3	5,7	5,0	Требования к транспортированию	○			
9	3	10,3	9,0	Экономические требования	○	○	○	○
10	3	10,3	9,0	Требования безопасности	○		▲	▲
Target or Limit Value					ПКМ	Оптимизированная конструкция	100%	100%
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)					1	9	9	6
Max Relationship Value in Column					9	9	9	9
Weight / Importance					617,2	389,7	196,6	148,3
Relative Weight					45,7	28,8	14,5	11,0

Рис. 2. Матрица дома качества QFD 1-го уровня
Fig. 2. QFD Level 1 House of Quality Matrix

В результате проведения QFD 1-го уровня (см. рис. 2) выявлены наиболее важные характеристики конструкции СУ, в наибольшей степени влияющие на прочность и жесткость конструкции, а также на выполнение других требований технического задания:

материал конструкции, тип конструкции СУ (оптимизированная или традиционная).

На рис. 3 продемонстрирована матрица дома качества QFD 2-го уровня для разработки СУ датчиков-преобразующей аппаратуры межбакового отсека ракеты-носителя в условиях АП.

Для реализации (воплощения) характеристик качества СУ (QFD 1-го уровня) идентифицированы наиболее важные характеристики составных частей СУ в результате проведения QFD 2-го уровня: оптимизированная конструкция кронштейна СУ и применение полимерного композиционного материала (ПКМ) для изготовления кронштейна и скобы (рис. 3).

Выбор материала необходимо проводить исходя из классификации материалов для 3D-печати авиакосмических конструкций [29].

Проектирование необходимо проводить согласно методическим рекомендациям к проектированию изделий авиакосмической техники в условиях АП в соответствии с технологическими требованиями 3D-печати: минимальная толщина стенки, угол свеса элементов конструкции и т.д.

Для анализа рисков и потенциальных несоответствий конструкции авиакосмической техники в условиях АП рекомендовано применять AFMEA-анализ (Additive Failure Mode and Effects Analysis) – усовершенствованная методика анализа видов и последствий потенциальных несоответствий процесса 3D-печати [30].

AFMEA-анализ позволяет проводить анализ трех взаимосвязанных последовательных этапов: этап проектирования, этап предпечатной подготовки и этап 3D-печати. Кроме того, на этапе предпечатной подготовки введен новый элемент функционирования этапа процесса – структура 3D-модели, которая позволяет учитывать причины появления несоответствий построения «архитектуры» деталей и узлов в условиях аддитивного производства. AFMEA-анализ рекомендовано производить на основе классификации дефектов на стадии проектирования в условиях АП. Проведение AFMEA-анализа продемонстрировано в работе [30].

На рис. 4 продемонстрирован фрагмент протокола AFMEA-анализа для конструкции СУ из ПКМ для монтажа датчика давления в межбаковом отсеке ракеты-носителя в условиях АП.

На третьем этапе производят предпечатную подготовку и изготовление конструкции изделия авиакосмической техники. Предпечатная подготовка заключается в полигонизации 3D-модели конструкции изделия средствами CAD-системы, процессе разбиения модели на слои (слайсинге), наладке и калибровке аддитивного оборудования.

Перед проведением полигонизации и слайсинга 3D-модели конструкции производят QFD-анализ 3-го и 4-го уровней.

				Column #			
				1	2	3	4
Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)				▲	x	▲	▲
Quality Characteristics (a.k.a. "Hows")				Оптимизированная конструкция кронштейна	Применение ПКМ для изготовления кронштейна и скобы	Стандартных и унифицированных элементов крепления датчика	Стандартные и унифицированные элементы крепления на корпус МБО
Demanded Quality (a.k.a. "Whats")				О	О	▲	▲
Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance				
1	9	45,7	617,2	Материал	О	О	О
2	9	28,8	389,7	Тип (традиционная или оптимизированная) конструкции	О	О	О
3	9	14,5	196,6	Уровень унификации материала для изготовления СЧ конструкции СУ	О	О	О
4	9	11,0	148,3	Уровень стандартизации и унификации деталей	О	О	О
Target or Limit Value				Топологическая оптимизация	Friction Rec	Шаровая СШД 016 ГОСТ 11371-78, болт М5-6x12,66.019	Шаровая СШД 016 ГОСТ 11371-78, болт М5-6x12,66.019
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)				10	5	1	1
Max Relationship Value in Column				9	9	9	9
Weight / Importance				440,1	628,3	144,4	144,4
Relative Weight				32,4	46,3	10,6	10,6

Рис. 3. Матрица дома качества QFD 2-го уровня

Fig. 3. QFD Level 2 House of Quality Matrix

Протокол AFMEA (Additive Failure Mode and Effects Analysis)				
Протокол анализа видов и потенциальных несоответствий 3D-печати				
Планирование и подготовка (Стадия 1)				
	Название организации	Самарский университет		
	Инженерная площадка	Кафедра ПЛА и УМ		
	Потребитель	Отдел эксплуатации РКН		
	Изделие	РН СК серии "Союз"		
	Объект	Соединительный узел для монтажа датчика		
Постоянное улучшение		Структурный анализ (Стадия 2)		
№	История изменений, если приемлемо	1. Процесс создания детали, узла или изделия в условиях аддитивного производства	2. Этап процесса	3. Элемент функционирования этапа процесса (персонал, оборудование, структура 3D-модели, филамент, окружающая среда)
1	
2		Проектирование и изготовление соединительного узла для монтажа датчика давления в МБО РН серии "Союз" в условиях аддитивного производства	Предпочтительная подготовка 3D-модели соединительного узла для монтажа датчика давления в программе-слайсере	1. Специалист по аддитивным технологиям (технолог по 3D-печати печати) 2. Оборудование: графическая станция 3. Программа-слайсер: UltiMaker CURA 5.2.1 4. Структура (строение) объекта 3D-печати 5. Окружающая среда: температура помещения, влажность, освещение и т.д.

Рис. 4. Фрагмент протокола AFMEA-анализа для конструкции соединительного узла из полимерного композиционного материала

Fig. 4 Fragment of the AFMEA analysis protocol for the construction of a connecting unit made of a polymer composite material

На рис. 5 продемонстрирована матрица дома качества QFD 3-го уровня для изготовления СУ датчиков-преобразующей аппаратуры межбакового отсека ракеты-носителя в АП.

Для реализации изготовления оптимизированной конструкции кронштейна соединительного узла из ПКМ применяют АТП, в частности FDM 3D-печать (см. рис. 4).

				Column #		1	2
				Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)		▲	
Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Quality Characteristics (a.k.a. "Hows")		FDM 3D-печать	Традиционное производство
				D demanded Quality (a.k.a. "Whats")			
1	9	32,4	440,1	Оптимизированная конструкция кронштейна			
2	9	46,3	628,3	Применение ПКМ для изготовления кронштейна и скобы			
3	9	10,6	144,4	Стандартных и унифицированные элементы крепления датчика			
4	9	10,6	144,4	Стандартные и унифицированные элементы крепления на корпус МБО			
				Target or Limit Value		Flying Bear Trpado Pro 2	Механическая обработка, штамповка
				Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)		10	1
				Max Relationship Value in Column		9	9
				Weight / Importance		708,5	191,5
				Relative Weight		78,7	21,3

Рис. 5. Матрица дома качества QFD 3-го уровня
Fig. 5. QFD Level 3 House of Quality Matrix

На рис. 6 продемонстрирована матрица дома качества QFD 4-го уровня изготовления СУ датчиков-преобразующей аппаратуры межбакового отсека ракеты-носителя в условиях АП.

Для слайсинга 3D-модели используют технологические параметры 3D-печати, выявленные в процессе проведения планирования экспериментов по методу Тагути на втором этапе.

После проведения слайсинга проводят AFMEA-анализ этапа предпечатной подготовки [30]. AFMEA-анализ этапа предпечатной подготовки рекомендует проводить на основе классификации источников дефектов на стадии предпечатной подготовки и результатов анализа дерева отказов АТП [31].

Для проверки разработанной управляющей программы (результатов слайсинга) проводят математическое моделирование процесса 3D-печати [25-27].

При наладке и калибровке аддитивного оборудования следует учитывать результаты анализа дерева отказов аддитивного оборудования и анализа видов и последствий потенциальных несоответствий оборудования (Machinery Failure Mode Effects and Analysis, MFMEA) [32].

Изготовление конструкции состоит из следующих процессов:

- 3D-печати конструкции изделия;
- пост-обработки напечатанной конструкции;
- промежуточного контроля качества;
- термической обработки (ТО) напечатанной конструкции;
- сборочного процесса (в случае 3D-печати конструкции из двух и более составных частей);
- контроля качества сборки конструкции.

				<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><</div>				
--	--	--	--	--	--	--	--	--

Рис. 6. Матрица дома качества QFD 4-го уровня
Fig. 6. QFD Level 4 House of Quality Matrix

Для выявления дефектов в процессе 3D-печати используют систему компьютерного зрения [33]. Для контроля качества напечатанной конструкции используют контактные (например, цифровой штангенциркуль) и бесконтактные (3D-сканер) измерительные средства измерений. Для повышения качества проведения процесса измерения проводят MSA-анализ.

Процессы ТО и сборки напечатанной конструкции необходимо проводить согласно методическим рекомендациям к ТО и сборке изделий авиакосмической техники в условиях АП на основе экспериментальных исследований и математико-статистических подходов обеспечения качества.

На четвертом этапе проводят наземную экспериментальную отработку (НЭО) напечатанной конструкции изделия авиакосмической техники, которая включает в себя следующие виды испытания:

- 1) статические/зачетные статические испытания;
- 2) динамические/зачетные динамические испытания;
- 3) термовакуумные испытания;
- 4) специальные испытания (испытания на раскрытие, отстыковку и т.д.).

В зависимости от вида изделия авиакосмической техники (космический аппарат, ракета-носитель и т.д.) перечень испытаний может быть дополнен.

Для повышения качества проведения НЭО напечатанной конструкции авиакосмической техники проводят QFD-, FMEA- и MSA-анализы процессов испытаний изделия. После положительных результатов проведения НЭО (в случае отрицательных результатов проводят повторный AFMEA-анализ и доработку конструкции) изготавливают образцы конструкции авиакосмической техники для летных испытаний (ЛИ) на основе программы ЛИ в соответствии ТЗ. Перед проведением ЛИ проводят анализ рисков и потенциальных несоответствий процесса проведения ЛИ (PFMEA-анализ).

После положительных результатов проведения ЛИ (в случае отрицательных результатов проводят повторный AFMEA-анализ и доработку конструкции) проводят изготовление и испытания серийных изделий авиакосмической техники и ввод в эксплуатацию. Эксплуатацию серийных изделий авиакосмической техники проводят в соответствии с инструкциями по эксплуатации, учитывающими особенности изготовления АП. На протяжении всего срока этапа эксплуатации серийных изделий авиакосмической техники производят постоянное совершенствование конструкции на основе FMEA-анализа.

Как видно из рис. 1, на каждом этапе разработанной модели обеспечения качества учтены стандарты авиакосмической отрасли и АП.

В работе [34] для контроля и повышения качества 3D-печати разработан и рассмотрен усовершенствованный метод «Шесть сигм» для АП. Авторы работы [35] предложили комплексный подход к обеспечению

качества АП на основе интеграции компьютерной томографии с метрологическим программным обеспечением GOM. В работе [36] рассмотрена концепция виртуального обеспечения качества деталей при АП на основе цифрового двойника. Автором работы [37] разработана и предложена методика обеспечения качества АП на основе применения статистических методов регулирования потока процесса и алгоритма выбора материала для 3D-печати.

В настоящей работе, в отличие от вышеперечисленных работ [34-37], обеспечение качества авиакосмической техники в условиях АП предложено производить в рамках модели обеспечения качеством, которая включает в себя стандарты авиакосмической отрасли, методы робастного проектирования (QFD, FMEA, MSA, планирование экспериментов по методу Тагути), математические модели и методические рекомендации на основе конструкторско-технологических способов обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП.

Заключение

Таким образом, разработана структурно-функциональная модель обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП на основе процессного и риск-ориентированного подходов, которая включает в себя стандарты авиакосмической отрасли, методы робастного проектирования, математические модели и методические рекомендации на основе конструкторско-технологических способов обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП.

Предварительная оценка результатов апробации предложенной модели на предприятии-производителе авиационно-космической техники Самарской области показала, что внедрение модели позволит отечественным производителям авиакосмической техники сократить количество напечатанных дефектных деталей и узлов на 40-45% и сократить сроки разработки на 20-30% за счет сквозного развертывания требований и качества.

Дальнейшие исследования направлены на математическое описание и моделирование процессов разработанной структурно-функциональной модели обеспечения качества авиакосмической техники в условиях АП.

Список источников

1. ГОСТ Р 59037-2020. Аддитивные технологии. Конструирование металлических изделий. Руководящие принципы. М.: Стандартинформ, 2020. 11 с.
2. Additive manufacturing of structural materials / L. Guo, Z. Xiaofeng, C. Xuliang and others // Materials Science and Engineering: Reports. 2021, vol. 145, 67 p. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100596/>.
3. Malfitano B. Evaluation and implementation of additive manufacturing technologies for structural applications // Proceedings of the International Committee on Aeronautical Fatigue (ICAF2017) and Structural Integrity 36th Conference & 29th Symposium. 2017. С.1154-1155.

4. Евтодьева М.Г. Аддитивное производство и дополненная реальность как новые производственные технологии в авиационной отрасли // Вестник МГИМО-Университета. 2020. № 13(5). С. 307-330.
5. Кулик В.И., Нилов А.С. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники: учеб. пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2018. 160 с.
6. Sung W., Sivagaminathan B., Stupples D. Composites Additive Manufacturing for Space Applications: A Review. *Materials*. 2022, vol. 15(13), 4709. DOI: 10.3390/ma15134709.
7. Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method / Heidari-Rarani M., Ezati N., Sadeghi P., Badrossamay M. // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2022, vol. 5(12), pp. 2435-2452. DOI:10.1177/0892705720964560.
8. Kam M., Ipekci A., Sengul O. Investigation of the effect of FDM process parameters on mechanical properties of 3D printed PA12 samples using Taguchi method // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2021, vol. 36, issue 1, pp. 307-325. DOI:10.1177/08927057211006459.
9. Vishal W., Darshit J., Akshata J., Experimental investigation of FDM process parameters using Taguchi analysis / C. Rakesh // *Materials Today: Proceedings*. 2020, vol. 27, part 3, pp. 2117-2120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.078>.
10. Buranska E., Meszaros D. Risk analysis of the 3D printer // *Proceedings of 10th International Conference, Bratislava*. 2020, pp. 35-42.
11. Andreasson J., Fredriksson J. The construction of a shredder for discarded PLA: A machine construction // Independent thesis, Malardalen University, School of Innovation, Design and Engineering. 2022. Access at: <https://www.divaportal.org/smash/record.jsf?dsid=1977&pid=diva2%3A1636704> (Accessed October 10, 2025).
12. Study of the Technical Feasibility and Design of a Mini Head Screw Extruder Applied to Filament Deposition in Desktop 3-D Printer / Zilda C.S., Matheus S.F., Paulo I.N., Jorge S. // *Key Engineering Materials*. 2014, vol. 572, pp. 151-154. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.572.151.
13. Efrain Rodriguez E., Alvares A., Jaimes C. Conceptual design and dimensional optimization of the linear delta robot with single legs for additive manufacturing // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2019, vol. 233, issue 7, pp. 443-450. DOI:10.1177/0015732515680408.
14. Developing an open source, inexpensive, large-scale polar configuration 3D printer / Deshpande S.P., Kulkarni S., Shah S., Irwin J. // *International journal of engineering research and innovation*. 2019, vol. 11, no. 1, pp. 13-22.
15. Patel P.K. Overview of 3D-printing Technology: History, Types, Applications and Materials // *Additive Manufacturing with Medical Applications*. 2022, pp. 243-264.
16. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 32 с.
17. Управление процессами системы менеджмента качества на предприятиях машиностроения: учеб. пособие / В.А. Барвинок, Ю.С. Ключков, В.П. Самохвалов и др.; под общ. ред. чл.-кор. РАН, д-ра техн. наук, проф. В.А. Барвинка. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. 380 с.
18. ГОСТ 2.103-2013. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. М.: Стандартинформ, 2019. 10 с.
19. Каталог документов NormaCS. URL: <https://www.normacs.ru/Doclist> (дата обращения: 07.05.2025).
20. Дмитриев А.Я., Вашуков Ю.А., Митрошкина Т.А. Робастное проектирование и технологическая подготовка производства изделий авиационной техники: учеб. пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2016. 76 с.
21. Dmitriev A., Mitroshkina T. Improving the efficiency of aviation products design based on international standards and robust approaches // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 476, 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/476/1/012009.
22. Dmitriev A., Mitroshkina T., Rogachev G. Structural and parametric analysis of robust design quality of complex technical systems // *ITM WEB OF CONFERENCES*. 2017, vol. 10, 01001. DOI: 10.1051/itmconf/20171001001.
23. ГОСТ Р ИСО 16336-2020. Статистические методы. Применение к новым технологиям и процессу разработки продукции. Робастное параметрическое проектирование (RPD). М.: Стандартинформ, 2020. 70 с.
24. Загидуллин Р.С., Жуков В.Д., Родионов Н.В. Экспериментальное исследование и способ повышения качества FDM 3D-печати за счет нивелирования вариативности диаметра прутка филамента // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023. Вып. 5. С. 265-271.
25. Чабаненко А.В. Обеспечение качества аддитивного производства посредством моделирования процессов печати // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2024. № 4. С. 33-39.
26. Чабаненко А.В. Модель подачи полимера в процессе послойного синтеза // XXVI Международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы»: сб. ст. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 2023. Т. 3. С. 198-202.
27. Чабаненко А.В. Моделирование механического поведения стохастически армированных композиционных материалов аддитивного производства // Всероссийская научная конференция «Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем»: сб. докл. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 2024. С. 226-230.
28. ГОСТ Р 57586 – 2017. Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.
29. Антипов Д.В., Загидуллин Р.С. Разработка классификации полимерных и композиционных материалов для изготовления авиакосмической техники в условиях аддитивного производства // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2025. Т. 27. № 1 (123). С. 12-23.
30. Загидуллин Р.С. Совершенствование модели обеспечения качества проектирования и изготовления деталей и узлов аэрокосмических конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях аддитивного производства: дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2023. 174 с.

