

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2024. Т.22, №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. Журнал индексируется в международных и российских базах данных: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI, ядро РИНЦ, ВИНТИ и др. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольцев (Россия)

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

РЕДАКЦИЯ

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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2024

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 24.12.2024. Заказ 333. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2024. Vol.22, 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. 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),
V.M. Schastlivtsev (Russia), O.N. Tulupov (Russia),
J.-B. Vogt (France)

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

Deputy Chief Editors:

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

V.R. Khramshin, N.N. Orekhova

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor 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, 2024

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: 24.12.2024. Order 333. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ 5

Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Курочкин А.И., Мельник В.В., Пыталев И.А.
Методика управления параметрами горнотехнической системы в динамике развития горных работ для обеспечения устойчивого функционирования горнодобывающего предприятия в изменяющихся условиях рынка..... 5

Чебан А.Ю.
Усовершенствованная технология освоения сложноструктурных россыпей с отдельной выемкой и переработкой песков 15

Гончар Н.В., Гуман О.М., Пикалов В.А., Терешина М.А.
Реализация принципа экологически сбалансированного проектирования при комплексном освоении георесурсов (на примере проектов разработки Томинского ГОКа и ликвидации Коркинского разреза)..... 23

Великанов В.С., Чернухин С.А., Тельминов Н.С., Дремин А.В., Ломовцева Н.В., Ситдикова С.В.
О влиянии гранулометрии взорванной горной массы на распределение напряжений в рабочем оборудовании карьерного экскаватора..... 30

Гришин И.А., Дегодя Е.Ю., Гмызина Н.В., Кутлубаев И.М., Зотеев О.В.
Исследование влияния реагентов-интенсификаторов помола на результаты измельчения золотосодержащей руды..... 44

Голованчиков А.Б., Залипаева О.А., Прохоренко Н.А., Меренцов Н.А.
Вероятность совместного улавливания тяжелых и легких частиц в отстойнике..... 50

Тюкин А.П.
Физико-математическая модель газодинамической сепарации зернистых материалов и ее программно-аппаратная реализация..... 60

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ..... 70

Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Парубок А.В., Кузин Д.И.
Экспериментально-аналитическая оценка реализуемости и энергосиловых параметров процесса бесслитковой прокатки-прессования прутков из отходов сплава АД31..... 70

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Барышников А.М., Носов Л.В., Барышников П.М.
Влияние асимметричной холодной прокатки на технологическую пластичность низкоуглеродистых сталей 81

Харитонов В.А., Усанов М.Ю., Локотунина Н.М., Песин И.А., Мелихов Е.Д.
Скоростная асимметрия при холодной прокатке круглой заготовки в цилиндрических валках 89

Файфер И.Н., Логинов Ю.Н.
Пластический изгиб круглой в плане листовой заготовки переменной кривизны 98

CONTENTS

SUBSOIL USE5

Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Yu., Kurochkin A.I., Melnik V.V., Pytalev I.A.
Method of Managing the Parameters of a Mining System in the Dynamics of Mining Operations Development to Ensure the Sustainable Functioning of a Mining Enterprise in Changing Market Conditions.....5

Cheban A.Yu.
Improved Technology for Development of Complex-Structural Placers With Separate Excavation and Processing of Sands 15

Gonchar N.V., Guman O.M., Pikalov V.A., Tereshina M.A.
Implementation of the Principle of Environmentally Balanced Design in the Complex Development of Georesources (Based on the Example of the Development Projects of the Tominsky Mining and Processing Plant and Liquidation of the Korkinsky Open-Pit Mine)23

Velikanov V.S., Chernukhin S.A., Telminov N.S., Dremmin A.V., Lomovtseva N.V., Sidiikova S.V.
On the Influence of the Granulometry of Blasted Rock Mass on the Stress Distribution in the Working Equipment of a Quarry Excavator30

Grishin I.A., Degodya E.Yu., Gmyzina N.V., Kutlubayev I.M., Zoteev O.V.
Study of the Influence of Grinding Intensifier Reagents on the Results of Grinding Gold Ore.....44

Golovanchikov A.B., Zalipaeva O.A., Prokhorenko N.A., Merentsov N.A.
Probability of combined capture of heavy and light particles in a settling tank50

Tukin A.P.
Physical and Mathematical Model of Gas Dynamic Separation of Granular Materials and Its Hardware and Software Implementation.....60

METAL FORMING.....70

Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Parubok A.V., Kuzin D.I.,
Experimental and Analytical Assessment of Feasibility and Energy-Power Parameters of Ingotless Rolling-Extrusion Process of Rods From AD31 Alloy Waste70

Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Baryshnikova A.M., Nosov L.V., Baryshnikov P.M.
The Effect of Asymmetric Cold Rolling on the Technological Plasticity of Low-Carbon Steels81

Kharitonov V.A., Usanov M.Yu., Lokotunina N.M., Pesin I.A., Melikhov E.D.
Speed Asymmetry During Cold Rolling of Round Blanks in Cylindrical Rolls.....89

Faifer I. N., Loginov Yu.N.
Plastic Bending of a Round Sheet Blank of Variable Curvature98

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ... 106**Лернер М.М.**

Совершенствование технологии и оборудования машин непрерывного литья и деформации металла 106

Нагимов Р.Ш., Вафин Р.К.

Исследование влияния температуры и продолжительности ионного азотирования в дуговом разряде на механические характеристики поверхности после комплексной ионно-плазменной обработки 111

Казимиров Д.Ю., Солер Я.И.

Обеспечение точности поверхности при шлифовании нитинола с высокой температурой превращений.... 120

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ... 134**Щегольков А.В., Щегольков А.В., Земцова Н.В., Никулин П.Н.**

Сравнительный анализ кремнийорганических эластомеров, модифицированных многослойными углеродными нанотрубками, полученными по СВЧ- и CVD-технологии 134

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА 144**Васин С.А., Анцев В.Ю., Трушин Н.Н., Фетисов М.Н., Юрин Д.С.**

Анализ влияния качества проектно-конструкторских работ на результативность производственного планирования на авиастроительном предприятии .. 144

Лонсикх П.А., Федотова А.В., Головина Е.Ю., Лонсикх Н.П., Евлоева М.В.

Модернизация сетцентрической концепции в обогащательном производстве 152

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ 163**Куликов А.Д., Бурлаков И.А., Петров П.А., Полишков П.А., Деметрашвили И.С.**

Формообразование листовых заготовок из меди М1 полимерным инструментом из полилактида PLA ... 163

Аносов М.С., Манцеров С.А., Ключкова Н.С., Михайлов А.М.