31. Zagidullin R.S., Zezin N.I., Rodionov N.V. Improving the quality of FDM 3D printing of UAV and aircraft parts and assemblies by parametric software changes // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021, vol. 1027, 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/1027/1/012031.
32. Zagidullin R.S., Antipov D.V., Dmitriev A.Ya. and others Development of a methodology for eliminating failures of an FDM 3D printer using a “failure tree” and FMEA analysis // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1925, 012085. DOI: 10.1088/1742-6596/1925/1/012085.
33. Чабаненко А.В. Автоматическое распознавание дефектов с использованием компьютерного зрения // XXVI Международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы»: сб. ст. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, 2023. Т. 3. С. 314–317.
34. Six-Sigma Quality Management of Additive Manufacturing / H. Yang, R. Prahalad, S. Timothy and others // Proceedings of the IEEE. 2021, vol. 109, no. 4, pp. 347–376. DOI: 10.1109/JPROC.2020.3034519.
35. Advanced Quality Assurance of Additive Manufacturing Through Computed Tomography / M. Jałowiec, E. Walcher, O. Bodur // Industrial Engineering in the Industry 4.0 Era. ISPR 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2024, 176–199. DOI: 10.1007/978-3-031-53991-6_14.
36. Хомяков Н.В. Концепция виртуального контроля качества деталей при аддитивном производстве на основе цифрового двойника // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. № 2. С. 163–169. doi: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-163-169.
37. Чабаненко А.В. Модели и методики обеспечения качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 18 с.
6. Paek S. W., Balasubramanian S. and Stupples D. Composites additive manufacturing for space applications: A review. Materials. 2022;15(13):4709. DOI: 10.3390/ma15134709.
7. Heidari-Rarani M., Ezati N., Sadeghi P., Badrossamay M. Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2022;5(12):2435–2452. DOI: 10.1177/0892705720964560.
8. Kam M., Ipekci A., Sengul O. Investigation of the effect of FDM process parameters on mechanical properties of 3D printed PA12 samples using Taguchi method. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2021;36(1):307–325. DOI: 10.1177/08927057211006459.
9. Vishal W., Darshit J., Akshata J., Rakesh C. Experimental investigation of FDM process parameters using Taguchi analysis. Materials Today: Proceedings. 2020;27(3):2117–2120. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.078.
10. Buranska E., Meszaros D. Risk analysis of the 3D printer. Proceedings of 10th International Conference, Bratislava. 2020;35–42.
11. Andreasson J., Fredriksson J. The construction of a shredder for discarded PLA: A machine construction. Independent thesis, Malardalen University, School of Innovation, Design and Engineering. 2022. Available at: https://www.divaportal.org/smash/record.jsf?dsid=1977&pid=diva2%3A1636704 (Accessed October 10, 2025).
12. Zilda C.S., Matheus S.F., Paulo I.N., Jorge S. Study of the Technical Feasibility and Design of a Mini Head Screw Extruder Applied to Filament Deposition in Desktop 3-D Printer. Key Engineering Materials. 2014;572:151–154. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.572.151.
13. Efrain Rodriguez E., Alvares A., Jaimes C. Conceptual design and dimensional optimization of the linear delta robot with single legs for additive manufacturing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2019;233(7):443–450. DOI: 10.1177/0015732515680408.
14. Deshpande S.P., Kulkarni S., Shah S., Irwin J. Developing an open source, inexpensive, large-scale polar configuration 3D printer. International journal of engineering research and innovation. 2019;11(1):13–22.
15. Patel P.K. Overview of 3D-printing Technology: History, Types, Applications and Materials. Additive Manufacturing with Medical Applications. 2022;243–264.
16. State standard GOST R ISO 9001-2015. Quality management system. Requirements. Moscow: Standards Publishing House, 2015, 32 p. (In Russ.)
17. Barvinok V.A., Klochkov Yu.S., Samokhvalov V.P. et al. *Upravlenie protsessami sistemy menedzhmenta kachestva na predpriyatiyah mashinostroeniya: uchebnoe posobie* [Management of processes of quality management system at the enterprises of mechanical engineering: study guide]; edited by general editor Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor V.A. Barvinok. Samara: Publishing house of the Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences, 2012, 380 p. (In Russ.)
18. State standard GOST 2.103-2013. Unified system of design documentation. Development stages. Moscow: Standards Publishing House, 2019, 10 p. (In Russ.)

References

1. State standard GOST R 59037-2020 Additive technologies. Designing metal parts. Guidelines processes. Moscow: Standards Publishing House, 2020, 11 p. (In Russ.)
2. Guo Liu, Xiaofeng Zhang, Xuliang Chen, Yunhu He, Lizi Cheng, Mengke Huo, Jianan Yin, Fengqian Hao, Siyao Chen, Peiyu Wang Additive manufacturing of structural materials. Materials Science and Engineering: R: Reports. 2021;145:67. DOI: 10.1016/j.mser.2020.100596.
3. Malfitano B. Evaluation and implementation of additive manufacturing technologies for structural applications. Proceedings of the International Committee on Aeronautical Fatigue (ICAF2017) and Structural Integrity 36th Conference & 29th Symposium, June 5th–9th. 2017;1154–1155.
4. Evtodyeva M.G. Additive production and augmented reality as new production technologies in the airline industry. *Vestnik MGIMO-UNIVERSITETA* [MGIMO Review of International Relations]. 2020;13(5):307–330 (In Russ.)
5. Kulik V.I., Nilov A.S. *Additivnye tekhnologii v proizvodstve izdeliy aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhniki: uchebnoe posobie* [Additive technologies in production of products of aviation and the missile and space equipment: study guide]. St. Petersburg: Baltic State Technical University, 2018, 160 p. (In Russ.)

19. NormaCS Document Catalog. Available at: <https://www.normacs.ru/Doclist> (Accessed May 7, 2025).
20. Dmitriev A.Ya., Vashukov Yu.A., Mitroshkina T.A. *Robastnoe proektirovanie i tekhnologicheskaya podgotovka proizvodstva izdeliy aviatsionnoy tekhniki: uchebnoe posobie* [Robust design and technological preparation of production of aviation equipment: study guide]. Samara: SSAU Publishing House, 2016, 76 p. (In Russ.)
21. Dmitriev A., Mitroshkina T. Improving the efficiency of aviation products design based on international standards and robust approaches. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019;476:012009. DOI: 10.1088/1757-899X/476/1/012009.
22. Dmitriev A., Mitroshkina T., Rogachev G. Structural and parametric analysis of robust design quality of complex technical systems. ITM WEB OF CONFERENCES. 2017;10:01001. DOI: 10.1051/itmconf/20171001001.
23. State standard GOST R ISO 16336-2020. Statistical Methods. Application to New Technologies and Product Development Process. Robust Parametric Design (RPD). Moscow: Standards Publishing House, 2020, 70 p. (In Russ.)
24. Zagidullin R.S., Zhukov V.D., Rodionov N.V. Experimental study and method for improving the quality of FDM 3D printing by leveling the variability of the filament rod diameter. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2023;5:265-271. (In Russ.)
25. Chabanenko A.V. Quality assurance of additive production by means of modeling of processes of the press. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2025;4:33-39. (In Russ.)
26. Chabanenko A.V. Model of supply of polymer in the course of layer-by-layer synthesis. *XXVI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy»: sbornik statey* [XXVI International scientific conference "Wave Electronics and Information and communication Systems": collection of articles]. Publishing house: St. Petersburg State University of space instrument making. 2023;3:198-202. (In Russ.)
27. Chabanenko A.V. Modeling of mechanical behavior stochastically reinforced composition materials of additive production. *Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya «Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem»: sb. dokl.* [All-Russian scientific conference "Modelling and Situational Quality Management of Complex Systems": collection of articles]. Publishing house: St. Petersburg State University of space instrument making. 2024;226-230. (In Russ.)
28. State standard GOST R 57586 – 2017. The products received by method of additive technology processes. General requirements. Moscow: Standartinform, 2019, 8 p. (In Russ.)
29. Antipov D.V., Zagidullin R. S. Development of classification of polymeric and composition materials for production of aerospace equipment in the conditions of additive production. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoy akademii nauk* [News of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2025;27(1(123)):12-23. (In Russ.)
30. Zagidullin R.S. Sovershenstvovanie modeli obespecheniya kachestva proektirovaniya i izgotovleniya detaley i uzlov aero-kosmicheskikh konstruktsey iz polimernykh kompozitsionnykh materialov v usloviyakh additivnogo proizvodstva: dis. na soiskanie uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk [Improvement of model of quality assurance of design and production of parts and nodes of space designs from polymeric composition materials in the conditions of additive production: Ph.D. dissertation]. Samara, 2023. 174 p.
31. Zagidullin R.S., Zezin N.I., Rodionov N.V. Improving the quality of FDM 3D printing of UAV and aircraft parts and assemblies by parametric software changes. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021;1027:012031. DOI: 10.1088/1757-899X/1027/1/012031.
32. Zagidullin R.S., Antipov D.V., Dmitriev A.Ya. Development of a methodology for eliminating failures of an FDM 3D printer using a "failure tree" and FMEA analysis. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1925:012085. DOI: 10.1088/1742-6596/1925/1/012085.
33. Chabanenko A.V. Automatic recognition of defects with use of computer sight. *XXVI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy»: sbornik statey* [XXVI International scientific conference "Wave Electronics and Information and communication Systems": collection of articles]. Publishing house: St. Petersburg State University of space instrument making. 2023;3:314-317. (In Russ.)
34. Yang H., Rao P., Simpson T., Lu Y., Witherell P., Nassar A.R., Reutzel E., Kumara S. Six-Sigma Quality Management of Additive Manufacturing. *Proceedings of the IEEE*. 2021;109(4):347-376. DOI: 10.1109/JPROC.2020.3034519.
35. Jafowiec M., Walcher E., Bodur O., Gunther P., Martin K., Bayrakci M. Advanced Quality Assurance of Additive Manufacturing Through Computed Tomography. *Industrial Engineering in the Industry 4.0 Era (ISPR 2023)*. 2024;179-199. DOI: 10.1007/978-3-031-53991-6_14.
36. Homyakov N.V. The concept of virtual quality control of parts by additive production on the basis of the digital twin. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;22(2):163-169. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-163-169. (In Russ.)
37. Chabanenko A.V. Modeli i metodiki obespecheniya kachestva korpusnykh ehlementov, vypolnennykh po additivnym tekhnologiyam: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Models and techniques of quality assurance of the case elements executed on additive technologies: Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Saint Petersburg, 2019, 18 p.

Поступила 24.06.2025; принята к публикации 20.10.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 24/06/2025; revised 20/10/2025; published 25/12/2025

Антипов Дмитрий Вячеславович – доктор технических наук, профессор,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.
Email: antipov.dv@ssau.ru. ORCID 0000-0002-1497-3394

Загидуллин Радмир Салимьянович – кандидат технических наук, старший преподаватель,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия.
Email: Zagidullin_Radmir@mail.ru. ORCID 0000-0002-3175-8573

Dmitry I. Antipov –DrSc (Eng.), Professor,
Samara National Research University, Samara, Russia.
Email: antipov.dv@ssau.ru. ORCID 0000-0002-1497-3394

Radmir S. Zagidullin – PhD(Eng.), Senior Lecturer,
Samara National Research University, Samara, Russia.
Email: Zagidullin_Radmir@mail.ru. ORCID 0000-0002-3175-8573



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 006.91:519.21
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-168-174

АНАЛИЗ СТРАТЕГИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ

Ивахненко А.Г.¹, Аникеева О.В.², Исламова О.В.³, Разумова А.И.¹

¹ Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

² ФКП «Курская биофабрика – фирма «БИОК», Курск, Россия

³ Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Эффективное и результативное функционирование систем менеджмента предприятий обусловлено надежной работой системы метрологического обеспечения измерений. В практике управления качеством накоплен значительный опыт использования семейства методологий IDEF для графического представления взаимосвязанных и взаимодействующих процессов. С использованием методологии IDEF3 авторами ранее было выполнено исследование вероятностных характеристик во времени только для некоторых сочетаний перекрестков и выход на установившиеся значения вероятностей, то есть переход в функционирование в стационарном режиме осуществлялся лишь эмпирически. **Цель работы и методы исследования.** Целью работы является поддержка принятия управленческих решений по выбору структуры и параметров системы метрологического обеспечения измерений, соответствующих возможным стратегиям ее функционирования на основе анализа установившихся значений вероятностей выполнения процессов. В статье на основе ранее разработанной в нотации IDEF3 обобщенной графической модели системы метрологического обеспечения предприятий определены восемь стратегий ее функционирования. Для каждой стратегии получены зависимости для расчетов установившихся значений вероятностей выполнения процессов цикла системы метрологического обеспечения. **Новизна. Результаты.** На основе проведенных расчетов выполнено ранжирование восьми стратегий функционирования системы метрологического обеспечения измерений по принципу от лучшей к худшей для различных значений вероятностей выполнения блоков работ. Отмечено, что при значениях всех вероятностей выполнения блоков работ, равных единице, все стратегии являются равноправными. **Практическая значимость.** Сформулированы обоснованные рекомендации применения стратегий функционирования системы метрологического обеспечения измерений предприятия. При организации деятельности метрологической службы предприятия его руководство может прогнозировать конечные результаты принятия соответствующих организационно-технических решений. Данные результаты относятся к стабильно функционирующим системам метрологического обеспечения с неизменяемыми значениями вероятностей выполнения самих работ.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение предприятий, графическая модель IDEF3, математическая модель, стационарный режим, вероятность

© Ивахненко А.Г., Аникеева О.В., Исламова О.В., Разумова А.И., 2025

Для цитирования

Анализ стратегий функционирования системы метрологического обеспечения предприятий / Ивахненко А.Г., Аникеева О.В., Исламова О.В., Разумова А.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 168-174. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-168-174>



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

ANALYSIS OF STRATEGIES FOR FUNCTIONING OF THE METROLOGICAL SUPPORT SYSTEM OF ENTERPRISES

Ivakhnenko A.G.¹, Anikeeva O.V.², Islamova O.V.³, Razumova A.I.¹

¹ Southwest State University, Kursk, Russia

² Kursk biofactory, Kursk, Russia

³ Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The effective functioning of enterprise management systems is dependent on the reliable operation of the metrological support system for measurements. In the quality management practice, significant experience has been gained in using the IDEF methodologies to graphically represent interrelated and interacting processes. Using the IDEF3 methodology, the authors previously carried out a study of probabilistic characteristics over time only for some combinations of junctions, and reaching steady-state probability values, i.e., the transition to operation in a stationary mode was carried out only empirically. **Objectives and Methods Applied.** The purpose of the work is to support the adoption of managerial decisions on the choice of the structure and parameters of the metrological support system for measurements, corresponding to the possible strategies of its functioning, based on the analysis of the established values of the probabilities of process execution. Based on the previously developed generalized graphical model of the metrological support system for enterprises in the IDEF3 notation, eight strategies for its functioning have been identified. For each strategy, dependencies have been obtained for calculating the established values of the probabilities of process execution in the metrological support system cycle. **Originality. Results.** Based on the calculations performed, the eight strategies for the functioning of the metrological support system were ranked from best to worst for different values of the probabilities of completing work blocks. It was noted that when all the probabilities of completing work blocks are equal to one, all the strategies are equally valid. **Practical Relevance.** Reasoned recommendations for the application of strategies for the functioning of the enterprise's metrological support system have been formulated. When organizing the activities of the enterprise's metrological service, its management can predict the final results of making appropriate organizational and technical decisions. These results apply to stable metrological support systems with unchanged probabilities of completing the work.

Keywords: metrological support for enterprises, IDEF3 graphical model, mathematical model, stationary mode, probability

For citation

Ivakhnenko A.G., Anikeeva O.V., Islamova O.V., Razumova A.I. Analysis of Strategies for Functioning of the Metrological Support System of Enterprises. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 168-174. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-168-174>

Введение

Надежная работа системы метрологического обеспечения измерений (МОИ) является необходимым условием эффективного и результативного функционирования различных систем менеджмента предприятий [1, 2]. В практике управления качеством накоплен значительный опыт использования семейства методологий IDEF для графического представления взаимосвязанных и взаимодействующих процессов. Наибольшее применение нашла методология IDEF0, меньшее применение нашла методология IDEF3, так как считается, что она служит для более детального описания процессов (работ) [3]. Преимуществом графических диаграмм IDEF3 является наличие соединений и разветвлений (перекрестков) с логическими условиями. Хотя сама методология IDEF3 не позволяет напрямую преобразовывать графические диаграммы в математические модели, разработаны различные подходы для выполнения таких преобразований [4-8]. В работах [7, 8] были исследованы изменения вероятностных характеристик во

времени на основе графической модели системы метрологического обеспечения в IDEF3, соответствующей циклу работ, приведенному в ГОСТ Р 8.820-2013 [9]. Исследование этих характеристик было выполнено только для некоторых сочетаний перекрестков и выход на установившиеся значения вероятностей, то есть переход в функционирование в стационарном режиме осуществлялся эмпирически.

Целью данной работы является поддержка принятия управленческих решений по выбору структуры и параметров системы МОИ, соответствующих возможным стратегиям ее функционирования на основе анализа установившихся значений вероятностей выполнения процессов.

Материалы и методы исследования

На схожесть структурных схем теории надежности и диаграмм IDEF было указано в работах [10, 11]. Развивая этот подход, рассмотрим соответствие между фрагментами структурных схем надежности и двумя типами перекрестков IDEF3 для определения и анализа стратегий, которое представлено на **рис. 1**.

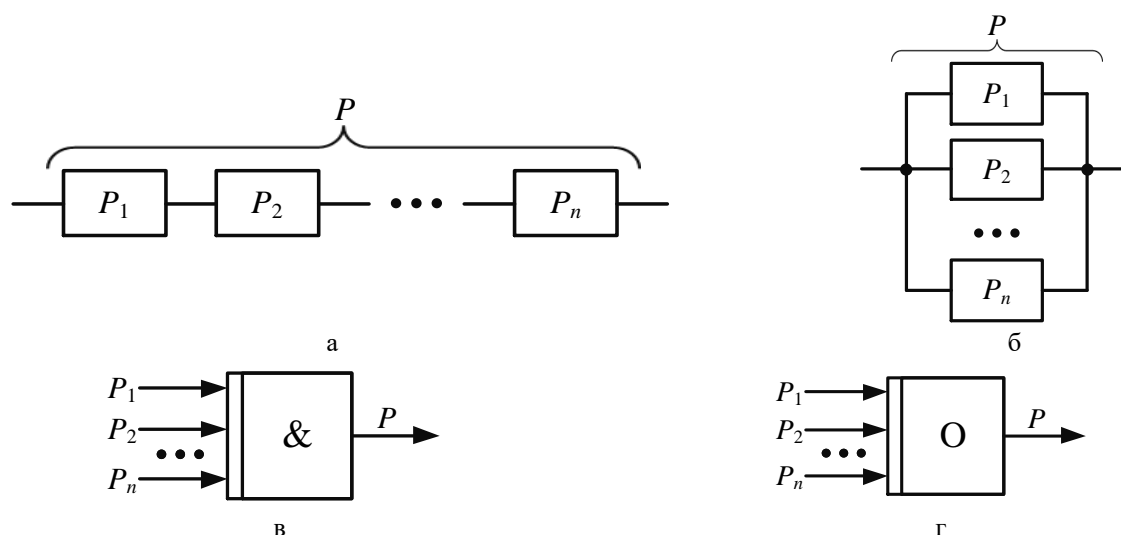


Рис. 1. Соответствие между структурными схемами надежности и соединительными перекрестками:

а – последовательное соединение элементов; б – параллельное соединение элементов; в – соединение «И»; г – соединение «ИЛИ»

Fig. 1. Correspondence between structural reliability diagrams and junctions:

a is sequential connection of elements; б is parallel connection of elements; в is the connection «&»; г is the connection «O»

Зависимости для определения значений вероятностей безотказной работы в структурных схемах и вероятностей соответствующего выполнения работ P имеют одинаковый вид:

– для рис. 1, а и в

$$P = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (1)$$

– для рис. 1, б и г

$$P = \prod_{i=1}^n (1 - P_i), \quad (2)$$

где P_i – вероятность выполнения i -й работы, $i = 1, \dots, n$.