Оценка и диагностирование структурной деградации сплава Нп-30ХГСА, полученного методом WAAM с использованием нейросетевой модели 171

MATERIAL PROCESS ENGINEERING.....106**Lerner M.M.**

Improvement of Technology and Equipment of Continuous Casting and Metal Deformation Machines 106

Nagimov R.Sh., Vafin R.K.

Study of the Influence of Temperature and Duration of Ion Nitriding in an Arc Discharge on the Mechanical Characteristics of the Surface after Complex Ion-Plasma Treatment..... 111

Kazimirov D.Yu., Soler Y.I.

Achieve Surface Precision when Grinding Nitinol with High Transformation Temperatures..... 120

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES 134**Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Zemtsova N.V., Nikulin P.N.**

Comparative Analysis of Organosilicon Elastomers Modified with Multi-Walled Carbon Nanotubes Produced by Microwave and CVD-Technology..... 134

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT144**Vasin S.A., Antsev V.Yu., Trushin N.N., Fetisov M.N., Yurin D.S.**

Analysis of Design Work Quality Impact on the Production Planning Effectiveness at an Aircraft Manufacturing Enterprise 144

Lontsikh P.A., Fedotova A.V., Golovina E.Yu., Lontsikh N.P., Evloeva M.V.

Improving the Network-Centric Concept in Enrichment Production..... 152

NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT163**Kulikov A.D., Burlakov I.A., Petrov P.A., Polshkov P.A., Demetrashvili I.S.**

Shaping M1 Copper Sheet Blanks Using Tools Made of Polylactide PLA 163

Anosov M.S., Mantserov S.A., Klochkova N.S., Mikhailov A.M.

Assessment and Diagnosis of Structural Degradation of NP-30HGSA Alloy Obtained by WAAM Using a Neural Network Model..... 171



МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ГОРНТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ДИНАМИКЕ РАЗВИТИЯ ГОРНЫХ РАБОТ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ В ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЯХ РЫНКА

Гавришев С.Е.¹, Заляднов В.Ю.¹, Курочкин А.И.¹, Мельник В.В.², Пыталев И.А.¹

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

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Длительный период разработки месторождений и постоянно меняющиеся рыночные условия приводят к необходимости пересмотра проектных и организационно-технологических решений, включая технико-экономическое обоснование новых кондиций, пересмотр объемов запасов, производительности, требований к качеству продукции, а также типов и моделей применяемых горных машин и оборудования. В связи с этим для действующих и проектируемых горных предприятий необходимо развитие научно-методической базы по определению параметров горнотехнической системы и управлению ими на этапе эксплуатации при комплексном преобразовании и освоении участка недр. Совершенствование методологии учета влияния внутренних и внешних факторов развития горнотехнических систем на динамику параметров открытой геотехнологии является актуальной научно-практической задачей, решение которой обеспечит устойчивое функционирование горнодобывающих предприятий в изменяющихся горнотехнических условиях и конъюнктуре минерально-сырьевого рынка. **Цель работы.** Разработка методики управления параметрами горнотехнической системы в динамике развития открытых горных работ для обеспечения устойчивого функционирования горнодобывающего предприятия в изменяющихся горно-геологических, горнотехнических условиях и конъюнктуре минерально-сырьевого рынка. **Используемые методы.** В данной работе использован комплексный подход к исследованию, который включает в себя: научное обобщение российского и зарубежного опыта повышения эффективности освоения недр с применением открытой геотехнологии; имитационное моделирование параметров горнотехнической системы; статистическую обработку результатов исследований; комплексный технико-экономический и структурно-функциональный анализ. **Результат.** Представлена методика управления параметрами горнотехнической системы, которая включает: анализ внешних и внутренних влияющих факторов; установление возможности изменения основных показателей системы и определение области их значений, обеспечивающих в сочетании повышение комплексности и эффективности освоения участка недр для конкретных горно-геологических и рыночных условий, с учетом территориального расположения предприятия; определение значений параметров системы, обеспечивающих в сочетании получение требуемых показателей; оценку сочетания параметров и показателей на основе определения доходности и среднеквадратичного отклонения; расчет интегрального показателя, по максимальному значению которого осуществляется выбор параметров.

Ключевые слова: устойчивость функционирования горнодобывающего предприятия, товарная продукция горного предприятия, техногенные георесурсы, параметры горнотехнической системы

© Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Курочкин А.И., Мельник В.В., Пыталев И.А., 2024

Для цитирования

Методика управления параметрами горнотехнической системы в динамике развития горных работ для обеспечения устойчивого функционирования горнодобывающего предприятия в изменяющихся условиях рынка / Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Курочкин А.И., Мельник В.В., Пыталев И.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-5-14>



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

METHOD OF MANAGING THE PARAMETERS OF A MINING SYSTEM IN THE DYNAMICS OF MINING OPERATIONS DEVELOPMENT TO ENSURE THE SUSTAINABLE FUNCTIONING OF A MINING ENTERPRISE IN CHANGING MARKET CONDITIONS

Gavrishev S.E.¹, Zalyadnov V.Yu.¹, Kurochkin A.I.¹, Melnik V.V.², Pytalev I.A.¹

¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

²National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The long period of deposit development and constantly changing market conditions lead to the need to revise design and organizational-technological solutions, including the technical and economic justification of new conditions, revision of reserve volumes, productivity, product quality requirements, as well as types and models of used mining machines and equipment. In this regard, for existing and designed mining enterprises, it is necessary to develop a scientific and methodological base for determining the parameters of the mining engineering system and managing them at the stage of operation during the comprehensive transformation and development of a subsoil site. Improving the methodology for accounting for the influence of internal and external factors of the development of mining engineering systems on the dynamics of open geotechnology parameters is an urgent scientific and practical task, the solution of which will ensure the sustainable functioning of mining enterprises in changing mining engineering conditions and the mineral resource market situation. **Objectives.** Development of a methodology for managing the parameters of a mining and technical system in the dynamics of open-pit mining development to ensure the sustainable operation of a mining enterprise in changing mining and technical conditions and the situation on the mineral resource market is required. **Methods Applied.** This work uses a comprehensive approach to research, which includes: scientific generalization of Russian and foreign experience in increasing the efficiency of subsoil development using open geotechnology; simulation modeling of mining system parameters; statistical processing of research results; comprehensive technical, economic, and structural-functional analysis. **Result.** The article presents a methodology for managing the parameters of a mining engineering system, which includes: analysis of external and internal influencing factors; establishing the possibility of changing the main indicators of the system and determining the range of their values, which in combination ensure an increase in the complexity and efficiency of development of a subsoil area for specific mining, geological and market conditions, taking into account the territorial location of the enterprise; determining the values of the system parameters, which in combination ensure the receipt of the required indicators; assessing the combination of parameters and indicators based on determining profitability and standard deviation; calculating the integral indicator, according to the maximum value of which the selection of parameters is carried out.