Эти зависимости являются основой для определения установившихся значений вероятностей выполнения процессов при ранжировании стратегий функционирования.

Существенным недостатком структурных схем надежности, по сравнению с диаграммами IDEF, является отсутствие возможности учитывать обратные связи между элементами диаграмм.

Используем обобщенную графическую модель системы метрологического обеспечения в нотации IDEF3, представленную на рис. 2 [8]. Эта модель является именно обобщенной, поскольку имеется возможность выбора типов соединительных перекрестков J_2, J_3 и J_5 , из асинхронных & («И») и O («ИЛИ»), при этом возможны 8 различных сочетаний, которым будут соответствовать графические модели, характе-

ризующие 8 различных стратегий функционирования системы метрологического обеспечения.

Как и в статье [8], рассматриваются блоки работ: W_1 – «Планировать и определять требования к измерениям, испытаниям, контролю с целью достижения желаемого уровня производительности и качества при производстве продукции», W_2 – «Проектировать и разрабатывать процессы измерений», W_3 – «Выполнять метрологическое подтверждение пригодности элементов МОИ», W_4 – «Анализировать состояние метрологического обеспечения объектов», W_5 – «Принять решение о совершенствовании системы МОИ», $W_{уд}$ – «Оценить удовлетворенность потребителя». Все составляющие модели, входящие в зависимости и представленные далее, отражены на рис. 2.

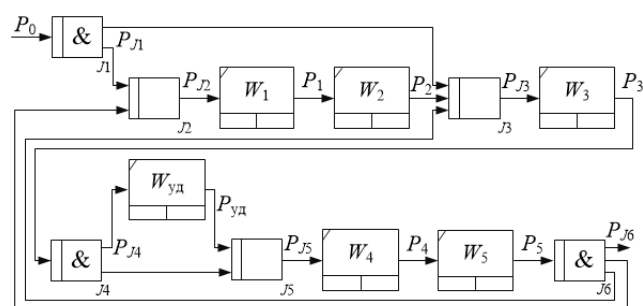


Рис. 2. Обобщенная графическая модель системы метрологического обеспечения [8]

Fig. 2. Generalized graphical model of the metrological support system [8]

Полученные результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены полученные выражения для определения установившихся значений вероятностей на выходах из блоков работ $P_1 \div P_5$ и $P_{уд}$, причем первыми устанавливаются значения вероятностей P_5 из численного решения соответствующих уравнений, и далее рассчитываются значения вероятностей $P_1 \div P_4$ и $P_{уд}$. Зависимости для вычисления значений вероятностей P_1 и P_3 отражают наличие обратных связей (длинного и короткого циклов), реализуемых перекрестками J_2 и J_5 .

Из табл. 1 видно, что для всех 8-ми стратегий существуют решения $P_1 \div P_5 = P_{уд} = 0$ и $P_1 \div P_5 = P_{уд} = 1$, причем для 8-й стратегии из всех возможных решений существуют только они. При таких решениях все стратегии являются равноправными, поскольку не зависят от выбранных типов пе-

рекрестков J_2 , J_3 и J_5 . Различия между стратегиями будут проявляться в условиях получения решений $0 < P_1 \div P_5 < 1$ и $0 < P_{уд} < 1$.

На практике значения вероятностей P_0 , $P_{уд}$ и $P_{W1 \div P_{W5}}$, конечно, могут иметь различные значения, но для анализа стратегий функционирования их следует принять равными, чтобы обеспечить сопоставимость полученных результатов.

Был проведен расчет значений вероятностей $P_1 \div P_5$ и $P_{уд}$ при $P_0 = P_{уд} = P_{W1 \div P_{W5}} = \{0,90; 0,95; 0,99, 0,998; 0,999\}$, результаты которого представлены в табл. 2.

Ранжирование стратегий функционирования системы МОИ с соответствующими типами перекрестков по представленным в табл. 2 результатам на основе принципа от «лучшего» к «худшему» приведены в табл. 3.

Таблица 1. Выражения для расчета вероятностей на выходах из блоков работ при различных стратегиях МОИ
Table 1. Expressions for calculating probabilities at the exits from work blocks under different MSM strategies

Номер стратегии	Типы перекрестков	Выражения для расчета вероятностей
1	$J_2 - O$, $J_3 - O$, $J_5 - O$	$1 - (1 - (1 - (1 - P_0)(1 - (1 - (1 - P_0)(1 - P_5)))P_{W1}P_{W2})(1 - P_5))P_{W3}P_{Wуд})(1 - (1 - (1 - P_0) \times$ $\times (1 - (1 - (1 - P_0)(1 - P_5))P_{W1}P_{W2})(1 - P_5))P_{W3}))P_{W4}P_{W5} - P_5 = 0;$ $P_1 = P_1(1); P_2 = P_2(1); P_3 = P_3(1); P_4 = P_4(1); P_{уд} = P_{уд}(1)$
2	$J_2 - O$, $J_3 - O$, $J_5 - \&$	$(1 - (1 - P_0)(1 - (1 - (1 - P_0)(1 - P_5)))P_{W1}P_{W2})(1 - P_5))^2 P_{W3}^2 P_{Wуд} P_{W4} P_{W5} - P_5 = 0;$ $P_1 = P_1(1); P_2 = P_2(1); P_3 = P_3(1); P_4 = P_4(2); P_{уд} = P_{уд}(1)$
3	$J_2 - O$, $J_3 - \&$, $J_5 - O$	$(1 - (1 - P_0(1 - (1 - P_0)(1 - P_5)))P_{W1}P_{W2}P_{W3}P_{Wуд}P_5)(1 - P_0(1 - (1 - P_0)(1 - P_5))) \cdot$ $\cdot P_{W1}P_{W2}P_{W3}P_5))P_{W4}P_{W5} - P_5 = 0;$ $P_1 = P_1(1); P_2 = P_2(1); P_3 = P_3(2); P_4 = P_4(1); P_{уд} = P_{уд}(1)$
4	$J_2 - O$, $J_3 - \&$, $J_5 - \&$	$(1 - (1 - P_0)(1 - P_5))^2 P_0^2 P_{W1}^2 P_{W2}^2 P_{W3}^2 P_{Wуд}^2 P_{W4} P_{W5} - P_5 = 0;$ $P_1 = P_1(1); P_2 = P_2(1); P_3 = P_3(2); P_4 = P_4(2); P_{уд} = P_{уд}(1)$
5	$J_2 - \&$, $J_3 - O$, $J_5 - O$	$(1 - (1 - (1 - (1 - P_0)(1 - P_0P_5P_{W1}P_{W2})(1 - P_5)))P_{W3}P_{Wуд})(1 - (1 - (1 - P_0)(1 - P_0P_5P_{W1}P_{W2}) \times$ $\times (1 - P_5))P_{W3}))P_{W4}P_{W5} - P_5 = 0;$ $P_1 = P_1(2); P_2 = P_2(1); P_3 = P_3(1); P_4 = P_4(1); P_{уд} = P_{уд}(1)$
6	$J_2 - \&$, $J_3 - O$, $J_5 - \&$	$((1 - P_5)(1 + P_5P_{W1}P_{W2})P_0 - P_5P_{W1}P_{W2}(1 - P_5)P_0^2 + P_5)^2 P_{W3}^2 P_{Wуд} P_{W4} P_{W5} - P_5 = 0; P_1 = P_1(2);$ $P_2 = P_2(1); P_3 = P_3(1); P_4 = P_4(2); P_{уд} = P_{уд}(1)$
7	$J_2 - \&$, $J_3 - \&$, $J_5 - O$	$(1 - (1 - P_0^2 P_5^2 P_{W1}P_{W2}P_{W3}P_{Wуд})(1 - P_0^2 P_5^2 P_{W1}P_{W2}P_{W3}))P_{W4}P_{W5} - P_5 = 0;$ $P_1 = P_1(2); P_2 = P_2(1); P_3 = P_3(2); P_4 = P_4(1); P_{уд} = P_{уд}(1)$
8	$J_2 - \&$, $J_3 - \&$, $J_5 - \&$	$P_0^4 P_5^4 P_{W1}^2 P_{W2}^2 P_{W3}^2 P_{Wуд} P_{W4} P_{W5} - P_5 = 0;$ $P_1 = P_1(2); P_2 = P_2(1); P_3 = P_3(2); P_4 = P_4(2); P_{уд} = P_{уд}(1)$

Примечание. $P_{уд}(1) = P_3P_{уд}$; $P_1(1) = (1 - (1 - P_0)(1 - P_5))P_{W1}$; $P_1(2) = P_0P_5P_{W1}$; $P_2(1) = P_1P_{W2}$;

$P_3(1) = (1 - (1 - P_0)(1 - P_2)(1 - P_5))P_{W3}$; $P_3(2) = P_0P_2P_5P_{W3}$; $P_4(1) = (1 - (1 - P_3)(1 - P_{уд}))P_{W4}$; $P_4(2) = P_{уд}P_3P_{W4}$.

Таблица 2. Значения вероятностей на выходах из блоков работ

Table 2. Probability values at the exits from the work blocks

Стратегия	$P_{уд}, P_1 \div P_5$	Значение $P_0 = P_{Wуд} = P_{W1} \div P_{W5}$							
		0,90	0,95	0,99		0,998		0,999	
& – & – O	P_1	0	0	0,6907	0,9480	0,6304	0,9916	0,6241	0,9959
	P_2	0	0	0,6838	0,9385	0,6292	0,9896	0,6235	0,9949
	P_3	0	0	0,4723	0,8896	0,3967	0,9813	0,3891	0,9908
	P_4	0	0	0,7118	0,9770	0,6343	0,9976	0,6260	0,9989
	P_5	0	0	0,7047	0,9672	0,6330	0,9956	0,6254	0,9979
	$P_{уд}$	0	0	0,4675	0,8807	0,3959	0,9794	0,3888	0,9898
& – O – O	P_1	0,6422	0,8104	0,9604		0,9920		0,9960	
	P_2	0,5780	0,7699	0,9508		0,9900		0,9950	
	P_3	0,8921	0,9489	0,9900		0,9980		0,9990	
	P_4	0,8809	0,9452	0,9898		0,9980		0,9990	
	P_5	0,7928	0,8980	0,9799		0,9960		0,9980	
	$P_{уд}$	0,8029	0,9014	0,9801		0,9960		0,9980	
O – & – &	P_1	0,8100	0,9025	0,9801		0,9960		0,9980	
	P_2	0,7290	0,8574	0,9703		0,9940		0,9970	
	P_3	0	0	0		0		0	
	P_4	0	0	0		0		0	
	P_5	0	0	0		0		0	
	$P_{уд}$	0	0	0		0		0	
O – & – O	P_1	0,8100	0,9381	0,9898		0,9980		0,9990	
	P_2	0,7290	0,8912	0,9799		0,9960		0,9980	
	P_3	0	0,6025	0,9369		0,9878		0,9940	
	P_4	0	0,7885	0,9855		0,9978		0,9990	
	P_5	0	0,7491	0,9756		0,9958		0,9980	
	$P_{уд}$	0	0,5724	0,9276		0,9859		0,9930	
& – O – &	P_1	0,4538	0,6928	0,9320		0,9860		0,9930	
	P_2	0,4084	0,6581	0,9227		0,9841		0,9920	
	P_3	0,8766	0,9462	0,9900		0,9980		0,9990	
	P_4	0,6224	0,8080	0,9605		0,9920		0,9960	
	P_5	0,5602	0,7676	0,9509		0,9900		0,9950	
	$P_{уд}$	0,7889	0,8989	0,9801		0,9960		0,9980	
O – O – O	P_1	0,8814	0,9452	0,9898		0,9980		0,9990	
	P_2	0,7933	0,8979	0,9799		0,9960		0,9980	
	P_3	0,8962	0,9495	0,9900		0,9980		0,9990	
	P_4	0,8819	0,9453	0,9898		0,9980		0,9980	
	P_5	0,7937	0,8980	0,9799		0,9960		0,9980	
	$P_{уд}$	0,8065	0,9020	0,9801		0,9960		0,9990	
O – O – &	P_1	0,8621	0,9392	0,9895		0,9980		0,9990	
	P_2	0,7759	0,8922	0,9796		0,9960		0,9980	
	P_3	0,8915	0,9488	0,9900		0,9980		0,9990	
	P_4	0,6438	0,8125	0,9606		0,9920		0,9960	
	P_5	0,5794	0,7719	0,9510		0,9900		0,9950	
	$P_{уд}$	0,8024	0,9014	0,9801		0,9960		0,9980	

Таблица 3. Ранги стратегий

Table 3. Strategy ranks

Ранг	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Стратегии (перекрестки)	O – O – O	O – O – &	O – & – O	& – O – O	& – O – &	& – & – O	O – & – &	& – & – &

Из табл. 3 видно, что наилучшей стратегией является O – O – O, а наихудшей – стратегия & – & – &, что напрямую вытекает из зависимостей (1) и (2). Из трех стратегий с одним перекрестком & лучшей является стратегия O – O – &, где реализуется использование перекрестков O для замыкания обратных связей по короткому и длинному циклам.

В свою очередь, из оставшихся двух стратегий лучшие характеристики имеет стратегия O – & – O с использованием перекрестка O для замыкания обратной связи по длинному циклу по сравнению со стратегией & – O – O, в которой перекресток O служит для замыкания обратной связи по короткому циклу. Из трех стратегий с двумя перекрестками & лучшей

является стратегия & – О – &, в которой перекресток О замыкает обратную связь по короткому циклу.

Стратегия с перекрестками О – & – & является неработоспособной, поскольку при значениях $0 < P_0 = P_{W_{уд}} = P_{W_1 \div P_{W_5}} < 1$, значения вероятностей в стационарном режиме функционирования системы $P_3 \div P_5 = P_{уд} = 0$. Стратегию & – & – О можно считать работоспособной только при значениях $0,95 < P_0 = P_{W_{уд}} = P_{W_1 \div P_{W_5}}$, но она имеет особенность – при значении $P_0 = P_{W_{уд}} = P_{W_1 \div P_{W_5}} = 0,95$ имеется точка бифуркации. При значениях $0,95 < P_0 = P_{W_{уд}} = P_{W_1 \div P_{W_5}}$ существует два возможных значения вероятностей для $P_1 \div P_5$ и $P_{уд}$, что обусловлено наличием двух корней в решении уравнения для определения значения P_1 (стратегия 7 в табл. 1). Так, при значениях $P_0 = P_{W_{уд}} = P_{W_1 \div P_{W_5}} = 0,999$ имеются два корня: $P_1 = 0,6241$ и $P_1 = 0,9959$, при этом система метрологического обеспечения потенциально может удовлетворять требованиям функционирования только при $P_1 = 0,9959$.

Заключение

Еще раз отметим, что при возможности обеспечить учет требований потребителей, оценку их удовлетворенности и выполнения всех работ с вероятностями 100% не имеет значения, какие используются перекрестки и соответствующие им стратегии функционирования системы. Если такой возможности или уверенности у руководства нет, то представленные в данной работе результаты могут служить определенными ориентирами. Поэтому авторы рекомендуют к применению первые пять стратегий из представленных в табл. 3.

Таким образом, при организации деятельности метрологической службы предприятия его руководство может прогнозировать конечные результаты принятия соответствующих организационно-технических решений. Данные результаты относятся к стабильно функционирующим системам метрологического обеспечения с неизменяемыми значениями вероятностей выполнения самих работ. Задачи прогнозирования имеют множество решений при учете фактических значений таких вероятностей, поэтому авторами осуществляется подготовка к государственной регистрации соответствующей программы для ЭВМ.

Список источников

1. Кузнецов В.А., Ялунина Г.Я. Метрология (теоретические, прикладные и законодательные основы): учеб. пособие. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. 335 с.
2. Сергеев А.Г. Метрология и метрологическое обеспечение: учебник для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2008. 575 с.
3. Черемных С.В., Семенов И.О., Ручкин В.С. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум. М.: Финансы и статистика, 2006. 192 с.
4. Бритов Г.С., Лупал А.В. Вероятностный анализ состояний IDEF3-моделей технологических процессов // Информационно-управляющие системы. 2009. № 5. С. 21-24.

5. Осипова Т.Ф. Анализ потоков в бизнес-процессах по IDEF3-моделям // Актуальные проблемы экономики и управления. 2015. № 4(8). С. 155-162.
6. Параметрический анализ структурных моделей взаимодействующих процессов на основе IDEF3 / Ивахненко А.Г., Аникеева О.В., Исламова О.В., Разумова А.И., Гуляев К.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. № 3. С. 131-139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-131-139>.
7. Имитационное моделирование системы метрологического обеспечения предприятий / Ивахненко А.Г., Аникеева О.В., Исламова О.В., Разумова А.И., Гуляев К.А. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 7. С. 76-81. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-76-77.
8. Ивахненко А.Г., Аникеева О.В., Разумова А.И. Вероятностно-временное моделирование системы метрологического обеспечения предприятий при различных стратегиях ее функционирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. № 3. С. 93-101. DOI: 10.24412/2071-6168-2025-3-93-94.
9. ГОСТ Р 8.820-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.
10. Kusiak A., Larson N. System Reliability and Risk Assessment: A Quantitative Extension of IDEF Methodologies. In AAAI Technical Report SS-94-04. Pp. 88-93.
11. Kusiak A., Zakarian A. Risk assessment of process models // Computers & Industrial Engineering. 1996, vol. 30, iss. 4, pp. 599-610.