Keywords: sustainability of the functioning of a mining enterprise, commercial products of a mining enterprise, man-made georesources, parameters of the mining technical system

For citation

Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Yu., Kurochkin A.I., Melnik V.V., Pytalev I.A. Method of Managing the Parameters of a Mining System in the Dynamics of Mining Operations Development to Ensure the Sustainable Functioning of a Mining Enterprise in Changing Market Conditions. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-5-14>

Введение

Открытые горные работы характеризуются постоянно усложняющимися горно-геологическими и горно-техническими условиями. Для компенсации негативных факторов внедряются передовые технологические решения в сфере проектирования, планирования и непосредственного ведения горных работ с периодическим преобразованием организации деятельности и изменением параметров разработки месторождений.

Разработка месторождений осуществляется на фоне высокой волатильности цен и спроса на производимое сырье и роста удельных затрат на разработку месторождений. Обеспечение эффективной работы горнодобывающего предприятия в современных

условиях достигается путем разворачивания новых конкурентоспособных производств (прежде всего для увеличения выпуска продукции и услуг, пользующихся стабильным спросом на рынке) на базе основного месторождения и участка недр, эксплуатируемого недропользователем. Реализация данного направления позволяет компенсировать возможные невысокие доходы по одному виду деятельности всего комплекса различных видов деятельности высокими доходами по другим и тем самым повысить комплексность и полноту освоения участка недр, а также увеличить срок существования самого предприятия [1]. Однако данные решения не являются для отрасли общепринятыми.

Динамика рыночных условий приводит к необходимости постоянного пересмотра проектных и организационно-технологических решений, обусловленных технико-экономическим обоснованием новых кондиций, изменением объемов запасов, производительности, качества продукции, а также типом и моделями применяемых горных машин. При этом анализ деятельности предприятий за последние десятилетия показал, что в некоторых случаях изменение параметров горнотехнической системы производилось с повышением издержек в краткосрочном периоде [2–5].

Эффективное функционирование горнотехнической системы с открытой геотехнологией при комплексном освоении участка недр в современных условиях определяется не только минерально-сырьевой базой месторождения, но и зависит от его территориального расположения относительно других промышленных и развитых районов нашей страны, уровня развития транспортной и социальной инфраструктуры, рынков сбыта и других влияющих внешних факторов, а также связанных с ними способами организации производства [6]. Современные горнодобывающие предприятия с открытой геотехнологией способны поставлять на рынок новые виды продукции с повышенной добавленной стоимостью, полученной в результате освоения недр, на основе разрабатываемого полезного ископаемого и вмещающих пород при целенаправленном повышении качества сырья и увеличении глубины их переработки, а также в виде техногенных георесурсов [7]. Кроме того, горнодобывающие предприятия, имея свой производственный потенциал, в регионах с развитой инфраструктурой, кроме основной деятельности, могут выполнять горнотехнические услуги для сторонних предприятий.

Главной причиной, сдерживающей реализацию стратегии расширения комплекса направлений производственной деятельности, является несовершенство существующего подхода к обоснованию параметров горнотехнической системы, который не учитывает их переоценку с учетом изменения внешних и внутренних факторов, а также принятия нетрадиционных решений, сопровождающихся увеличением затрат. Поскольку эффективность освоения участка недр традиционно связана с производственной мощностью, выбор параметров производится в основном именно с целью её развития, при этом срок отработки месторождения будет зависеть от объема балансовых запасов.

В настоящее время в научно-методической базе проектирования не предусмотрена возможность создания условий для расширения направлений комплекса производственной деятельности и номенклатуры продукции предприятий с открытой геотехнологией, отсутствуют требования к необходимости управления параметрами горнотехнической системы в динамике внешних и внутренних факторов развития системы.

Таким образом, для обеспечения устойчивого функционирования горнодобывающих предприятий в изменяющихся условиях разработки месторождений необходима методика управления параметрами гор-

нотехнической системы с их развитием одновременно в нескольких направлениях, соответствующих ресурсной базе лицензированного участка недр на основе гибкого изменения объема вовлекаемых в разработку запасов, производительности, качества и номенклатуры выпускаемой товарной продукции, в том числе с использованием техногенных георесурсов, выполнением горнотехнических услуг сторонним предприятиям.

Материалы и методы исследования

В рамках предлагаемой концепции определения структуры и значений параметров горнотехнической системы открытой геотехнологии предусмотрена поэтапная переоценка ее параметров и состояния – начального и планируемого на определенный момент времени. Устойчивость функционирования горнодобывающего предприятия обеспечивается безубыточными переходами между этапами развития горнотехнической системы. При этом обеспечение безубыточности достигается снижением степени зависимости доходности предприятия от производственной мощности. Начальное состояние на этапе проектирования освоения месторождения или его участка характеризуется количественно-качественными показателями всех доступных для использования предприятием в обозримой перспективе имеющихся георесурсов с учетом его географического положения. Каждое последующее состояние этапа освоения участка недр оценивается количественным интегральным показателем горных возможностей, учитывающим получение экономического эффекта от развития параметров и показателей горнотехнической системы, которые связаны с комплексом направлений развиваемых видов деятельности.

Любое значимое для предприятия изменение внешних или внутренних факторов развития горнотехнической системы требует переоценки ранее принятых значений основных показателей и параметров горнотехнической системы. Расчет доходности и среднеквадратичного отклонения при действующих параметрах горнотехнической системы и сравнение их значений с другими расчетными вариантами позволяют недропользователю, в зависимости от его цели, определить необходимость и действия по изменению параметров и показателей системы [1]. При этом изменение параметров должно производиться системно и в определенной последовательности.

В работе устойчивое развитие и устойчивое функционирование рассматриваются как самостоятельные понятия.

Под устойчивым развитием понимается требование обеспечения текущих общественных потребностей в изменяющихся условиях без нарушения перспектив развития будущих поколений. С точки зрения философии в представленной формулировке обозначенный подход вполне оправдан. Однако исследования особенностей функционирования горнотехнических систем в изменяющихся внутренних и внешних факторах ее развития показал, что для повышения эф-

эффективности самих систем необходимо обеспечение безубыточного их функционирования на протяжении всего периода освоения участка недр. Это возможно за счет управления внутренними горнотехническими резервами в специфических условиях разработки природных месторождений и техногенных образований с учетом изменения горнотехнических, конъюнктурных и социально-экономических факторов внутренней и внешней среды [8, 9].

Отечественная горная промышленность во многом не отвечает глобальным динамичным изменениям, что связано с развитием минерально-сырьевой базы и усложняющимися условиями вовлечения природного и техногенного сырья в промышленную эксплуатацию. Это определяет необходимость разработки научно-методических основ устойчивого развития горнотехнических систем на базе установления закономерностей взаимодействия природных и инновационных технологических процессов в условиях интенсивного комплексного освоения недр Земли с использованием рациональной структуры, сочетания различных, в том числе нетрадиционных, геотехнологических процессов с заданными параметрами.

В данной работе под устойчивым функционированием горнотехнической системы открытой геотехнологии понимается ее способность обеспечивать комплексность и эффективность освоения участка недр с производством товарной продукции в течение неопределенно долгого периода времени в независимости от объема и качества запасов разрабатываемого месторождения в условиях постоянно изменяющихся факторов внешней и внутренней среды, достигающаяся в динамике развития открытых горных работ на основе системного и синхронизированного управления конструктивными, горнотехническими, геотехнологическими, геомеханическими и режимными параметрами. Такой комплекс реализуется, в частности, на основе целенаправленного развития многофункционального использования открытой геотехнологии с расширением ее сферы деятельности от комплексного освоения запасов месторождения полезного ископаемого до комплексного освоения целенаправленно преобразуемого участка недр и его инфраструктуры.

Главным условием расширения комплекса направлений производственной деятельности горнодобывающего предприятия является возможность организации структуры с различными источниками доходности, обеспечивающая устойчивое функционирование горнодобывающего предприятия.

Следует отметить, что обеспечение устойчивости функционирования предприятия в современных условиях, характеризующихся высокой волатильностью цен и спроса на производимое сырье и усложняющимися с каждым годом внутренними факторами недропользования, в настоящее время требует перехода горнотехнической системы к модели с возможностью гибкого изменения сочетания значений ее параметров и показателей. Для перехода системы в более устойчивое состояние в настоящее время за-

стью необходимо использование нетрадиционных подходов с реконструкциями, которые сопровождаются на определенном этапе повышением издержек. Эти издержки обусловлены необходимостью развития комплекса основных показателей системы, которые могут сопровождаться увеличением количества и качества технологических операций, выбором вариантов разработки с наибольшим коэффициентом вскрыши, снижением доли бестранспортной системы в пользу транспортной, кардинальным техническим перевооружением, подготовкой выработанных пространств карьеров и отвалов для дальнейшего использования в качестве емкости для складирования промышленных отходов или строительных полигонов, изменением инфраструктуры предприятия и выходом на рынок услуг. Такой подход можно описать формулой определения эффективности:

$$\mathcal{E}\uparrow = \frac{P\uparrow\uparrow}{3\uparrow}, \quad (1)$$

где P – результативность или доходность предприятия, млн руб.;

3 – затраты, млн руб.,

\uparrow – знак увеличения показателя.

Представленная формула (1) показывает, что для повышения эффективности деятельности предприятия необходимо повышение результативности, которое достигается за счет инвестиций в развитие основных показателей системы.

Зачастую на предприятиях используется другая стратегия, которую можно описать формулой определения эффективности:

$$\mathcal{E}\uparrow = \frac{P}{3\downarrow}, \quad (2)$$

где \downarrow – знак уменьшения показателя.

Подход, который представлен формулой (2), можно описать следующим образом. Для повышения эффективности предприятия используются решения по снижению затрат, а результативность при этом сохраняется на прежнем уровне. Такой подход является успешным в краткосрочной перспективе, когда имеются резервы по снижению затрат. Однако в условиях высокой динамики изменения внешних и внутренних факторов данный подход не имеет перспектив для развития горнотехнической системы.

Эффективность комплексного освоения участка недр и устойчивость функционирования горнодобывающего предприятия предлагается определять разработанным автором статьи интегральным показателем горных возможностей. Разработанный показатель учитывает получение дополнительных доходов от изменения объема вовлекаемых в разработку запасов, производительности карьера, качества добываемого сырья и номенклатуры товарной продукции, включая техногенные георесурсы и выполнение услуг сторонним предприятиям в зависимости от внешних и внут-

ренных факторов развития горнотехнической системы. Расчет показателя производится на основе приведения доходности предприятия, в том числе получаемой от развития обозначенных направлений и видов деятельности, к сопоставимому по ценности объему добываемого полезного ископаемого. Отношение этого объема к производственной мощности предприятия определяет значение показателя [10].

Разработанный интегральный показатель горных возможностей [10]

$$K_{ГВ} = \frac{Q_{\text{ФАКТ}} \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^n (B_i - 3_i)}{B_{\text{ПН}} - 3_{\text{ПН}}} \right)}{P_M} \rightarrow \max, \quad (3)$$

где P_M – производственная мощность горнодобывающего предприятия, млн т/год;

$Q_{\text{ФАКТ}}$ – фактическая производительность карьера, млн т/год;

B_i – выручка от дополнительного направления или нового вида деятельности предприятия по развитию ключевых параметров и характеристик системы, руб.;

3_i – затраты на развитие дополнительного направления или нового вида деятельности предприятия;

$B_{\text{ПН}}$ – выручка от реализации балансовых запасов полезных ископаемых, руб.;

$3_{\text{ПН}}$ – затраты на освоение балансовых запасов полезных ископаемых, руб.;

n – количество новых видов деятельности горнодобывающего предприятия;

i – отдельное направление или вид дополнительной деятельности горнодобывающего предприятия.

Под управлением параметрами горнотехнической системы при комплексном освоении участка недр предлагается понимать процесс планирования, изменения и контроля основных показателей, параметров и функций горнотехнической системы с целью обеспечения устойчивости функционирования горнодобывающего предприятия в сложных горно-геологических, горнотехнических и рыночных условиях.

Систематизация параметров и показателей горнотехнической системы, определяющих развитие деятельности и устойчивость функционирования горнодобывающего предприятия, представлена в таблице.