References

1. Kuznetsov V.A., Yalunina G.Ya. *Metrologiya (teoreticheskie, prikladnye i zakonodatelnye osnovy): uchebnoe posobie* [Metrology (theoretical, applied and legislative foundations): a textbook]. Moscow: Publishing House of Standards, 1998, 335 p. (In Russ.).
2. Sergeev A.G. *Metrologiya i metrologicheskoe obespechenie: uchebnik dlya vuzov* [Metrology and Metrological Support: A Textbook for Universities]. Moscow: Yurayt Publishing House, 2008, 575 p. (In Russ.).
3. Cheremnyh S.V., Semenov I.O., Ruchkin V.S. *Modelirovanie i analiz sistem. IDEF-tehnologii: praktikum* [Modeling and analysis of systems. IDEF-technologies: educational aid]. Moscow: Finansy i statistika, 2006, 192 p. (In Russ.).
4. Britov G.S., Lupal A.V. Probability analysis of IDEF3 models states of technological processes. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems]. 2009;(5):21-24. (In Russ.).
5. Osipova T.F. Flow analysis in business processes by IDEF3-models. *Aktualnye problemy ekonomiki i upravleniya* [Actual problems of economics and management]. 2015;(4(8)):155-162. (In Russ.).
6. Ivakhnenko A.G., Anikeeva O.V., Islamova O.V., Razumova A.I., Gulyaev K.A. Parametric analysis of structural models of interacting processes based on IDEF3. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;

- 22(3):131-139. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-3-131-139>.
7. Ivakhnenko A.G., Anikeeva O.V., Islamova O.V., Razumova A.I., Gulyaev K.A. Imitation modeling of the metrological support system of enterprises. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2024;(7): 76-81. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-76-77.
 8. Ivakhnenko A.G., Anikeeva O.V., Razumova A.I. Probabilistic-temporal modeling of the metrological support system of enterprises under various strategies of its functioning *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2025;(3):93-101. (In Russ.) DOI: 10.24412/2071-6168-2025-3-93-94.
 9. State standard GOST R 8.820-2013. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrological assurance. General] Moscow: Standartinform, 2019, 12 p. (In Russ.).
 10. Kusiak A., Larson N. System Reliability and Risk Assessment: A Quantitative Extension of IDEF Methodologies. In AAAI Technical Report SS-94-04. 88-93.
 11. Kusiak A., Zakarian A. Risk assessment of process models. *Computers & Industrial Engineering*. 1996;30(4):599-610.

Поступила 01.07.2025; принята к публикации 08.09.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 01/07/2025; revised 08/09/2025; published 25/12/2025

Ивахненко Александр Геннадьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, профессор, Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия.
Email: ivakhnenko2002@mail.ru. ORCID 0000-0002-9798-993X

Аникеева Олеся Владимировна – кандидат технических наук, доцент, специалист по качеству, ФКП «Курская биофабрика – фирма «БИОК», Курск, Россия.
Email: olesya-anikeeva@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7907-451X

Исламова Оксана Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия.
Email: islamova_81@mail.ru.

Разумова Анна Ивановна – аспирант, Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия.
Email: belkarazym@mail.ru.

Alexander G. Ivakhnenko – DrSc (Eng.), Lead Researcher, Professor, Southwest State University, Kursk, Russia.
Email: ivakhnenko2002@mail.ru. ORCID 0000-0002-9798-993X

Olesya V. Anikeeva – PhD (Eng.), Associate Professor, Quality Management Specialist, Kursk Biofactory, Kursk, Russia.
Email: olesya-anikeeva@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7907-451X

Oksana V. Islamova – PhD (Eng.), Associate Professor, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia.
Email: islamova_81@mail.ru.

Anna I. Razumova – Postgraduate Student, Southwest State University, Kursk, Russia.
Email: belkarazym@mail.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 338.4
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-175-185



ВЫБОР МАТЕРИАЛА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЕНТИЛЯТОРОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АРКТИЧЕСКОГО И СУБАРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНОВ

Ермаков С.Б.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Аннотация. Смещение основных добывающих производств в северные и северо-восточные регионы страны, интенсификация промышленного и жилищного строительства в районах Крайнего Севера поставили ряд сложных технологических задач по адаптации различных видов основного и вспомогательного оборудования к экстремальным климатическим условиям Арктического и Субарктического регионов. К числу такого оборудования относятся системы вентиляции и охлаждения производственных помещений, различной стационарно размещенной и мобильной техники. Как показал анализ фактической эксплуатации вентиляторов в условиях низких климатических температур и высокой влажности северных территорий, использование для их изготовления традиционных материалов, например полимерных композиционных материалов на полибутилентерефталатной матрице, оказывается в ряде случаев невозможным из-за их низкой холодо- и трещиностойкости, приводящих к разрушению корпусов и крыльчаток вентиляторов. В работе проведен анализ возможности применения полимерных композиционных материалов для изготовления основных узлов осевого вентилятора, эксплуатация которого предполагается в условиях арктического климата, выполнены математическое моделирование условий эксплуатации вентилятора в программном комплексе ANSYS и FMEA-анализ рисков, проведена оценка критических факторов воздействия на надёжность и долговечность вентиляторов, изготовленных из различных полимерных композиционных материалов и эксплуатируемых при экстремально низких температурах воздуха, выполнена оценка деградации механических свойств полимерных композиционных материалов в условиях длительного воздействия низких температур окружающей среды, повышенных температур эксплуатации, показано влияние переходов температуры окружающей среды через ноль и повышенной засоленности воздуха. Показана возможность изготовления корпусов и крыльчаток вентиляторов для эксплуатации в условиях Арктики из стеклонеполненных полимерных композиционных материалов с поликарбонатной матрицей.

Ключевые слова: математическое моделирование, анализ рисков, полимерные композиционные материалы, деградация свойств в условиях климата Арктики

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FEWN-2025-0005 Разработка методик определения материалов в качестве строительных конструкций, деталей и узлов оборудования нефтедобывающих предприятий в Арктической и Субарктической зонах России).

© Ермаков С.Б., 2025

Для цитирования

Ермаков С.Б. Выбор материала и обеспечение качества вентиляторов из полимерных композиционных материалов для климатических условий Арктического и Субарктического регионов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 175-185. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-175-185>



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

MATERIAL SELECTION AND QUALITY ASSURANCE OF FANS MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE ARCTIC AND SUBARCTIC REGIONS

Ermakov S.B.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. The shift of the main extractive industries to the northern and northeastern regions of the country, and the intensification of industrial and housing construction in the Far North have posed several complex technological challenges to adapt various types of basic and auxiliary equipment to the extreme climatic conditions of the Arctic and Subarctic regions. Such equipment includes ventilation and cooling systems for industrial premises, various stationary and mobile equipment. As the analysis of the actual operation of fans in conditions of low climatic temperatures and high humidity in the northern areas has shown, the use of traditional materials for their manufacture, for example, polymer composite materials based on polybutylene terephthalate matrix, is in some cases impossible due to their low cold and crack resistance, leading to the destruction of fan housings and impellers. The paper analyzes the possibility of using polymer composite materials to manufacture the main components of an axial fan, which is expected to operate in an Arctic climate. Mathematical modeling of fan operating conditions in the ANSYS software package and FMEA risk analysis is performed. Assessment of critical factors affecting the reliability and durability of fans made of various polymer composite materials and operated at extremely low temperatures. Data on degradation of the mechanical properties of polymer composite materials under conditions of prolonged exposure to low ambient temperatures and increased operating temperatures are provided. The rate of degradation of strength properties under the influence of thermal cyclic effects of temperature (ambient temperature zero crossing) and increased salinity of the air is determined. The possibility of manufacturing axial fan housing and impellers from glass-filled polymer composite materials with a polycarbonate matrix for use in extremely low temperature conditions is shown.

Keywords: mathematical modeling, risk analysis, polymer composite materials, degradation of properties in the Arctic climate

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No.FEWN-2025-0005 Development of methods for determining materials as building structures, parts and equipment components of oil producing enterprises in the Arctic and Subarctic regions of Russia).

For citation

Ermakov S.B. Material Selection and Quality Assurance of Fans Made of Polymer Composite Materials for the Climatic Conditions of the Arctic And Subarctic Regions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 175-185. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-175-185>

Введение

К числу особенностей современного развития транспортной и промышленной инфраструктуры в северных регионах страны, в том числе предприятий добычи твердых полезных ископаемых, нефте- и газодобычи относится ряд факторов, делающих крайне привлекательным замену металлических и ряда широко применяемых полимерных конструкций при их обустройстве на более легкие и практичные – изготовленные на основе термопластичных и полимерных композиционных материалов (ПКМ). Особо остро эта проблема встала в последние пять-десять лет, когда возникла необходимость начала освоения малых и средних месторождений твердых полезных ископаемых, нефти и газа со сроками эксплуатации до десяти, а иногда пяти лет.

Неполная реализация ресурса, введение санкций на закупку нового оборудования привели к необходимости демонтажа машин и механизмов с отработанных участков и перемещения его на новые площадки для повторного использования. Это выявило необходимость создания новой техники, способной обеспечить надежную и долговечную работу при жестких режимах северной эксплуатации, уменьшающей затраты на обслуживание, монтаж, демонтаж, с минимальной массой для легкого перемещения между площадками в условиях экстремальных климатических воздействий и отсутствующей транспортной инфраструктурой в северных регионах РФ. Как показал опыт, использование значительного числа аппаратов и приборов, разработанных для средних широт, оказывается затруднено в северных условиях и требует либо модернизации, либо создания принципов

ально новых приборов, аппаратов, их несущих и корпусных конструкций [1-3].

Среди перспективных материалов для северных территорий особо следует обратить внимание на полимерные материалы (ПМ) и ПКМ. Так, термопластичные ПМ и ПКМ широко применяются в различных аппаратах, машинах и механизмах. При этом детали, изготовленные из них, могут подвергаться как агрессивному воздействию окружающей среды – экстремально низким температурам и высокой влажности воздуха, воздействиям термических циклов при многократных переходах температуры наружного воздуха «через ноль» и морского (соленого) воздуха, так и сложным эксплуатационным нагрузкам – статическим, динамическим или циклическим.

К оборудованию, требующему особого подхода при конструировании для эксплуатации в условиях северных широт, относятся электрические двигатели и оборудование, ими оснащенное – насосы, компрессоры и вентиляторы, узлы и детали которых часто изготавливают из ПМ и ПКМ.

Вентиляционные системы по данным [3, 4] играют важную роль в Арктике и используются для измерения и мониторинга скорости и направления ветра, помогают собирать данные о температуре и влажности воздуха, применяются в системах генерации электричества из возобновляемых источников энергии, что особенно важно в регионе, где доступ к традиционным источникам энергии может быть ограничен, используются в промышленности для охлаждения и вентиляции оборудования и помещений. В условиях низких температур и мерзлоты поддержание оптимальной температуры и воздухообмена является одним из требований к безопасности и эффективности эксплуатации производственных и жилых помещений.

Согласно данным [4, 5], при проектировании и конструировании деталей и узлов электрооборудования для нефтяной и газовой промышленности необходимо учесть следующие требования к электрооборудованию. Это устойчивость к низким температурам: детали должны быть способны работать при температурах, которые могут достигать -60°C и ниже; обладать защитой от обледенения, чтобы предотвратить нарастание льда на лопастях подвижных элементов; иметь способность противостоять ударным нагрузкам – как эксплуатационное динамическое нагружение, так и сильные ветры, которые характерны для Арктики; обеспечивать надежность и долговечность эксплуатации, так как доступ к обслуживанию и ремонту может быть ограничен.

Выполнение указанных требований выдвигает высокие требования к используемым материалам. Если в зоне умеренного климата детали электрооборудования в основном изготавливают из углеродистых сталей, ПМ и ПКМ (чаще всего полибутилентерефталата (ПБТ) или ПКМ на его основе), то в условиях северных широт РФ такие материалы оказыва-

ются малопригодны, так как обладают неудовлетворительной хладостойкостью и трещиностойкостью при пониженных температурах, что приводит к развиту аварийных ситуаций и выходу их из строя (рис. 1).

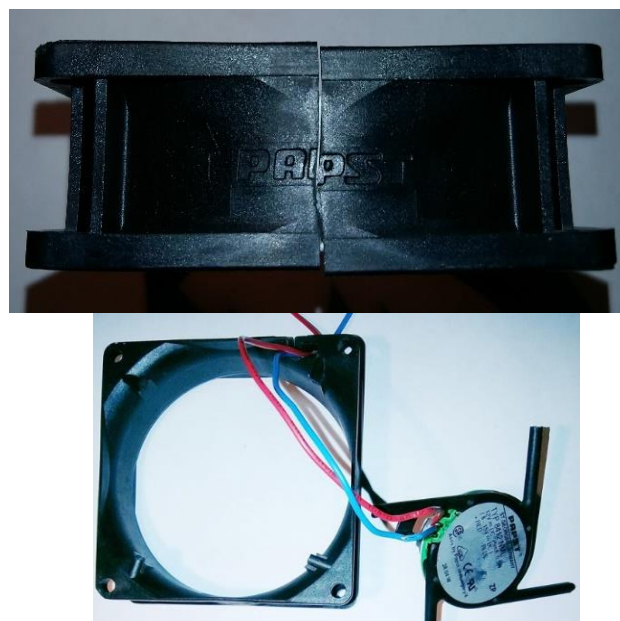


Рис. 1. Разрушение корпусов вентиляторов после эксплуатации в оборудовании контроля скорости ветра при температуре минус 43°C (время эксплуатации – 1187 и 2124 ч, материал – стеклонеполненный ПБТ)

Fig. 1. Destruction of fan housings after operation in wind speed control equipment at a temperature of minus 43°C (the operating time is 1187 and 2124 hours, the material is glass-filled PBT)

Большая часть аварийных разрушений электрооборудования арктического назначения связана с экстремально низкими температурами, высокой влажностью и засоленностью воздуха северных регионов. Повышенная агрессивность окружающей среды приводит к ускоренной коррозии металлических частей конструкции, необходимости достаточно частого профилактического ремонта, низкотемпературному охрупчиванию ПМ, намораживанию льда на вращающихся элементах. Одной из задач, стоящих перед промышленностью, является импортозамещение используемых в настоящее время вентиляторов, поставка которых из-за введенных санкций затруднена, и разработка принципиально новых типов вентиляторов для эксплуатации в Арктическом и Субарктическом регионах.

В работе решена комплексная проблема выбора материалов с необходимым уровнем морозостойкости для корпусов и крыльчаток вентиляторов и приведен анализ напряжений, возникающих в этих материалах при статическом и динамическом нагружении конструкций с различными газодинамическими и

геометрическими характеристиками. Были разработаны рекомендации по выбору материалов для подвижных и неподвижных частей вентиляторов с частотой вращения крыльчатки до 11 тыс. об⁻¹, номинальной производительностью до 350 м³/ч и полным давлением при номинальной производительности до 550 Па. При этом масса устройства не должна превышать 430 г. Условия эксплуатации конструкций – открытый воздух, в том числе прибрежных регионов Арктической зоны, с влажностью до 98%, температурой до минус 60°C.

Известно, что наиболее частыми проблемами, возникающими в ходе эксплуатации вентиляторов, являются пониженная производительность и повышенная вибрация, вызванная дефектами и трещинами, возникающими в лопастях и корпусах устройств, низкая производительность и перегревы двигателей. Согласно данным [6], использование материалов с повышенной хладостойкостью и своевременное обслуживание вентиляторов позволяет продлить срок их службы в полтора-два раза. Замеры температур корпусов и лопастей крыльчаток вентиляторов с механическими и другими дефектами в зоне северных широт показали, что такие перегревы до выхода двигателя из строя могут повысить температуру этих элементов (при температуре окружающего воздуха минус 60°C) не более чем на 10-25°C.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований были использованы стеклонаполненные (30% волокна) полимерные композиционные материалы: полибутилентерефталат – ПБТ, полиамид – ПА, поликарбонат – ПК. ПБТ – полимер с высокой степенью кристалличности (до 60%), относится к сложным насыщенным полиэфирам. В работе изучены свойства следующих ПКМ: полибутилентерефталат Bluestar PBT 110G30NA, полиамид стеклонаполненный ПА-610Л СВ30 ТУ 6-06-134-2016 и поликарбонат стеклонаполненный марки ПК-Л-СВ30 - ТУ 2253-317-09201208-93.

Известно, что одной из причин, сдерживающих применения ПКМ в технике, является изменение их свойств под действием внешних, в том числе климатических, факторов, которые связаны с целым рядом сложных химических и физических превращений, протекающих в многокомпонентных полимерных системах. Практически все ПКМ обладают низкой временной стабильностью свойств, изменяющихся под действием тепла и холода, света, напряжений, ионизационного облучения, приводящих к изменениям их структурных состояний, были выполнены путем проведения механических испытаний ПМ в соответствии с ГОСТ 14359–69 «Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования», ГОСТ 4647–2015 «Пластмассы. Методы определения ударной вязкости по Шарпи», ГОСТ 16782–92 «Пластмассы. Метод определения температуры хрупкости при ударе», ГОСТ 11262–80 «Пластмассы. Метод

испытания на растяжение», ГОСТ 26277–84 «Пластмассы. Общие требования к изготовлению образцов способом механической обработки». В ходе исследований был выполнен анализ влияния низких и повышенных температур. С этой целью подготовленные для испытаний образцы подвергались длительным захлаживанию и нагревам сроком до 2400 и 1000 ч соответственно. При определении влияния водопоглощения были подготовлены не только ударные образцы для механических испытаний, но и специализированные образцы для измерения водопоглощения в соответствии с ГОСТ 4650–80 «Пластмассы. Методы определения водопоглощения» – метод А.

Математическое моделирование условий эксплуатации вентиляторов было выполнено в программном комплексе ANSYS, также в работе использован метод FMEA-анализа разрабатываемых конструкций.

Полученные результаты и их обсуждение

На первом этапе исследований был выполнен анализ видов и последствий потенциальных несоответствий или FMEA-анализ разрабатываемых конструкций. С целью определения наиболее значимых факторов риска и их последствий были построены таблицы FMEA-анализа (они же протоколы исследования) [7, 8]. В табл. 1 и 2 приведены результаты анализа на примере оценки потенциальных несоответствий вентиляторов, изготовленных из анализируемых ПКМ.

При этом метод FMEA-анализа был доработан, а именно потребовалось учитывать дополнительный параметр, влияющий на расчет приоритетного числа риска – опасность разрушения, который, по нашему мнению, необходимо учитывать при любых исследованиях рисков, связанных с экстремальными условиями эксплуатации оборудования в зоне Арктического и Субарктического регионов, отличающихся крайне низкими климатическими температурами, высокой влажностью воздуха, сложностью в организации проведения профилактических и ремонтных работ используемого оборудования. При составлении табл. 1 были использованы как оценка группы экспертов (конструкторов вентиляторных систем и специалистов по эксплуатации оборудования в условиях ЯНАО), так и результаты длительных лабораторных исследований.

Выбор материала, пригодного для изготовления вентиляционных систем, был проведен несколькими методами. Первоначально было выполнено математическое моделирование и расчет необходимого уровня механических свойств материала вентиляторов с заданными характеристиками. С этой целью были разработаны 3D-модели объектов, определены поверхностные сетки контрольных объемов и распределения полей давлений на поверхности лопаток ротора и статора, рассчитаны поля скоростей в сечениях при удалении от вентиляторов и статическое давление за вентиляторами. На рис. 2 и 3 показаны результаты расчетов.