Таблица. Систематизация параметров и показателей горнотехнической системы, определяющих развитие деятельности и устойчивость функционирования горнодобывающего предприятия

Table. Systematization of the mining engineering system parameters and indicators that determine the development of activities and the sustainability of a mining enterprise functioning

Элементы	Группа параметров	Параметры	Общие технические характеристики	Основные показатели
Горные конструкции	Геомеханические	Параметры прибортового и техногенного массивов (условия залегания и физико-механические свойства пород, трещиноватость массива, выветриваемость, упругость, пластичность, размокаемость пород)	Устойчивость горнотехнических сооружений (коэффициент запаса устойчивости, несущая способность, предельные напряжения) Коэффициент вскрыши (промышленный, эксплуатационный, контурный, текущий) Интенсивность (скорость подвигания фронта, скорость углубки) Концентрация горных работ и оборудования Грузооборот	Объем вовлекаемых в разработку запасов с требуемым качеством Производительность Качество (потери, разубоживание, засорение, сортность, блочность и т.д.) Номенклатура товарной продукции (на основе полезного ископаемого, в виде техногенных георесурсов, услуги)
	Конструктивные	Главные параметры карьера, параметры вскрытия и системы разработки (глубина карьера, высота и угол откоса рабочего и нерабочего уступа, угол откоса рабочих и нерабочих бортов карьера, ширина транспортных и предохранительных берм, длина фронта, уклон траншей, ширина рабочих площадок, высота и угол откоса складов и отвалов, объем карьера, емкость и площадь складов и отвалов)		
Технологические процессы	Режимные	Режим горных работ (распределение объема выемки полезного ископаемого, вскрыши и горной массы во времени и по глубине); режим работы предприятия и горнотранспортного оборудования (количество рабочих дней, смен, часов)		
	Геотехнологические	Параметры процессов подготовки, выемки, погрузки, транспортирования, складирования и отвалообразования (диаметр и сетка скважин, перебур, длина заряда, длина скважин, ширина отрабатываемого блока (панели), ширина заходки, количество забоев, ширина разгрузочных площадок, мощность разрабатываемых и отсыпных слоев горной массы, количество складов и отвалов, количество и объем грузопотоков); параметры цикличной, поточной и циклично-поточной технологии (доля цикличной и поточной выемки и транспортирования пород); параметры транспортной и бестранспортной технологии (доля транспортного и бестранспортного перемещения вскрыши); параметры технологии отвалообразования (доля внешнего и внутреннего отвалообразования)		
Оборудование	Горнотехнические	Параметры горнотранспортных комплексов оборудования (количество горнотранспортного оборудования, высота и глубина черпания, емкость ковша и производительность выемочного оборудования, грузоподъемность и производительность транспортных средств)		

Функциями горнотехнической системы, в зависимости от расположения участка недр относительно промышленных районов с развитой инфраструктурой, являются:

- освоение балансовых запасов полезного ископаемого;
- формирование и освоение техногенных георесурсов, включая техногенные ландшафты с заданными потребительскими характеристиками;
- создание производственной инфраструктуры с выполнением технологических процессов для собственного производства и сторонних предприятий или с привлечением подрядных организаций для снижения издержек.

Полученные результаты и их обсуждение

С целью обеспечения устойчивого функционирования горнодобывающего предприятия в изменяющихся условиях минерально-сырьевого рынка разработана методика управления параметрами горнотехнической системы. Методика включает в себя следующие основные позиции:

1. Определение цели недропользователя и необходимости обеспечения устойчивого функционирования горнотехнической системы – предполагает, что предприятие принимает для себя стратегию, предусматривающую развитие основных показателей системы с расширением комплекса направлений производственной деятельности и соответствующее изменение параметров горнотехнической системы.

2. Анализ внешних факторов – производится оценка текущей и перспективной цены на основное добываемое полезное ископаемое, а также спроса на продукцию предприятия с учетом рыночного тренда. Производится исследование рынка на предмет спроса и цены на вскрышные и вмещающие породы. В зависимости от расположения участка недр производится оценка потребности рынка в техногенных георесурсах, используемых в качестве строительных площадок, сооружений или емкостей. Производится оценка рынка услуг для привлечения подрядных организаций или для выполнения основных и вспомогательных технологических процессов открытой геотехнологии сторонним предприятиям. Анализ возможности использования инфраструктуры предприятия для нужд сторонних организаций.

3. Анализ внутренних факторов – анализируются текущие параметры и показатели горнотехнической системы. Анализируется себестоимость добычи полезного ископаемого для текущего положения параметров и показателей горнотехнической системы, изменение себестоимости добычи во времени и с глубиной, рассматривается перспектива изменения себестоимости с увеличением глубины ведения горных работ. Производится анализ периода разработки на основе остаточных балансовых запасов полезного ископаемого, а также с учетом пересмотра кондиций на сырье. Выполняется оценка качественных показате-

телей основного полезного ископаемого в текущем положении и в перспективе развития горных работ. Производится оценка издержек, связанных с накапливаемыми объемами техногенных объектов с определением доли формируемых техногенных месторождений и перспективы их дальнейшего освоения. Выполняется анализ внутрипроизводственных резервов в части использования горнотранспортного оборудования и персонала. Оценка готовности подразделений к выполнению технологических процессов для сторонних организаций без снижения эффективности собственного производства.

4. Производится оценка изменения факторов. Если факторы не изменились, то разработка месторождения производится по действующему проекту без изменения параметров горнотехнической системы.

5. Если изменились внешние или внутренние факторы развития горнотехнической системы, необходимо установление возможности изменения ее основных показателей и определение области их значений, обеспечивающих в сочетании повышение комплексности и эффективности освоения участка недр для конкретных горно-геологических и рыночных условий с учетом его территориального расположения. К основным показателям горнотехнической системы следует относить:

- объем вовлекаемых в разработку запасов полезного ископаемого;
- качество добываемого сырья;
- производительность;
- номенклатуру выпускаемой продукции.

Для обеспечения устойчивости функционирования предприятия возможно развитие одного или сразу нескольких основных показателей горнотехнической системы. При развитии комплекса показателей значение одного из них может быть меньше, чем при начальном состоянии системы. Это обуславливается повышением доходности от развития общего комплекса направлений производственной деятельности, достигающейся при определенной комбинации значений основных показателей.

Для анализируемых конкретных участков недр рассматриваются несколько достижимых значений производительности карьера и горного производства в целом, достижимых значений качественных показателей добываемого сырья для конкретных горно-геологических условий с учетом его ценности и востребованности на рынке. Рассматриваются варианты вовлечения дополнительных объемов полезного ископаемого, несмотря на имеющийся объем балансовых запасов. Дополнительное вовлечение запасов, кроме обеспечения ресурсной базы, в том числе рассматривается на предмет повышения качественных показателей или снижения себестоимости добычи на текущий момент времени.

Возможность повышения номенклатуры продукции горнодобывающего предприятия является одной из ключевых позиций в развитии основных показате-

лей горнотехнической системы. Расширение номенклатуры продукции рассматривается не только с позиции снижения себестоимости добычи основного полезного ископаемого, но в большей степени в качестве источника повышения доходности горнодобывающего предприятия. В работе предусматривается, что доходность от расширения номенклатуры продукции и комплексности освоения участков недр, располагаемых вблизи от промышленных районов с развитой инфраструктурой, в разы превышает доходность, получаемую только от освоения балансовых запасов. Повышение доходности за счет источников, не связанных с производственной мощностью предприятия, обеспечивает повышение устойчивости предприятия.