Таблица 1. Анализ рисков и выявление критических факторов воздействия на надёжность и долговечность вентиляторов, изготовленных из различных полимерных композиционных материалов в ходе эксплуатации оборудования в условиях Арктического и Субарктического регионов

Table 1. Risk analysis and identification of critical factors affecting the reliability and durability of fans made of various polymer composite materials during equipment operation in the Arctic and Subarctic regions

Значимость – вероятность отказа (1 – очень низкая; 10 – катастрофическая)

Метод												
Фактор риска (потеря работоспособности при воздействии фактора)	Лабораторные испытания									Экспертная оценка		
	Время эксплуатации, ч											
	1			100			1 000			50 000		
	ПБТ	ПА	ПК	ПБТ	ПА	ПК	ПБТ	ПА	ПК	ПБТ	ПА	ПК
Штатное нагружение	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	4	3
Хладостойкость	10	1	1	10	2	2	10	2	3	10	3	4
Водопоглощение	1	4	1	1	10	2	1	10	3	2	10	3
Воздействие рабочей температуры	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3
Суммарное воздействие	10	5	1	10	10	3	10	10	4	10	10	5
Аварийный перегрев двигателя	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
Вероятность возникновения (1 – очень низкая; 10–100%)												
Фактор риска (потеря работоспособности при воздействии фактора)	Метод											
	Лабораторные испытания									Экспертная оценка		
	Время эксплуатации, ч											
	1			100			1 000			50 000		
ПБТ	ПА	ПК	ПБТ	ПА	ПК	ПБТ	ПА	ПК	ПБТ	ПА	ПК	
Штатное нагружение	1	1	1	1	3	2	2	4	3	3	5	5
Хладостойкость	10	1	1	10	2	2	10	3	2	10	4	3
Водопоглощение	1	2	1	1	8	2	1	10	3	2	10	4
Воздействие рабочей температуры	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2	3	3
Суммарное воздействие	10	3	1	10	9	3	10	10	3	10	10	4
Аварийный перегрев двигателя	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3
Вероятность обнаружения (1 – почти наверняка дефект будет обнаружен; 10 – практически невозможно обнаружить)												
Фактор риска (потеря работоспособности при воздействии фактора)	Метод											
	Лабораторные испытания									Экспертная оценка		
	Время эксплуатации, ч											
	1			100			1 000			50 000		
ПБТ	ПА	ПК	ПБТ	ПА	ПК	ПБТ	ПА	ПК	ПБТ	ПА	ПК	
Штатное нагружение	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Хладостойкость	5 ¹⁾	10	10	1	8	9	1	7	8	1	6	6
Водопоглощение	10 ²⁾	10	10	10	4	9	9	1	8	9	1	7
Воздействие рабочей температуры	10 ³⁾	10	10	10	9	9	9	9	9	8	7	7
Суммарное воздействие	5	10	10	1	3	9	1	1	8	1	1	7
Аварийный перегрев двигателя ⁴⁾	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Примечание:

- 1) Зарождение и развитие трещин в корпусе и лопаточном аппарате, разрушение конструкции.
- 2) Возникновение повышенных шумов, дисбаланса лопаточного аппарата, повышенный шум в подшипниках, снижение производительности из-за изменения геометрии и профилей лопаточного аппарата, в результате образования трещин и разрушение конструкции.
- 3) Коробление лопаточного аппарата и корпуса, повышенный шум, дисбаланс, снижение производительности.
- 4) Обычно перегрев двигателя в условиях установки вентиляторов на мобильную технику или приборы автоматизированного контроля и учета данных, расположенных на нефтегазовых месторождениях, автоматизированных постах метеонаблюдений и других технологических объектах, не обнаруживается до момента коробления или повреждения элементов устройства или выхода двигателя из строя.

Таблица 2. Результаты FMEA-анализа

Table 2. FMEA analysis results

Фактор риска	Материал	Описание последствий	Значимость	Вероятность	Обнаружение	Оценка опасности разрушения
Штатное нагружение	ПБТ ПА ПК	Деградация прочностных свойств	3	10	10	1 – скорость дегградации за срок эксплуатации от 10 до 20%, что обычно учитывается при проектировании оборудования
		Разрушение	10	1	1	3 – при ошибках конструирования
Хладостойкость	ПБТ	Разрушение	10	10	1	10 – при минус 60°C ударная вязкость ПБТ равна нулю, что приводит к разрушениям
	ПА		10	3	1	4 – свойства сохраняются на высоком уровне после длительного пребывания на холоде и резко падают только при насыщении водой
	ПК	Деградация прочностных свойств	4	3	10	2 – ударная вязкость материала сохраняется на достаточно высоком уровне после длительного воздействия низких температур
Водопоглощение	ПБТ	Деградация прочностных свойств	1	2	10	2 – материал обладает минимальной склонностью к водопоглощению
	ПА	Деградация прочностных свойств	6	10	9	10 – высокая скорость водопоглощения приводит к снижению прочностных характеристик материала и резкому падению хладостойкости
		Разрушение	10	10	1	
	ПК	Деградация прочностных свойств	4	4	7	4 – умеренно склонен к водопоглощению, а сам процесс постепенно замедляется при насыщении водой поверхности материала
		Разрушение	10	2	1	
Рабочая температура	ПБТ ПА ПК	Деградация прочностных свойств	3	3	7	3 – снижение прочности в ходе эксплуатации учитывается при проектировании, дефекты
Аварийный перегрев	ПБТ ПА ПК	Деградация прочностных свойств	3	3	7	3 – по данным практических наблюдений, в условиях Арктики заметного перегрева корпуса вентилятора не наблюдается вплоть до аварийного останова двигателя
		Разрушение	10	3	10	

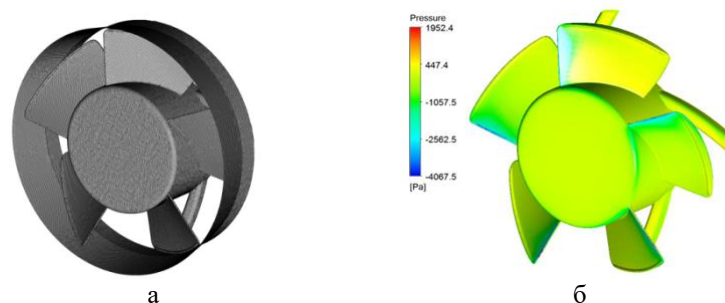


Рис. 2. Поверхностная сетка контрольных объемов (а) и распределение поля давлений на поверхности лопаток (б)
 Fig. 2. The surface grid of the control volumes (a) and the distribution of the pressure field on the blades surfaces of (б)

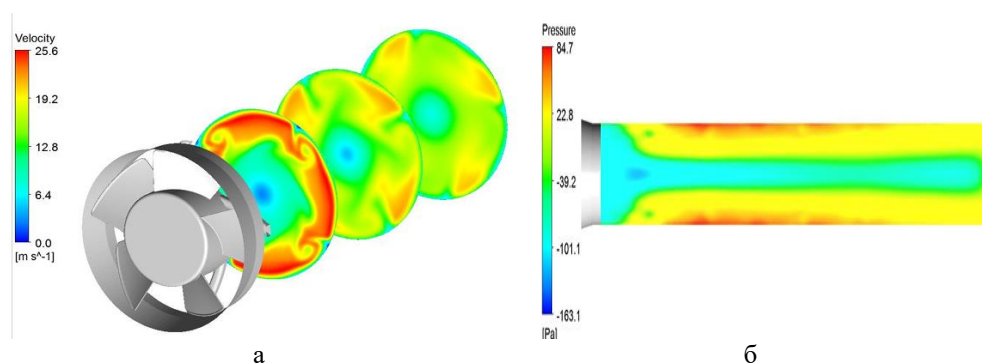


Рис. 3. Пример распределения поля скоростей в сечениях при удалении от вентилятора (а) и статического давления за вентилятором (б)
 Fig. 3. An example of the distribution of the velocity field in sections at a distance from the fan (a) and the static pressure behind the fan (б)

Данные расчеты позволили создать геометрическую модель проточной части вентилятора и провести анализ полученных результатов. Оценка прочности была выполнена с помощью метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS [9]. В качестве нагрузок учитывалось влияние центробежной силы, возникающей при вращении с заданной угловой скоростью. В соответствии с прочностным расчетом конструкции было определено, что прочность материала при 20°C в ходе всего срока службы конструкции не должна опуститься ниже 100 МПа.

Также выполнен расчет влияния напряженно-деформированного состояния крыльчаток вентиляторов от давления, создаваемого воздушным потоком на лопатки, и получены диаграммы зависимости действующих напряжений от плотности различных материалов – алюминиевых сплавов АМГ6 и Д16, титанового сплава ВТ6, магниевого сплава МА1 и стеклонаполненных полимерных композиционных материалов: ПБТ, ПА и ПК.

В качестве нагрузок были приложены центробежные силы, возникающие при вращении с определенными ранее угловыми скоростями вращения. При помощи программного комплекса ANSYS были получены значения действующих в конструкции напряжений и показано, что все предполагаемые материалы удовлетворяют требованиям прочности под действием эксплуатационных нагрузок. Однако наряду с эксплуатационными нагрузками вентиляторы зачастую испытывают ударное нагружение. Известно, что практически каждое электротехническое изделие подвергается внешним воздействиям, в том числе одиночным или многократным ударами различной природы в процессе транспортировки, монтажа и эксплуатации [2, 3].

Моделирование испытаний на сопротивляемость ударным воздействиям были выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 28213-89 и ГОСТ 28215-89. В ходе расчетов был выполнен учет дополнительных масс, оказывающих инерционное воздействие – магнита и электродвигателя.

Условие прочности – отсутствие дефектов и микроразрывов конструкции, то есть напряжения, возникающие в конструкции, не должны превышать предел текучести материала. В ходе проведения расчетов был обнаружен ряд характерных точек, в которых напряжения во время испытаний оказываются максимальными, причем в этих точках условие прочности не выполняется для всех анализируемых металлических материалов. В то же время для всех ПКМ условие прочности было выполнено.

Следующей задачей, решаемой в работе, стало комплексное исследование процессов в материалах конструкций в экстремальных условиях Арктики. Основным ограничением использования ПКМ в Арктике являются требования к морозостойкости, то есть их способности сохранять заданные физико-механические и эксплуатационные свойства при температурах ниже температуры стеклования для

аморфных полимеров или ниже температуры хрупкости для кристаллизующихся полимеров [10]. Количественно морозостойкость полимерного материала определяется температурой, при снижении до которой сохраняется требуемый уровень определенного физико-механического показателя, в частности прочности, гибкости, эластичности, либо расчетным коэффициентом отношения показателя физико-механических свойств при пониженной и комнатной температурах [10, 11].

Для оценки возможности использования перечисленных в табл. 1 и 2 ПКМ для вентиляторов северного исполнения была исследована длительная морозостойкость и стойкость в условиях низко- и высокотемпературного воздействия на ПКМ в условиях, максимально имитирующих условия эксплуатации оборудования. Так как результаты математического моделирования показали возможность использовать все три ПКМ, были проведены испытания стеклонаполненных ПБТ, ПА и ПК.

В табл. 3 приведены результаты оценки уровня водопоглощения образцов ПКМ. Максимальный уровень водопоглощения определяется у ПА, минимальный – у ПБТ.

Исследованиями ударной вязкости ПКМ (табл. 4) показано, что динамические свойства ПКМ формируются за счет вязкости матрицы [12] – разрушение ПБТ при минус 60°C носит абсолютно хрупкий характер и его ударная вязкость по Шарпи с надрезом при минус 60°C близка к нулю; хотя при комнатной температуре в структуре излома материала были отмечены отдельные участки вязкого разрушения матрицы.

Таблица 3. Водопоглощение образцов ПКМ
Table 3. Water absorption of PCM samples

Материал	Водопоглощение, %, за период, ч			
	12	24	36	48
ПА	1,57	2,64	2,82	3,04
ПБТ	0,04	0,06	0,07	0,08
ПК	0,16	0,21	0,24	0,25

Таблица 4. Средние и минимальные значения ударной вязкости образцов ПКМ в исходном состоянии, после насыщения водой в течение 24 ч

Table 4. Average and minimum impact strength values of PCM samples in the initial state after water saturation for 24 hours

Материал	Температура, °C	Средняя ударная вязкость КСВ _{сред} , МДж/м ²		Минимальная ударная вязкость КСВ _{мин} , МДж/м ²	
		Исходное состояние	После водопоглощения	Исходное состояние	После водопоглощения
ПА	20	10,4	4,6	9,0	3,1
	-60	8,8	1,2	6,1	0,7
ПБТ	20	6,0	6,0	5,3	4,8
	-60	0,2	0,1	0	0
ПК	20	9,9	8,6	9,3	5,1
	-60	8,0	7,6	5,9	5,0

Анализом изломов показано, что при нормальных температурах магистральная трещина развивается по матрице материала, огибая волокна наполнителя. В изломах образцов ПБТ был обнаружен достаточный объем вязкого ямочного отрыва, при пониженных температурах доля вязкой составляющей в изломах снижается практически до нуля, хрупкая трещина развивается по всей массе материала, разрушая как матрицу, так и нити наполнителя, раскалывая их или вырывая нити из тела матрицы.

Механизм разрушения образцов ПА в исходном состоянии соответствует вязкому и квазихрупкому механизму во всем температурном диапазоне, после насыщения образцов водой механизм разрушения смещается в сторону хрупкого разрушения, это особо заметно при минус 60°C. Испытания показали, что ПА и самая популярная для изготовления узлов и деталей конструкций электротехнического назначения ПБТ-матрица не соответствуют требованиям, предъявляемым к материалам для вентиляторов, предназначенных для эксплуатации в условиях открытого воздуха Арктики.

Механизм разрушения образцов ПК (рис. 4) вязкий – вне зависимости от температуры и воздействия влаги. Главным различием вида разрушения образцов полимера и ПКМ на базе ПК является отсутствие следов хрупкой магистральной трещины на поверхности изломов, то есть наполнитель позволил исключить самый главный недостаток поликарбонатов – нулевую трещиностойкость материала.

По результатам проведенных исследований было определено, что единственным из изученных ПКМ материалом, пригодным для изготовления деталей вентиляторов, является стеклонанополненный поликарбонат. Механические свойства этого материала были изучены в условиях длительных выдержек при повышенных и пониженных температурах, когда образцы перед проведением испытаний были выдержаны в термостате и холодильной камере при заданных тем-

пературах, а затем испытаны на одноосное статическое растяжение (табл. 5). В таблице также приведен показатель Y – коэффициент, рекомендованный к использованию при проведении прочностных расчетов полимеров и учитывающий особенности их поведения при длительной эксплуатации [13, 14]. Коэффициент Y рассчитывается как отношение фактического значения прочности материала к его прочности при 23°C, что позволяет более полно учитывать роль температурного фактора эксплуатации.

Как следует из данных табл. 5, старение при температуре 70°C соответствует условиям эксплуатации оборудования и весьма незначительно сказывается на прочности ПКМ, повышение температуры старения до 95°C (экспертная оценка возможной температуры перегрева корпусных элементов) также практически не изменяет прочностных свойств ПК. Захлаживание в течение 2400 ч приводит к падению прочности всего на 5–18 МПа и легко прогнозируется на более длительные времена эксплуатации, насыщение образцов ПК водой также не оказывает существенного влияния на прочность при разрыве материала.

Однако, как известно, оборудование в Арктике при эксплуатации испытывает воздействие еще ряда климатических факторов, главенствующими из которых являются термоциклические воздействия перехода через ноль и повышенный уровень соли в воздухе прибрежных арктических зон. Испытания воздействия соляного тумана были выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 30630.2.5–2013. Общее время пребывания образцов в соляном тумане составляло от 1 до 30 суток. Термоциклические воздействия были осуществлены путем быстрого (не более 5 с) перемещения образца между двумя климатическими камерами, одна из которых была разогрета до 70°C, вторая охлаждена до минус 60°C. Влажность воздуха в камерах поддерживалась на уровне 95–98%. Результаты механических испытаний показаны в табл. 6.

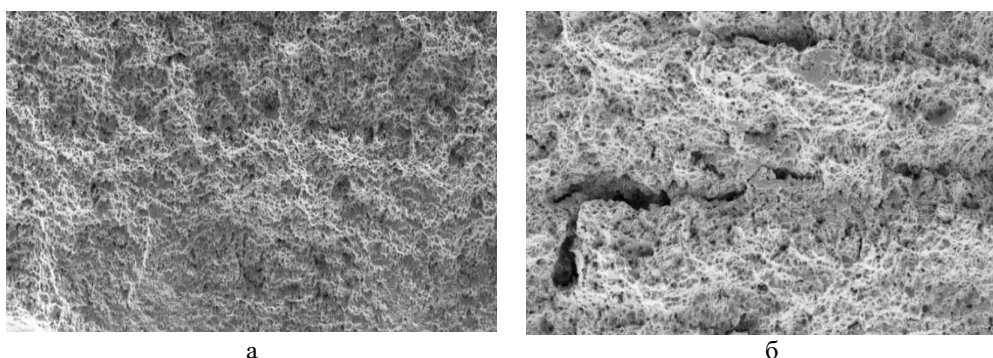


Рис. 4. Поверхности разрушения образцов ПК после ударного воздействия при минус 60°C: а – в исходном состоянии; б – после насыщения водой, $\times 100$

Fig. 4. The fracture surfaces of PC samples after impact at minus 60°C: a is in the initial state; b is after water saturation, $\times 100$

Таблица 5. Механические характеристики образцов ПК старения при 70, 95°C и захлаживания при -60°C
 Table 5. Mechanical characteristics of PC samples ageing at 70°C and 95°C and cooling at -60°C

Состояние	$T_{исп}, ^\circ C$	Прочность при разрыве s_{pp}, MPa	γ	Относительное удлинение $\epsilon_{pp}, \%$
Исходное состояние	23	134		5,2
	20	134	1,0	5,1
	-60	161	1,20	3,9
Старение 200 ч, 70°C ¹⁾	20	131	0,98	5,0
	-60	160	1,19	3,7
Старение 1000 ч, 70°C	20	128	0,96	4,8
	-60	154	1,15	3,4
Старение 200 ч, 95°C ²⁾	20	130	0,98	4,9
	-60	160	1,19	3,5
Старение 1000 ч, 95°C	20	126	0,95	4,7
	-60	152	1,14	3,2
Захлаживание 200 ч, - 60°C	20	134	1,0	5,1
	-60	158	1,19	3,9
Захлаживание 2400 ч, - 60°C	20	129	0,97	3,8
	-60	148	1,10	3,4
Водопоглощение 24 ч + захлаживание 200 ч, -60°C 200 ч ³⁾	20	132	0,99	4,4
	-60	147	1,10	3,4
Водопоглощение 24 ч + захлаживание 1000 ч, - 60°C	20	127	0,95	4,0
	-60	144	1,07	3,2

Примечание:

- 1) Уровень рабочих (штатных) температур эксплуатации.
- 2) Экспертная оценка возможного уровня нагрева материалов конструкции при перегреве двигателя.
- 3) Уровень водопоглощения после 24 ч – 0,21%.