6. Для различных вариантов сочетания значений основных показателей горнотехнической системы определяется предполагаемая выручка V ; при реализации выбранного комплекса показателей. Далее производится ее сравнение с выручкой, получаемой от действующего комплекса значений показателей в данных конкретных рыночных условиях, а также с учетом перспективы развития предприятия. Предполагается, что при неблагоприятных условиях при действующем комплексе основных показателей выручка будет снижаться. Таким образом, для дальнейших расчетов рассматриваются только те комплексы сочетаний значений основных показателей, которые обеспечивают заданный уровень выручки, который будет равен или больше того значения, которое неприемлемо для собственника предприятия.

7. Производится определение значений параметров горнотехнической системы, обеспечивающих в сочетании получение основных показателей системы рассматриваемых комплексов направлений развития производственной деятельности. В результате рассматриваются различные значения следующих групп параметров: геомеханические, режимные, горнотехнические, конструктивные, геотехнологические. В результате оценки параметров горнотехнической системы образуются комплексы сочетаний значений выделенных групп параметров, которые обеспечивают получение требуемых значений основных показателей системы. Далее для образующихся комплексов значений выделенных групп параметров определяются общие технические характеристики системы, такие как устойчивость горнотехнических сооружений, коэффициент вскрыши, интенсивность, концентрация горных работ и оборудования, грузооборот. Выделяемые технические характеристики в целом определяют затраты выбранного комплекса направлений деятельности предприятия и некоторые технологические ограничения, связанные с безопасностью производ-

ства горных работ. При выборе значений параметров следует руководствоваться принципом и подходом определения эффективности производства, который описывается формулой (1).

8. Для комплексов значений выделенных групп параметров, обеспечивающих выполнение основных показателей, определяются затраты Z_{in} .

9. На основе экономико-математической модели оптимизации комплекса направлений деятельности горнодобывающего предприятия определяется доходность предприятия J_{cp} и среднее квадратичное отклонение R_p . В результате определяется область комплексов основных показателей и параметров горнотехнической системы, которые находятся в пределах заданного уровня среднее квадратичного отклонения от доходности [1].

10. Устойчивость функционирования горнодобывающего предприятия и, соответственно, окончательный выбор комплекса различных видов деятельности горнодобывающего предприятия и параметров разработки производится на основе разработанного интегрального показателя горных возможностей $K_{ГВ}$ (определяемый по формуле (3)). Критерием для выбора комплекса параметров и показателей горнотехнической системы является максимальное значение интегрального показателя горных возможностей $K_{ГВ}$ [10].

11. Непосредственно изменение параметров горнотехнической системы производится системно в следующей последовательности: 1) геомеханические; 2) режимные; 3) горнотехнические; 4) конструктивные; 5) геотехнологические.

Для реализации методики управления параметрами горнотехнической системы с использованием предложенной концепции обеспечения устойчивого функционирования предприятия разработана блок-схема алгоритма (рисунк).

Таким образом, для повышения устойчивости горнодобывающих предприятий на неопределенно долгий промежуток времени в современных условиях разработки месторождений необходимо управление параметрами горнотехнической системы с развитием одновременно нескольких различных направлений, соответствующих имеющейся ресурсной базе участка недр, включающих гибкое изменение объема вовлекаемых в разработку запасов, производительности, качества, ассортимента и номенклатуры выпускаемой продукции, в том числе на основе техногенных георесурсов, а также организацию выполнения технологических процессов открытой геотехнологии для других предприятий или привлечение подрядных организаций для снижения издержек.