Таблица 6. Влияние термоциклирования и соляного тумана на механические свойства образцов
 Table 6. Effect of thermal cycling and salt mist on the mechanical properties of the samples

$T, ^\circ C$	Термоциклы					Соляной туман				
	Цикл, шт.	s_{pp}, MPa	γ	$\epsilon_{pp}, \%$	KCV, кДж/м ²	Время пребывания, ч	s_{pp}, MPa	γ	$\epsilon_{pp}, \%$	KCV, кДж/м ²
20	10	133	0,99	5,2	9,6	12	131	0,98	5,1	9,7
-60		161	1,19	5,1	7,8		157	1,17	4,4	7,8
20	50	124	0,93	4,6	9,3	24	127	0,95	4,6	9,4
-70		149	1,11	3,8	7,3		149	1,11	3,8	7,3
20	100	120	0,90	4,4	9,0	96	124	0,93	4,3	9,0
-70		146	1,09	3,7	7,1		141	1,05	3,6	6,9
20	200	114	0,85	3,9	8,5	720	112	0,84	3,5	8,3
-70		137	1,02	3,3	6,5		126	0,94	2,7	6,0

Как следует из приведённых в табл. 5 и 6 данных, влияние внешних климатических факторов хотя и сказывается на свойствах ПКМ, изготовленного путем введения в поликарбонатную матрицу мелкорубленых нитей стекловолокна, тем не менее не приводит к катастрофическому разрушению материала и изготовленных из него конструкций. Минимальное значение прочности при разрыве, полученное в ходе испытаний, составило 112 МПа, что значительно выше полученного при прочностном расчете конструкции уровня требуемой прочности – 100 МПа. Сохранение вязкого механизма отрыва при динамическом разрушении ударных образцов при температуре минус 60°C указывает на достаточный запас трещиностойкости данного ПКМ. Таким образом, была решена задача выбора отечественного материала с мини-

мальной плотностью и механическими свойствами, обеспечивающими безопасную эксплуатацию вентиляторов для северных территорий с заданными технологическими параметрами.

Заключение

1. Математическое моделирование условий эксплуатации и особенностей нагружения вентиляторов, массогабаритные размеры которых строго определены технологическими требованиями эксплуатации и особенностями климатических условий в Арктической зоне РФ, показало, что наиболее перспективным направлением является изготовление таких изделий из полимерных композиционных материалов, обладающих малой плотностью и высоким уровнем удельной прочности.

2. Выполнен анализ рисков и последствий потенциальных несоответствий вентиляторов. Показано, что при выполнении анализа необходимо ввести учет дополнительного фактора – опасности разрушения конструкции. Методом FMEA удалось решить комплексную задачу по описанию факторов риска, влияющих на эксплуатацию вентиляторов, изготовленных из ПКМ.

3. Показано, что использование наиболее распространенных в условиях средних широт ПКМ на основе полиамидов и полибутилентерефталатов в условиях экстремально низких температур и высокой влажности воздуха могут приводить к развитию аварийных ситуаций из-за резкого снижения деформационной способности материалов. В то же время подтверждена возможность применения полимерных композиционных материалов на основе поликарбоната, свойства которых остаются на необходимом уровне для безопасной и надежной эксплуатации узлов и деталей различного назначения в условиях климатического воздействия Арктического климата.

Список источников

1. Ермаков Б.С., Швецов О.В., Ермаков С.Б. Особенности применения полимерных композиционных материалов при обустройстве нефтегазовых месторождений Арктического пояса // Глобальная энергия. 2025. Т. 31. № 1. С. 112–121.
2. Горбунов В.П. Решение проблем адаптации и эксплуатации систем жизнеобеспечения воздушных судов западного производства в условиях экстремально низких температур Крайнего Севера, Сибири и Арктики // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. №218. С. 50–53.
3. Рухлинский В.М., Горбунов В.П. Решение проблем эксплуатации ВС иностранного производства в условиях экстремально низких температур // Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития (1-2 ноября 2012 г.): тезисы докладов III Междунар. науч.-практ. конф. Ульяновск: УлГУ, 2012. С. 40–42.
4. Муравьев К.А. Особенности эксплуатации оборудования нефтяной и газовой промышленности в условиях Крайнего Севера и Арктики. Surgut: TIU, 2023. 41 с.
5. Арктика: вентиляторы. URL: igp-tc.ru/arktika-ventilyatory.html
6. Description 2018 ASHRAE Handbook—Refrigeration URL: <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/description-2018-ashrae-handbook-refrigeration>.
7. Ключков Ю.С., Коваль Н.О. Развитие метода развертывания функций качества на этапе проектирования продукции // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. Т. 26. № 4–3 (120). С. 428–436.
8. Ключков Ю.С., Фокин Г.А., Сыровацкий О.В. Учет неопределенности при проведении процедуры FMEA-анализа // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23, № 6(104). С. 26–32.
9. Иванов И.И., Чеповский А.Е. Программные средства обработки результатов расчетов в инженерных пакетах Ansys CFX и Abaqus для высокопроизводительных вычислительных установок. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 193 с.
10. Кулезнёв В.Н., Шершнёв В.А. Химия и физика полимеров. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колосс, 2007. 367 с.
11. Бартенев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров / под ред. д-ра физ.-мат. наук Ельяшевича А.М. Л.: Химия, 1990. 432 с.
12. Мосинок В.Н. Теплоустойчивое эпоксидно-бисмалеимидное связующее с повышенной трещиностойкостью для изготовления полимерных композиционных материалов по безавтоматическим технологиям формования: дис. ... канд. техн. наук. Обнинск: АО «Обнинское производственное предприятие «Технология» ГНЦ РФ, 2024. 116 с.
13. Рекомендации по проектированию и расчету конструкций с применением пластмасс / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М., 1969. 149 с.
14. Влияние температуры на физико-механические свойства монолитного поликарбоната / Авадеев К.В., Бобров В.В., Тучин М.А., Домашова Е.В., Кудрявцев Н.А., Скакун П.В. // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. №20(1). С. 73–83.

References

1. Ermakov B.S., Shvetsov O.V., Ermakov S.B. Features of the use of polymer composite materials in the development of oil and gas fields in the Arctic zone. *Globalnaia energiya* [Global energy]. 2025;31(1):112-121. (In Russ.)
2. Gorbunov V.P. Solving the problems of adaptation and operation of Western-made aircraft life support systems in the extremely low temperatures of the Far North, Siberia and the Arctic. *Nauchnyi vestnik MGTU GA* [Scientific bulletin of MSTU CA]. 2015;(218):50-53. (In Russ.)
3. Rukhlinskii V.M., Gorbunov V.P. Solving the problems of operating foreign-made aircraft at extremely low temperatures. *Sistemy upravleniia zhiznennym tsiklom izdelii aviatsionnoi tekhniki: aktualnye problemy, issledovaniia, opyt vnedreniia i perspektivy razvitiia: tezisy докладов III Mezhdunar. nauch.-praktich. konf* [Life cycle management systems for aviation technology products: current issues, research, implementation experience and development prospects: abstracts of the III International Scientific and Practical Conference]. Ulyanovsk: Ulsu, 2012, pp. 40-42. (In Russ.)
4. Muravev K.A. *Osobennosti ekspluatatsii oborudovaniia nefianoi i gazovoi promyshlennosti v usloviakh Krainego Severa i Arktiki* [Features of operation of oil and gas industry equipment in conditions of The Far North and the Arctic]. Surgut: TIU Publishing House, 2023, 41 p. (In Russ.)
5. *Arktika: ventilyatory* [Arctic: air mover]. Available at: igp-tc.ru/arktika-ventilyatory.html
6. Description 2018 ASHRAE Handbook-Refrigeration. Available at: <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook/description-2018-ashrae-handbook-refrigeration>.
7. Klochkov Yu.S., Koval N.O. Development of a method for deploying quality functions at the product design stage. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of

- the Russian Academy of Sciences]. 2024;26(4-3(120)):428-436. (In Russ.)
8. Klochkov Yu.S., Fokin G.A., Syrovatskii O.V. Consideration of uncertainty during the FMEA analysis procedure *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2021;(23(6(104))):26-32. (In Russ.)
 9. Ivanov I. I., Chepovskii A. E. Programmnye sredstva obrabotki rezultatov raschetov v inzhenernykh paketakh Ansys CFX i Abaqus dlia vysokoproizvoditelnykh vychislitelnykh ustanovok [Software tools for processing calculation results in the engineering packages Ansys CFX and Abaqus for high-performance computing units]. Moscow: MSTU n.a. N.E. Bauman Publishing House, 2014, 193 p. (In Russ.)
 10. Kuleznev V.N., Shershnev V.A. *Khimiia i fizika polimerov* [Chemistry and physics of polymers]. Moscow: Koloss, 2007, 367 p. (In Russ.)
 11. Bartenev G.M., Frenkel S.Ya. *Fizika polimerov* [Physics of polymers]. Leningrad: Khimiia, 1990, 432 p. (In Russ.)
 12. Mosiyuk V.N. Teplostoikoe epoksibismaleimidnoe sviazuiushchee s povyshennoi treshchingostoikostiu dlia izgotovleniia polimernykh kompozitsionnykh materialov po bezavtoklavnykh tekhnologiiam formovaniia: dis. ... kand. tekhn. nauk [Heat-resistant epoxybismaleimide binder with increased crack resistance for the manufacture of polymer composite materials using autoclave-free molding technologies. PhD dissertation]. Obninsk, 2024. 116 p.
 13. *Rekomendatsii po proektirovaniu i raschetu konstrukttsii s primeneniem plastmass* [Recommendations for the design and calculation of structures using plastics]. Moscow: Central Research Institute of Building Constructions named after V.A. Kucherenko, 1969, 149 p. (In Russ.)
 14. Avadeev K.V., Bobrov V.V., Tuchin M.A., Domashova E.V., Kudriavtsev N.A., Skakun P.V. Influence of temperature on the physical and mechanical properties of monolithic polycarbonate. *Stroitelnaia mekhanika inzhenernykh konstrukttsii i sooruzhenii* [Construction mechanics of engineering structures]. 2024;(20(1)):73-83. (In Russ.)

Поступила 26.08.2025; принята к публикации 01.09.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 26/08/2025; revised 01/09/2025; published 25/12/2025

Ермаков Сергей Борисович – кандидат технических наук, директор центра технологических инициатив, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: ermakovsb@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-4243-0984

Sergey B. Ermakov – PhD(Eng.), Director of the Center for Technological Initiatives, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: ermakovsb@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-4243-0984

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

METALLURGICAL POWER ENGINEERING, ENERGY SAVING AND ELECTRICAL SYSTEMS

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

УДК 621.365.22 + 621.3.011.72

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-186-196



ИССЛЕДОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ УСТАНОВКИ КОВШ-ПЕЧЬ

Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С., Буланов М.В.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Современная электрометаллургия представляет собой одну из наиболее перспективных отраслей отечественной металлургической промышленности. Благодаря высоким технико-экономическим показателям по сравнению с другими способами выплавки стали, все большее распространение получили электросталеплавильные комплексы на основе дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь. В настоящее время подавляющее большинство систем управления электрическим режимом установок ковш-печь не используют адаптацию электрических режимов работы к условиям продувки расплава инертным газом, а также шлаковым режимам, что приводит к их неоптимальной работе и повышению эксплуатационных издержек. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка усовершенствованных алгоритмов автоматического управления электрическими режимами, в которых данный недостаток будет компенсирован. **Цель работы.** Разработка и оценка эффективности нового алгоритма управления электрическим режимом установок ковш-печь, в котором будет обеспечена адаптация электрического режима работы установки к постоянно меняющимся режимам продувки и шлаковым режимам с использованием информации о гармоническом составе токов электрических дуг. **Используемые методы.** Работа выполнена с использованием методов статистического и теоретического анализа, математического моделирования, а также экспериментальных исследований на действующем производственном объекте. **Новизна.** В усовершенствованной системе управления электрическим режимом установок ковш-печь используется анализ гармонического состава токов дуг для адаптации электрического режима к режимам продувки и шлаковому режиму. **Результат.** Разработан принципиально новый алгоритм управления электрическим режимом установок ковш-печь с адаптацией к технологическим условиям процесса плавки. **Практическая значимость.** Применение разработанного алгоритма позволяет уменьшить величину удельного расхода электроэнергии в процессе плавки, что, в свою очередь, обеспечит снижение себестоимости конечного продукта.

Ключевые слова: установка ковш-печь, электрическая дуга, система управления электрическим режимом, гармонический состав токов дуг, шлаковый режим, режим аргоновой продувки

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZRU-2023-0008).

© Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С., Буланов М.В., 2025

Для цитирования

Исследование усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами установки ковш-печь / Николаев А.А., Тулупов П.Г., Рыжевол С.С., Буланов М.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 186-196. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-186-196>



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

STUDY OF AN IMPROVED ALGORITHM FOR AUTOMATIC CONTROL OF ELECTRICAL MODES OF A LADLE FURNACE UNIT

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ryzhevol S.S., Bulanov M.V.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Modern electrometallurgy is one of the most promising sectors of the domestic metallurgical industry. Due to their superior technical and economic performance compared to other steelmaking methods, electric steelmaking systems based on electric arc furnaces (EAF) and ladle furnaces (LF) are becoming increasingly widespread. Currently, the vast majority of LFU electrical control systems do not adapt their electrical operating modes to the conditions of inert gas purging into the melt or slag conditions, resulting in suboptimal operation and increased operating costs. Therefore, the development of improved algorithms for automatic electrical modes control that will compensate for this shortcoming is particularly relevant. **Objectives.** The research is aimed at developing and evaluating the effectiveness of the new algorithm for the LF electrical mode control, which will ensure adaptation of the electrical operating mode of the unit to constantly changing purging and slag modes using information on the harmonic composition of electric arc currents. **Methods Applied.** The work was performed using statistical and theoretical analysis, mathematical modeling, and experimental studies at an operating production facility. **Originality.** It lies in the fact that the improved control system for the electrical mode of the LF uses an analysis of the harmonic composition of arc currents to adapt the electrical mode to the purging and slag modes. **Result.** A fundamentally new algorithm for the LF electrical mode control with adaptation to the technological conditions of the melting process has been developed. **Practical Relevance.** The use of the developed algorithm allows for a reduction in the specific energy consumption during the melting process, which in turn will ensure a reduction in the cost of the final product.

Keywords: ladle furnace, electric arc, electric mode control system, harmonic composition of electric arc current, slag mode, argon purging mode

The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZRU-2023-0008).

For citation

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Ryzhevol S.S., Bulanov M.V. Study of an Improved Algorithm for Automatic Control of Electrical Modes of a Ladle Furnace Unit. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 186-196. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-186-196>

Введение

В настоящее время электрометаллургия представляет собой одну из наиболее перспективных отраслей отечественной металлургической промышленности. Благодаря высоким технико-экономическим показателям по сравнению с другими способами выплавки стали, все большее распространение получили электросталеплавильные комплексы на основе дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП). В рамках данного технологического комплекса ДСП выполняет функцию основного агрегата для расплавления твердой металлошихты для получения жидкой стали, последующая доводка которой до требуемых параметров, в том числе окончательное раскисление, удаление серы, легирование и доведение до требуемой температуры, осуществляется в УКП.

Современные установки ковш-печь характеризуются следующими показателями: удельная мощность печного трансформатора находится в диапазоне 0,14–0,3 МВА/т, продолжительность цикла плавки состав-

ляет около 60 мин, а масса выплавляемой стали — от 100 до 250 т. Неотъемлемой частью технологии производства в УКП является перемешивание жидкой стали в ковшах инертным газом, обеспечивающее выравнивание температуры и достижение изотропности химического состава. Подача газа производится через продувочные блоки, расположенные в днище стальковша, или через аварийную фурму.

Особенностью технологического процесса выплавки стали в УКП является возникновение разрыва шлакового слоя при достижении определенной интенсивности продувки. На поверхности расплава в районе продувочного блока образуется так называемое зеркало жидкого металла, что приводит к оголению и, как следствие, к снижению теплового КПД электрических дуг, расположенных в непосредственной близости к продувочным блокам. Дальнейшее увеличение расхода аргона может вызвать образование сильных волн и всплесков на поверхности жидкого металла, что создаёт риск возникновения эксплуатационных коротких замыканий. Наглядно данное явление продемонстрировано с помощью **рис. 1**.

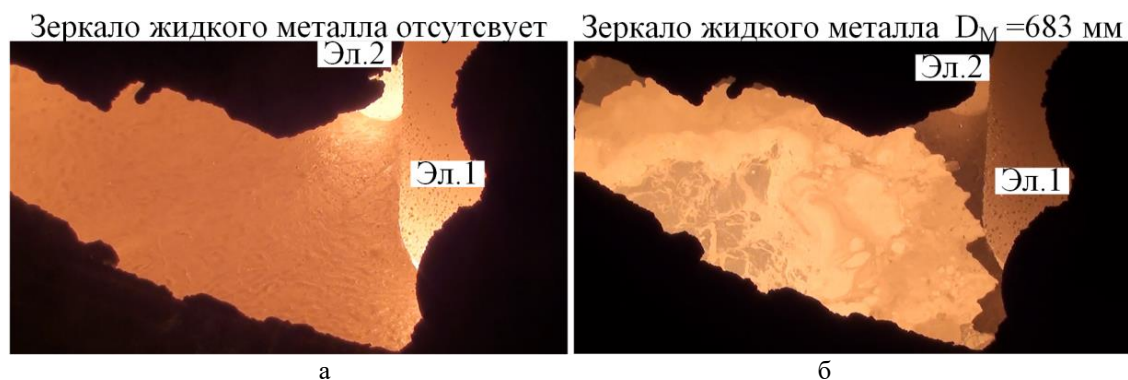


Рис. 1. Возмущения на поверхности жидкого металла, создаваемые работой продувочных блоков: Эл.1 и Эл.2 – графитированные электроды У КП

Fig.1. Disturbances on the surface of liquid metal caused by the work of purging blocks: el.1 and el.2 are LF graphite electrodes

Существующие системы управления У КП не учитывают условия аргонной продувки и шлаковый режим. Таким образом, целью данного исследования является разработка и исследование эффективности усовершенствованного алгоритма автоматического управления электрическими режимами У КП с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора к режимам аргонной продувки.

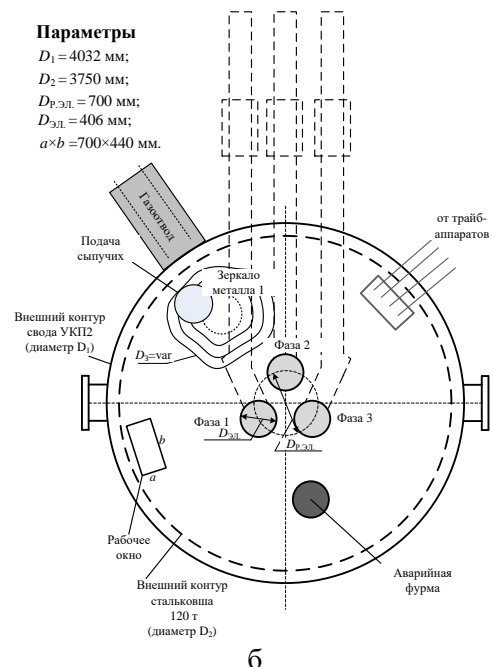
Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования в данной работе

выбрана У КП ёмкостью 120 т, функционирующая на одном из отечественных металлургических предприятий. На У КП используется печной трансформатор с номинальной мощностью $S_{ПТ.ном} = 25$ МВА и номинальным первичным напряжением $U_{1ном} = 35$ кВ. Применяемый трансформатор имеет 23 ступени вторичного напряжения. Диапазон изменения вторичного линейного напряжения составляет $U_{2ном} = 417-131$ В. Номинальный ток вторичной обмотки печного трансформатора одинаковый для всех ступеней напряжения $I_{2ном} = 34,6$ кА. Для наглядности общий вид установки и её геометрические параметры представлены на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Общий вид исследуемой У КП (а) и основные геометрические параметры исследуемой У КП (б)

Fig. 2. General view of LF under study (a) and general geometrical parameters of LF under study (б)

Для реализации автоматической адаптации электрических режимов У КП к меняющимся условиям работы необходимо использование специализированного параметра, адекватно отражающего режимы горения электрических дуг. В рамках исследования [1] были представлены экспериментальные подтверждения взаимосвязи между шлаковыми режимами, параметрами аргонной продувки, стабильностью горения дуг, их тепловым КПД и гармоническим составом токов. Таким образом, управление электрическими режимами может осуществляться с использованием информации о гармоническом составе токов дуг. Необходимо отметить, что данный подход используется зарубежными компаниями-производителями электросталеплавиных агрегатов и систем автоматического управления электрическими режимами, такими как Primetals Technologies (бывший Siemens VAI), Danieli и др. В частности, в системах управления ДСП на основании высших гармоник тока рассчитываются коэффициенты вспенивания шлака, служащие исходными параметрами для систем автоматического управления инжекторами углерода. Необходимо отметить, что коэффициент гармонических искажений также используется и на У КП в блоках динамической адаптации.

Поскольку разрабатываемые алгоритмы предназначены для динамической адаптации к режимам аргонной продувки и шлаковым режимам, то для удобства управления, а также для наглядности и понимания процессов технологическим персоналом целесообразно ввести величину, отражающую фактическое состояние слоя шлака и зависящую от гармонического состава токов электрических дуг. В качестве такого критерия предлагается использовать коэффициент шлака $K_{\text{ШЛАК}}$, который является аналогом коэффициента вспенивания шлака [2-4], используемого в ДСП, для автоматического управления инжекторами углеродосодержащего материала (УСМ).

В системах управления У КП [5-7] коэффициент вспенивания шлака $K_{\text{ШЛАК}}$ может быть определен как обратная величина от K_1 с учетом масштабного коэффициента a . Для наглядного объяснения взаимосвязи $K_{\text{ШЛАК}} = f(K_1)$ на рис. 3 приведена зависимость изменения коэффициента шлака от среднего по фазам коэффициента суммарных гармонических искажений токов дуг. Коэффициенты $K_{\text{ШЛАК}}$ и K_1 рассчитывались в системе автоматического управления электрическими режимами и перемещением электродов ArCOS. Как видно из рис. 3, $K_{\text{ШЛАК}}$ с достаточно высокой статистической точностью ($R^2 = 0,875$) описывается выражением

$$K_{\text{ШЛАК}} = \frac{a}{K_1}, \quad (1)$$

при этом коэффициент a может быть определен как произведение 100 на минимальное значение K_{Imin} ,

зафиксированное за цикл плавки при существующей электрической дуге ($I_{\text{д}} > 0$):

$$a = 100 \cdot K_{\text{Imin}}. \quad (2)$$

При корректном расчете параметра a максимальное значение $K_{\text{ШЛАК}}$, равное 100 единицам, будет соответствовать наиболее стабильному режиму горения электрической дуги с максимальным тепловым КПД.

Коэффициент гармонических искажений тока K_1 может быть рассчитан по следующей формуле:

$$K_1 = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2 - I_{(0)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100\% = \frac{I_{\text{ВГ}}}{I_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где I – действующее (среднеквадратическое) значение тока; $I_{(1)}$ – действующее значение тока 1-й гармоники; $I_{(0)}$ – постоянная составляющая тока; $I_{\text{ВГ}}$ – действующее значение высших гармоник тока.

Использование параметра $K_{\text{ШЛАК}}$ в алгоритмах автоматического переключения рабочих кривых и ступеней РПН печных трансформаторов позволяет адаптировать электрические режимы У КП с учетом переменной толщины шлака, режимов аргонной продувки, операций подачи материалов в ковш при нагреве и т.д.

Основным принципом управления, положенным в основу алгоритма автоматического управления электрическими режимами, является уменьшение длин дуг при снижении $K_{\text{ШЛАК}}$. В случае если поддержание приемлемого $K_{\text{ШЛАК}}$ на самых коротких дугах не обеспечивается, тогда выполняется автоматическое понижение рабочей ступени печного трансформатора. Напротив, при большом значении $K_{\text{ШЛАК}}$ при работе на максимально длинных дугах формируется сигнал на увеличение ступени трансформатора с целью повышения мощностей дуг и коэффициента интенсивности нагрева КИН [8-10].

На основе данного принципа был разработан усовершенствованный алгоритм управления электрическим режимом У КП. Работа алгоритма иллюстрируется графиками, представленными на рис. 4. В свою очередь, на рис. 5 представлена блок-схема данного алгоритма. В целях упрощения на графиках смоделировано поведение фильтрованного значения $K_{\text{ШЛАК}}$ с возрастающим и спадающим участками. При достижении граничных коэффициентов шлака $K_{\text{ГР1.1}}$, $K_{\text{ГР2.1}}$ осуществляется увеличение длины электрической дуги и изменение степени несимметрии горения дуг с учетом расположения возмущения на поверхности жидкого металла. Для повышения устойчивости работы алгоритма и исключения автоколебаний при переключении $N_{\text{РК}}$ в алгоритм введены дублирующие значения граничных коэффициентов, работающие на понижение номера рабочей кривой: $K_{\text{ГР1}}$, $K_{\text{ГР2}}$. Данное решение обеспечивает гистерезис управляющего воздействия и стабильную работу при значениях $K_{\text{ШЛАК}}$, близких к граничным.

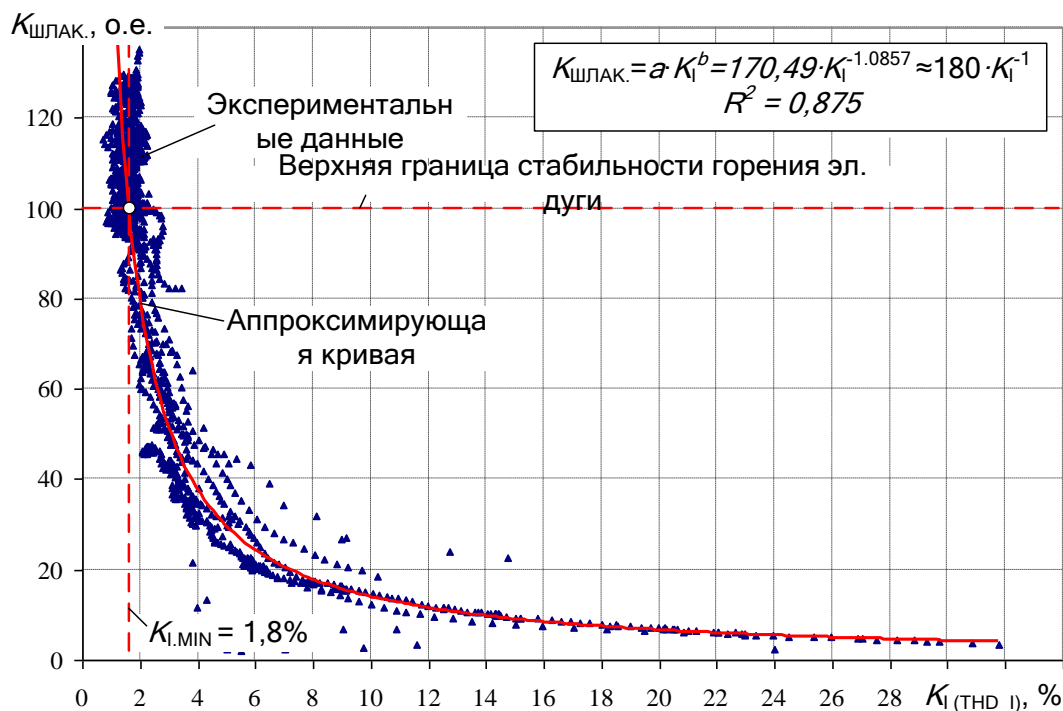


Рис. 3. Экспериментальная зависимость изменения коэффициента шлака от среднего по фазам коэффициента суммарных гармонических искажений токов дуг

Fig. 3. Experimental dependence of the change in the slag coefficient on the average phase coefficient of total harmonic distortion of arc currents

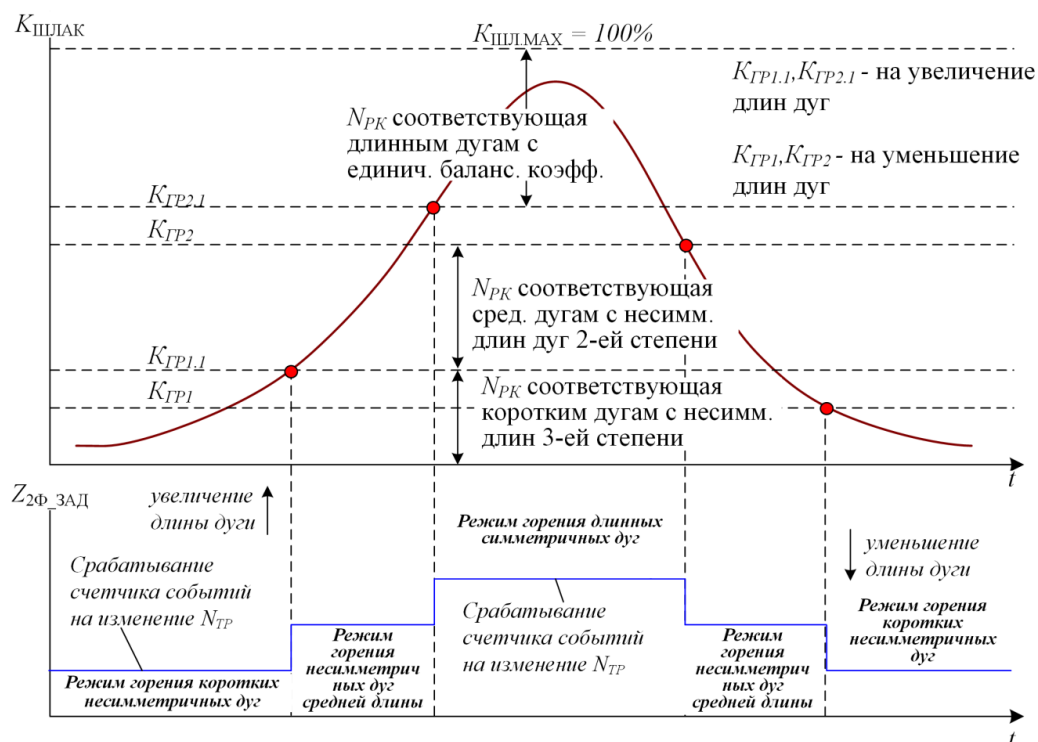


Рис. 4. Пояснение работы алгоритма автоматической адаптации электрических режимов к текущим условиям аргонной продувки и шлаковым режимам в зависимости от уровня коэффициента шлака $K_{\text{шлак}}$

Fig. 4. Explanation of the operation of the algorithm for automatic adaptation of electrical modes to the current conditions of argon purging and slag modes depending on the slag coefficient level $K_{\text{шлак}}$

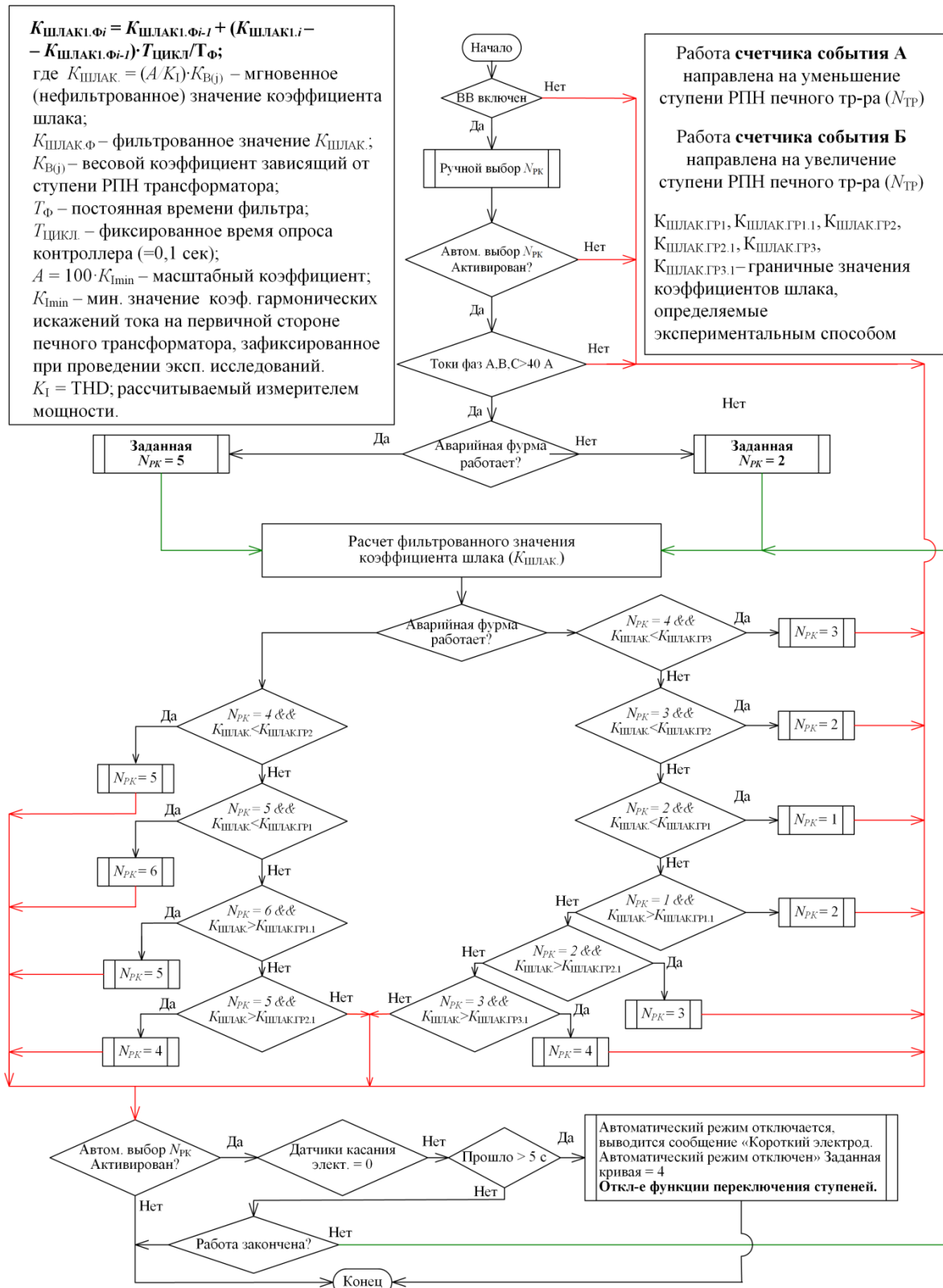


Рис. 5. Блок-схема алгоритма автоматического управления электрическими режимами УКП с динамической адаптацией длин электрических дуг и вторичного напряжения печного трансформатора

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for automatic control of the electrical modes of the LF with dynamic adaptation of the lengths of electric arcs and the secondary voltage of the furnace transformer

Важно отметить, что для расчета $K_{\text{ШЛАК}}$ необходимо использовать информацию о гармоническом составе токов дуг, находящихся в нестабильной зоне У КП. В случае когда измерение коэффициента гармонических искажений [11, 12] осуществляется на первичной стороне печного трансформатора, следует учитывать схему соединения обмоток печного трансформатора, а также измерительных цепей.

Полученные результаты и их обсуждение

Новый алгоритм автоматического управления электрическим режимом был внедрен на исследуемом У КП. На **рис. 6** приведены осциллограммы фактической работы усовершенствованных алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых и ступеней напряжения печного трансформатора [13-15]. Представленные осциллограммы наглядно демонстрируют принцип работы алгоритма, а именно уменьшение длин дуг при снижении $K_{\text{ШЛАК}}$.

Для анализа полученного технического эффекта от внедрения алгоритма сравнивались два периода работы агрегатов: 1) базовый – до внедрения усовершенствованных электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения рабочих кривых $N_{\text{РК}}$ и ступеней напряжения печного трансформатора $N_{\text{ТР}}$; 2) гарантийный – период экспериментальных исследований после внедрения усовершенствованных электрических режимов и алгоритмов автоматического переключения $N_{\text{РК}}$ и $N_{\text{ТР}}$. С целью набора необходимой статистической информации для последующей оценки технического эффекта длительность экспериментальных исследований составила 3 месяца как для базового (предгарантийного) периода, так и для периода гарантийных испытаний.

В условиях влияния большого количества факторов на удельный расход электроэнергии для повышения точности оценки технического эффекта необходимо применение регрессионных моделей изменения удельного расхода электроэнергии $W_{\text{уд}}$. Регрессионная модель представляет собой уравнение, связывающее удельный расход электроэнергии $W_{\text{уд}}$ с основными факторами, которые оказывают наибольшее влияние на параметр $W_{\text{уд}}$. Данные факторы выявляются с помощью построения корреляционной таблицы для больших массивов плавов (несколько сотен или тысяч) для двух анализируемых периодов, базового и гарантийного, с примерно одинаковым месячным объемом обработанной стали. Корреляционная таблица показывает статистическую взаимосвязь между анализируемым параметром $W_{\text{уд}}$ и всеми доступными параметрами из паспортов плавов (время работы под током, время цикла обработки, расход аргона за плавку, начальная, конечная температуры и средняя величина нагрева за плавку, вес отдельных легирующих и шлакообразующих материалов, отдаваемых в ковш в процессе обработки жидкой стали и т.д.). Те факторы, которые имеют высокий коэффициент корреляции с $W_{\text{уд}}$, отбираются для подстановки в уравнение регрессии.