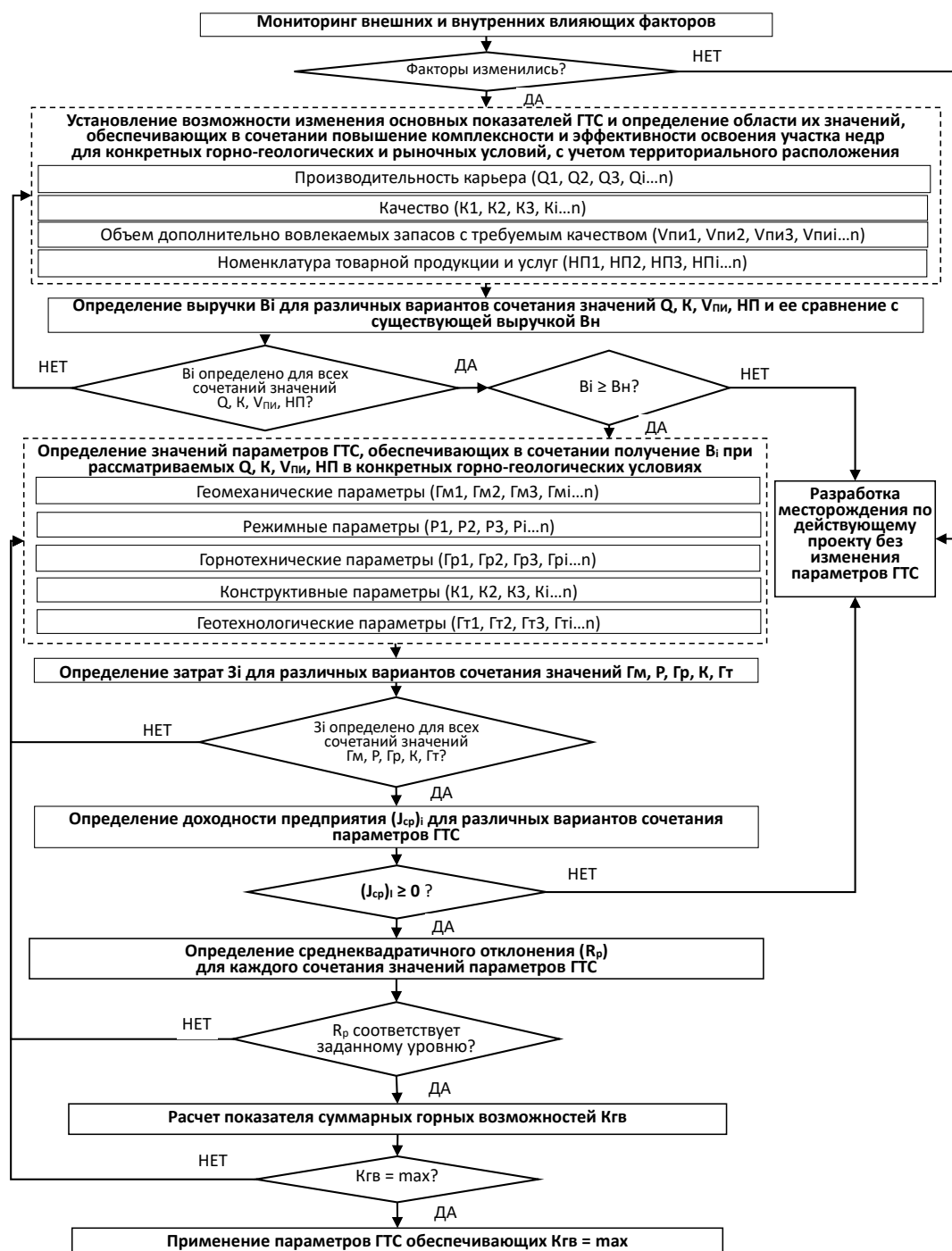


Рисунок. Блок-схема алгоритма методики управления параметрами горнотехнической системы для обеспечения устойчивого функционирования горнодобывающего предприятия в изменяющихся условиях рынка
 Figure. A flow chart of the algorithm of the methodology for controlling the parameters of a mining engineering system to ensure the sustainable operation of a mining enterprise in changing market conditions

Заключение

В результате анализа динамики параметров горнотехнических систем открытой геотехнологии установлено, что при разработке месторождений полезных ископаемых, характеризующейся постоянным усложнением горно-геологических и горнотехниче-

ских условий на фоне динамично меняющейся конъюнктуры рынка, необходимо периодическое изменение организационно-технологических решений и параметров техногенного преобразования и освоения участка недр для сохранения эффективности деятельности предприятия. Для компенсации негативных

факторов обеспечение эффективности горнодобывающего предприятия достигается развитием различных направлений освоения имеющейся и формируемой ресурсной базы участка недр, включающих повышение объема вовлекаемых в разработку георесурсов, производительности, качества и расширение номенклатуры выпускаемой товарной продукции.

Дано развитие научно-методических основ устойчивости функционирования горнодобывающих предприятий с открытой геотехнологией, базирующееся на повышении комплексности техногенного преобразования и освоения участка недр, которая зависит от структуры и динамики изменения параметров горнотехнической системы в быстро меняющихся условиях недропользования. Доказано, что эффективность и устойчивость функционирования современного горнодобывающего предприятия достигается формированием оптимального и сбалансированного в соответствии с уровнем доходности и затрат комплекса направлений производственной деятельности, учитывающей выпуск расширенной номенклатуры продукции и оказание горнотехнических услуг при использовании природных и техногенных георесурсов, с возможностью гибко изменять объемы их производства за счет заблаговременного формирования горных возможностей.

Список источников

1. Обоснование стратегии развития горнодобывающих предприятий на основе анализа доходности и риска при аутсорсинге и диверсификации / Заляднов В.Ю., Гавришев С.Е., Михайлова Г.В., Каде-ров С.С., Коваленко Н.В. // Горная промышленность. 2021. № 4. С. 134-139. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-00-00.
2. Justification of Logistical System Development at Svetlinskiy Open-Pit Mine with Account for Potential Transition to Combined Open Cast and Underground Mining Methods / Rylnikova M.V., Strukov K.I., Berger R.V., Esina E.N. // Mining Industry Journal (Gornaya Promyshlennost). 2019, vol. 148. no.6, pp. 106-111.
3. Рыжов С.В., Рыльникова М.В. Обоснование структуры производственной мощности золотодобывающего предприятия на различных этапах развития открытых горных работ // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2020. Вып. 1. С. 458-470.
4. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Selection of open-pit mining and technical system's sustainable development strategies based on MCDM // Sustainability. 2022. Т. 14. № 13. С. 8003.
5. Palka D., Stecula K. Concept of technology assessment in coal mining // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, no. 261, 012038, pp. 1-8. DOI:10.1088/1755-1315/261/1/012038.
6. Условия и опыт формирования промышленных комплексов на базе угольных месторождений восточных регионов России / Ческидов В.И., Гаври-

лов В.Л., Резник А.В., Немова Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 13-22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-13-22>

7. Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Пыталев И.А. Формирование и освоение техногенных георесурсов. Определение параметров карьеров и отвалов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 160 с.
8. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Развитие научно-методических основ устойчивости функционирования горнотехнических систем в условиях внедрения нового технологического уклада // Золото. Полиметаллы. XXI век: матер. II Всерос. науч.-практ. конф. Пласт; Москва: ИПК ОН РАН, 2020. С. 9-10.
9. Рыльникова М.В. Условия и принципы устойчивого развития горнодобывающих предприятий в период повышенных рисков и глобальных вызовов // Горная промышленность. 2022. №3. С. 69-73.
10. Заляднов В.Ю. Оценка устойчивости функционирования горнотехнической системы открытой геотехнологии на основе интегрального показателя горных возможностей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 5-13.

References

1. Zalyadnov V.Yu., Gavrishchev S.E., Mihailova G.V., Kaderov S.S., Kovalenko N.V. Justification of the development strategy of mining enterprises based on the analysis of profitability and risk in outsourcing and diversification. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2021;(4):134-139. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-134-139.
2. Rylnikova M.V., Strukov K.I., Berger R.V., Esina E.N. Justification of Logistical System Development at Svetlinskiy Open-Pit Mine with Account for Potential Transition to Combined Open Cast and Underground Mining Methods. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2019;148(6):106-111. (In Russ.)
3. Ryzhov S.V., Rylnikova M.V. Justification of the structure of the production capacity of a gold mining enterprise at various stages of development of open-pit mining. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle* [Proceedings of the Tula State University. Earth science], 2020;1:458-470. (In Russ.)
4. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Selection of open-pit mining and technical system's sustainable development strategies based on MCDM. *Sustainability*. 2022;14(13):8003.
5. Palka D., Stecula K. Concept of technology assessment in coal mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;(261):012038. DOI:10.1088/1755-1315/261/1/012038.
6. Cheskidov V.I., Gavrilov V.L., Reznik A.V., Nemova N.A. Conditions and Experience of Establishing Industrial Complexes at Coal Deposits in the Eastern

- Regions of Russia. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(4):13-22. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-13-22>.
7. Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Yu., Pytalev I.A. The formation and development of man-made geo-resources. Determination of parameters of open pits and dumps. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011. 160 p. (In Russ.)
 8. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. Development of scientific and methodological foundations for the sustainability of the functioning of mining systems in the context of the introduction of a new technological order. *Zoloto. Polimetally. XXI vek: materialy II Vseros. nauch.-prakt. Konf.* [Gold. Polymetals. XXI century. Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference]. Plast; Moscow, 2020, pp. 9-10. (In Russ.)
 9. Rylnikova M.V. Conditions and principles of sustainable development of mining enterprises in the period of increased risks and global challenges. *Gornaya promyshlennost* [Mining industry], 2022;(3):69-73. (In Russ.)
 10. Zalyadnov V.Yu. Assessing Sustainability of the Operation of the Mining System of Open Geotechnology Based on an Integral Indicator of Mining Capabilities. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2024;22(2):5-13. (In Russ.)