Перед выполнением корреляционного и регрессионного анализа осуществляется подготовка статистических выборок параметров. Статистические выборки параметров исследуемого У КП были получены на основании обработанных паспортов плавов за периоды предгарантийных и гарантийных испытаний. Статистические выборки параметров представляют собой электронные таблицы, где для каждой строки с соответствующим номером плавки приведены значения энергетических, временных и технологических показателей работы агрегатов, таких как время цикла обработки стали, время работы под током, начальная и конечная температуры металла, абсолютная величина нагрева металла, суммарный расход аргона при продувке металла, признаки плавов с повторными обработками на У КП, обработки на У ВС и другие параметры.

После первичной подготовки выборок осуществлялись проверка массива данных и отсев плавов по следующим условиям: 1) тестовые «нулевые» плавки; 2) плавки с ошибочными данными по электроэнергии (отрицательные значения), некорректными значениями начальной и конечной температуры жидкого металла (отрицательные значения температуры, значения температуры, отличающиеся на несколько сот градусов от предполагаемого фактического значения), некорректными значениями времени работы под током и общего времени обработки металла (отрицательные значения $t_{\text{РТ}}$ и $t_{\text{ОБР}}$, ошибочные значения $t_{\text{РТ}} > t_{\text{ОБР}}$).

В результате отсева плавов с некорректными данными для исследуемого У КП были получены скорректированные выборки плавов для сравниваемых периодов. Уравнение регрессии, содержащее 8 факторов, имеет следующий вид:

$$W_{\text{уд}} = a \cdot t_{\text{ОБР}} + b \cdot t_{\text{РТ}} + c \cdot G_{\text{МЕТ}} + d \cdot T_{\text{МЕТ.НАЧ.}} + e \cdot T_{\text{МЕТ}} + f \cdot Q_{\text{АРГ}} + g \cdot t_{\text{ВЫД.СК.МЕТ.}} + h \cdot N_{\text{ТР.ЭКВ.}} + n, \quad (4)$$

где $G_{\text{ПЛ}}$ – вес плавки на У КП, [т]; $t_{\text{ВЫД.}}$ – выдержка металла в стальковше перед плавкой, [мин]; $N_{\text{ПЕРЕЛИВ}}$ – доля переливных плавов, [о.е.]; $N_{\text{УВС}}$ – доля плавов с обработкой на установке вакуумирования стали перед У КП, [о.е.]; $N_{\text{АФ}}$ – доля плавов с использованием аварийной фурмы, [о.е.]; $N_{\text{ТР.ЭКВ.}}$ – эквивалентная ступень напряжения печного трансформатора; $N_{\text{П.ОБР.}}$ – доля плавов с повторной обработкой на У КП, [о.е.]; $t_{\text{МЕТ.СК.}}$ – время нахождения металла в стальковше, [мин].

Результаты проведенного регрессионного анализа приведены в **табл. 1**. Внедрение нового алгоритма управления электрическим режимом У КП с использованием информации о гармоническом составе токов дуг и динамической адаптации к шлаковым режимам и режимам аргонной продувки позволило обеспечить снижение величины удельного расхода электроэнергии на 2,2% в гарантийном периоде по сравнению с предгарантийным. Полученный результат является значимым для такого энергоёмкого технологического агрегата как У КП и обеспечит существенное снижение себестоимости конечного продукта.

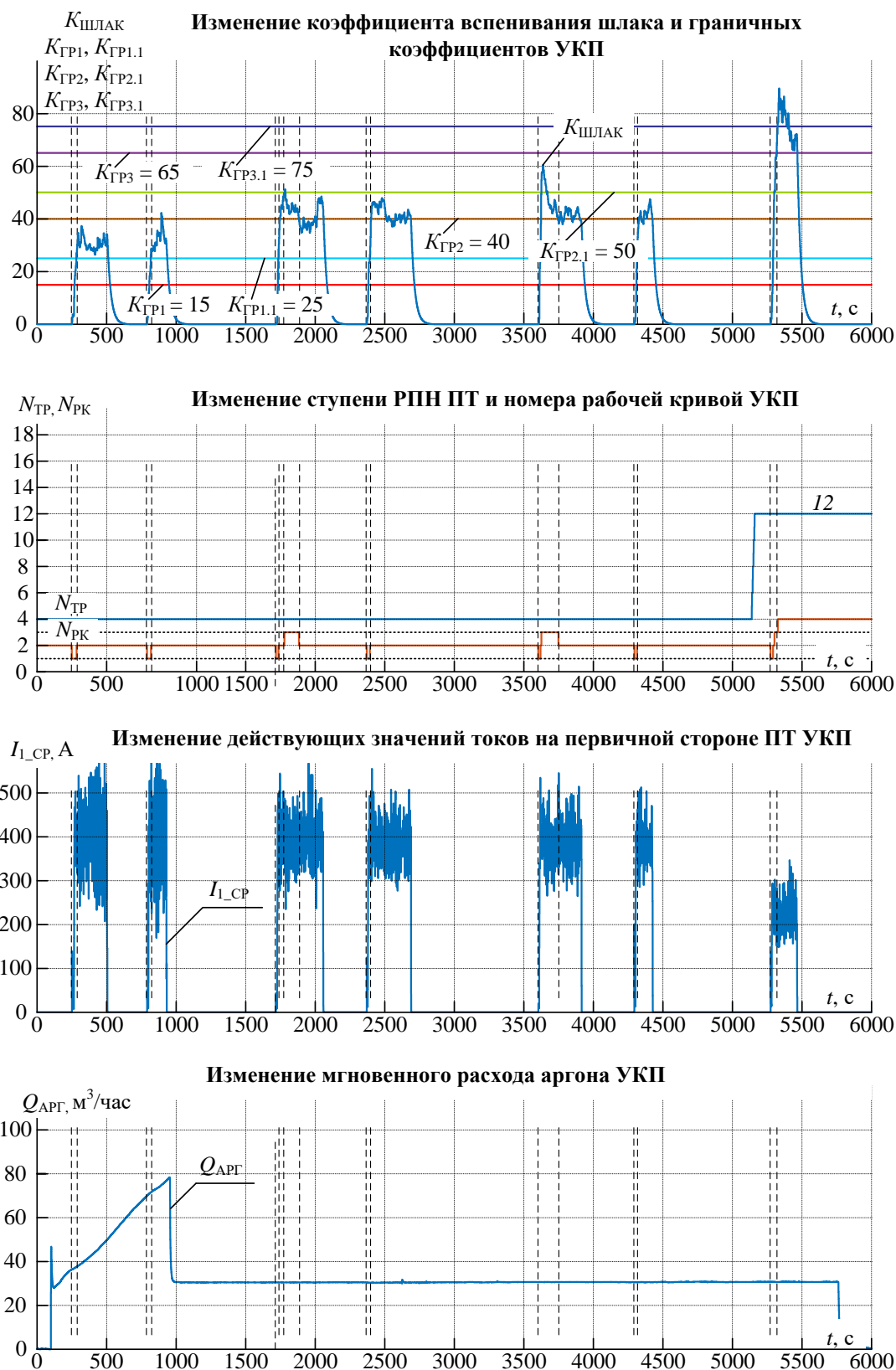


Рис. 6. Работа алгоритма автоматического переключения рабочих кривых в зависимости от уровня коэффициента шлака $K_{\text{ШЛАК}}$

Fig. 6. Operation of the automatic switching algorithm for operating curves depending on the slag coefficient level $K_{\text{ШЛАК}}$

Таблица 1. Анализ изменения удельного расхода электроэнергии УКП
Table 1. Analysis of changes in the specific energy consumption of the LF

Анализируемый период	Коэффициент уравнения регрессии	Коэффициент детерминации R^2	Средний удельный расход ЭЭ по уравнению регрессии $W_{уд.ср.}$, кВт·ч/т	Относительное изменение $\delta W_{уд.ср.}$, %
Предгарантийный период УКП	$a = 0,022977; b = 1,614704;$ $c = -0,269488; d = 0,025170;$ $e = 0,082005; f = -0,009783;$ $g = 0,000497; h = -1,204484;$ $n = 7,766345$	0,911	40,11	—
Гарантийный период УКП	$a = 0,004339; b = 1,662181;$ $c = -0,263959; d = 0,016080;$ $e = 0,057738; f = -0,033795;$ $g = 0,003581; h = -1,235336;$ $n = 19,496835$	0,908	39,24	-2,2

Закключение

При эксплуатации УКП существенное влияние на его работу оказывает режим аргонной продувки, поскольку при его высокой интенсивности возникают волны и всплески на поверхности жидкого металла, вследствие которых происходит закорачивание одной или нескольких фаз, находящихся в наибольшей близости к нестабильной зоне. Это приводит к снижению теплового КПД дуг, тем самым оказывая негативное влияние на энергоэффективность работы комплекса. Существующие системы управления УКП не учитывают данное явление и конструктивное исполнение конкретных установок (количество и расположение оборудования аргонной продувки).

В качестве решения обозначенной проблемы в рамках данного исследования разработан усовершенствованный алгоритм управления электрическим режимом с использованием информации о гармоническом составе токов дуг. Отличительной особенностью данного алгоритма является динамическая адаптация длины электрической дуги к режимам аргонной продувки и шлакового режима.

Разработанный алгоритм был внедрен на действующем производственном объекте. Регрессионный анализ, выполненный на основании большого количества плавов в гарантийном и предгарантийном периоде, показал, что внедрение нового алгоритма управления электрическим режимом УКП с использованием информации о гармоническом составе токов дуг и динамической адаптацией к шлаковым режимам и режимам аргонной продувки позволило обеспечить снижение величины удельного расхода электроэнергии на 2,2% в гарантийном периоде по сравнению с предгарантийным. Полученный результат является значимым для такого энергоёмкого технологического агрегата, как УКП, и обеспечит существенное снижение себестоимости конечного продукта.

Список источников

1. Николаев А.А., Лукьянов С.И., Тулупов П.Г. Усовершенствованный способ управления электрическим

режимом установки ковш-печь с использованием информации о гармониках токов дуг // *Сталь*. 2019. № 4. С. 16-21.

- Advanced Foaming Slag Control / T. Jansen, K. Krüger, H. Schliephake [и др.] // 10th European Electric Steelmaking Conference, Graz. 2012, 25-28 Sep, pp. 385-390.
- Регулирование мощности в электродуговой печи с использованием акустической системы распознавания вспененного шлака / Т. Янсен, К. Крюгер, Х. Шлиппаке [и др.] // *Чёрные металлы*. 2011. № 2. С. 20-25.
- Сериков В.А. Акустические и вибрационные характеристики сверхмощных дуговых сталеплавильных электропечей: дис. ... канд. техн. наук / Сериков Виктор Андреевич. Новосибирск, 2016. 147 с.
- Управление тепловым и электрическим режимами агрегата печь-ковш / Е.Б. Агапитов, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмынин, М.М. Ерофеев, А.А. Николаев // *Электротехнология*. 2006. № 6. С. 11-16.
- Развитие системы управления электродуговой установкой печь-ковш с целью повышения эффективности нагрева / Е.Б. Агапитов, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, М.М. Ерофеев, Ю.П. Журавлёв, А.П. Мусиенко // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2006. № 4. С. 81-84.
- Потенциал энергосбережения при обработке расплава стали в установке печь-ковш / Е.Б. Агапитов, Г.П. Корнилов, М.М. Ерофеев, С.А. Самойлин // *Образование. Наука. Производство и управление в XXI веке: материалы Междунар. науч. конференции (20 – 22 октября 2004 г.)*. Т. 2. Ст. Оскол, 2004. С. 15-17.
- Миронов Ю.М. Электрическая дуга в электротехнологических установках: монография. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. 290 с.
- Макаров А.Н. Законы теплообмена электрической дуги и факела в металлургических печах и энергетических установках. Тверь: Изд-во Тверск. гос. техн. ун-та, 2012. 164 с.
- Нехамин С.М. Создание и внедрение энергоэффективных дуговых и шлаковых электропечных комплексов с использованием постоянного тока и тока пониженной частоты: дис. ... д-ра техн. наук / Моск. энергет. ин-т. Москва, 2015. 405 с.
- Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / А.А. Николаев, Ж.Ж. Руссо, В. Сцымански, П.Г. Тулупов // *Вестник Магнитогорского*

государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. № 3. С. 106-120.

12. Николаев А.А., Тулупов П.Г., Омелченко Е.Я. Экспериментальные исследования гармонического состава токов и напряжений дуг мощной дуговой сталеплавильной печи шахтного типа // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4 (41). С. 63-72.
13. Тулуевский Ю.Н., Зинуров И.Ю. Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора: монография // Серия монографий «Современные электротехнологии». Т. 12. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. 347 с.
14. Матросов А.П., Миронов Ю.М. Компьютерное моделирование процессов в электрических цепях дуговых печей // Электрометаллургия. 2006. № 6. С. 27-32.
15. Бикеев Р.А. Динамические режимы в электромеханических системах дуговых сталеплавильных печей и их воздействие на вводимую активную мощность: дис. ... канд. техн. наук / Новосиб. гос. техн. ун-т. Новосибирск, 2004. 182 с.

References

1. Nikolaev A.A., Lukyanov S.I., Tulupov P.G. Improved method for controlling the electrical mode of a ladle furnace installation using arc current harmonics information. *Stal* [Steel]. 2019;(4):16-21. (In Russ.)
2. Jansen T., Krüger K., Schliephake H. et al. Advanced Foaming Slag Control. 10th European Electric Steelmaking Conference, Graz. 2012:385-390.
3. Jansen T., Krüger K., Schliephake H. et al. Power control in an electric arc furnace using an acoustic foaming slag recognition system. *Chemie Metally* [Ferrous metals]. 2011;(2):20-25. (In Russ.)
4. Serikov V.A. *Akusticheskie i vibratsionnye kharakteristiki sverhmoshchnykh dugovykh staleplavilnykh elektropechey: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Acoustic and vibration characteristics of super-powerful electric arc steelmaking furnaces. PhD dissertation]. Novosibirsk, 2016. 147 p.
5. Agapitov E.B., Kornilov G.P., Khranishin T.R., Erofeev M.M., Nikolaev A.A. Control of thermal and electrical regimes of the ladle furnace unit. *Electrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2006;(6):11-16. (In Russ.)
6. Agapitov E.B., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Erofeev M.M., Zhuravlyov Yu.P., Musienko A.P. Development of the control system for an electric arc ladle furnace unit to improve heating efficiency. *Izvestiya Vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics]. 2006;(4):81-84. (In Russ.)
7. Agapitov E.B., Kornilov G.P., Erofeev M.M., Samoilin S.A. Energy saving potential during melt treatment in a ladle furnace unit. *Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo i upravlenie v XXI veke: Materialy Mezhdunar. nauch. Konferentsii* [Education. Science. Production and management in XXI century. Proceedings of International Scientific Conference]. Stary Oskol, 2004, vol. 2, pp. 15-17. (In Russ.)
8. Mironov Yu.M. *Elektricheskaya duga v elektrotekhnologicheskikh ustanovkakh: monografiya* [Electric Arc in electrotechnological units: monograph]. Chuvash University Publishing House, 2013, 290 p. (In Russ.)
9. Makarov A.N. *Zakony teploobmena elektricheskoy dugi i fakela v metallurgicheskikh pechakh i energeticheskikh ustanovkakh* [Heat transfer laws of electric arc and flame in metallurgical furnaces and power plants]. Tver: Tver State Technical University Publishing House, 2012. 164 p. (In Russ.)
10. Nekhamin S.M. *Sozдание i vnedrenie energoeffektivnykh dugovykh i shlakovykh elektropechnykh kompleksov s ispolzovaniem postoyannogo toka i toka ponizhennoy chastoty: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Creation and implementation of energy-efficient arc and slag electric furnace complexes using direct current and reduced frequency current. Doctoral dissertation]. Moscow, 2015. 405 p.
11. Nikolaev A.A., Russo Zh.Zh., Stsimanski V., Tulupov P.G. Experimental study of the harmonic composition of arc currents for electric arc steelmaking furnaces of various capacities. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016;(3):106-120. (In Russ.)
12. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Omelchenko E.Ya. Experimental studies of the harmonic composition of currents and voltages of arcs in a powerful shaft-type electric arc steelmaking furnace. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical engineering systems and complexes]. 2018;(4(41)):63-72. (In Russ.)
13. Tuluevskii Yu.N., Zinurov I.Yu. *Innovatsii dlya dugovykh staleplavilnykh pechey. Nauchnye osnovy vybora: monografiya. Seriya monografiy «Sovremennye elektrotekhnologii»* [Innovations for electric arc steelmaking furnaces. Scientific basis for selection: monograph. A series of monographs "Modern electrical technologies"]. Vol. 12. Novosibirsk: NSTU Publishing House, 2010. 347 p. (In Russ.)
14. Matrosov A.P., Mironov Yu.M. Computer simulation of processes in electric circuits of arc furnaces. *Electrometallurgiya* [Electrometallurgy]. 2006;(6):27-32. (In Russ.)
15. Bikeev R.A. *Dinamicheskie rezhimy v elektromekhanicheskikh sistemakh dugovykh staleplavilnykh pechey i ih vozdeistvie na vvodimuyu aktivnuyu moshchnost: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Dynamic modes in electromechanical systems of electric arc steelmaking furnaces and their impact on the input active power. PhD dissertation]. Novosibirsk, 2004. 182 p.

Поступила 28.10.2025; принята к публикации 17.11.2025; опубликована 25.12.2025
Submitted 28/10/2025; revised 17/11/2025; published 25/12/2025

Николаев Александр Аркадьевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой АЭПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID 0000-0001-5014-4852

Тулупов Платон Гарриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры АЭПиМ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: tulupov.pg@mail.ru. ORCID 0000-0002-3058-2406

Рыжевол Сергей Сергеевич – аспирант кафедры АЭПиМ,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: snaffls18@gmail.com. ORCID 0000-0001-8525-279X

Буланов Михаил Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры АЭПиМ,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: bulanovv.m.v@gmail.com. ORCID 0000-0001-9051-1012

Aleksandr A. Nikolaev – PhD(Eng.), Head of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID 0000-0001-5014-4852

Platon G. Tulupov – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Electric Drive
and Mechatronics,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: tulupov.pg@mail.ru. ORCID 0000-0002-3058-2406

Sergey S. Ryzhevol – Postgraduate Student of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: snaffls18@gmail.com. ORCID 0000-0001-8525-279X

Mikhail V. Bulanov – PhD(Eng.), Associate Professor of the Department of Automated Electric Drive
and Mechatronics,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: bulanovv.m.v@gmail.com. ORCID 0000-0001-9051-1012