Поступила 17.09.2024; принята к публикации 14.10.2024; опубликована 24.12.2024

Submitted 17/09/2024; revised 14/10/2024; published 24/12/2024

Гавришев Сергей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: ormpi-cg@mail.ru. ORCID 0000-0001-8594-8463

Заляднов Вадим Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: zalyadnov@mail.ru. ORCID 0000-0002-5730-1432

Курочкин Антон Иванович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой горных машин и транспортно-технологических комплексов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: a.kurochkin@magtu.ru

Мельник Владимир Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия.
Email: msmu-prpm@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3571-7872

Пытаев Иван Алексеевич – доктор технических наук, профессор, директор института горного дела и транспорта, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: vehicle@list.ru. ORCID 0000-0002-5415-8079

Sergey E. Gavrishev – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Mineral Deposits Development, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: ormpi-cg@mail.ru. ORCID 0000-0001-8594-8463

Vadim Yu. Zalyadnov – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mineral Deposits Development, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: zalyadnov@mail.ru; ORCID 0000-0002-5730-1432

Anton I. Kurochkin – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Mining Machines and Transport and Technological Complexes, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: a.kurochkin@magtu.ru

Vladimir V. Melnik – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia.
Email: msmu-prpm@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3571-7872

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

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.271
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-15-22



УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОСВОЕНИЯ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ РОССЫПЕЙ С РАЗДЕЛЬНОЙ ВЫЕМКОЙ И ПЕРЕРАБОТКОЙ ПЕСКОВ

Чебан А.Ю.

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

Аннотация. Актуальность и цель исследования. В связи с постепенным истощением минерально-сырьевой базы россыпного золота недропользователи вынуждены вести отработку сложноструктурных месторождений со все более низким содержанием металла и возрастающей долей мелкого золота в песках продуктивных пластов. Сохранение и даже увеличение в отдельных регионах количества добытого из россыпей золота достигается прежде всего за счет ускоренного возрастания объемов перерабатываемой минеральной массы с применением все более мощного оборудования, при этом технологии обогащения песков по-прежнему в основном ориентированы на гравобогащаемое золото с крупностью более 0,5 мм, что ведет к большим потерям металла. Существенно снизить потери золота позволяют технологии многостадийного обогащения, однако расширение их применения сдерживается относительно низкой производительностью и высокими затратами на обогащение. **Цель работы.** Повышение извлечения металла при открытой разработке сложноструктурных россыпных месторождений за счет применения усовершенствованной технологии освоения сложноструктурных россыпей с раздельной выемкой и переработкой песков. **Результаты.** В статье предлагается вести опережающую глубоко-селективную выемку включений богатых песков продуктивного пласта посредством модернизированного колесного скрепера с их транспортировкой на многостадийное обогащение с применением различных установок, включая оборудование для центробежного обогащения и отсадочных машин, что обеспечивает высокое извлечение золота разной крупности, в том числе мелкого. Модернизированный колесный скрепер, оснащенный комбинированным рабочим оборудованием, осуществляет рыхление слоя богатых песков, а затем после развота производит загрузку разрыхленной минеральной массы в ковш с использованием на заключительном этапе активной заслонки, которая продвигает собравшиеся в виде призмы волочения пески в ковш, что обеспечивает необходимое качество селективной выемки и высокое заполнение ковша. Высокопроизводительная выемка и промывка рядовых песков осуществляется бульдозерами и гидроэлеваторными шлюзовыми приборами. **Выводы.** Применение предлагаемой технологии позволит существенно сократить технологические потери и увеличить извлечение металла из песков сложноструктурных россыпей.

Ключевые слова: продуктивный пласт, богатые пески, гравобогащаемое золото, мелкое золото, колесный скрепер, комбинированное рабочее оборудование, многостадийное обогащение, извлечение металла

© Чебан А.Ю., 2024

Для цитирования

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. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-15-22>



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

IMPROVED TECHNOLOGY FOR DEVELOPMENT OF COMPLEX-STRUCTURAL PLACERS WITH SEPARATE EXCAVATION AND PROCESSING OF SANDS

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. Relevance and purpose of the study. Due to the gradual depletion of the mineral resource base of placer gold, subsoil users are forced to develop complex-structured deposits with increasingly low metal content and an increasing proportion of fine gold in the sands of productive reservoir. The preservation and even increase in certain regions of the amount of gold mined from placers is achieved primarily due to the accelerated increase in the volume of processed mineral mass using powerful equipment, while sand enrichment technologies are still focused on gold recovered by gravity with a particle size of more than 0,5mm, which leads to large metal losses. Multi-stage enrichment technologies can significantly reduce gold losses, but the expansion of their use is hampered by relatively low productivity and high enrichment costs. **Objective.** The research is aimed at increasing metal recovery during open-pit mining of complex-structured placer deposits through the use of improved technology for the development of complex-structured placers with selective mining and processing of sand. **Results.** The article proposes to carry out advanced, deep-selective mining of inclusions of rich sands of the productive reservoir using a modernized wheel tractor-scraper with their transportation to multi-stage enrichment using various units, including equipment for centrifugal enrichment and jiggling machines, which ensures high recovery of gold of different sizes, including fine ones. A modernized wheel tractor-scraper, equipped with combined working equipment, loosens a layer of rich sands, and then, after turning, loads the loosened mineral mass into the dipper using, at the final stage, an active damper, which pushes the sands collected in the form of a soil prism into the dipper, which provides the necessary selective mining quality and high dipper filling. High-performance mining and ordinary sand washing are carried out by bulldozers and hydraulic elevator sluice equipment. **Conclusions.** The use of the proposed technology will significantly reduce technological losses and increase the extraction of metal from sands of complex structured placers.

Keywords: productive reservoir, rich sands, gold recovered by gravity, fine gold, wheel tractor-scraper, combined work equipment, multi-stage enrichment, metal recovery

For citation

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, vol. 22, no. 4, pp. 15-22. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-15-22>

Введение

В связи с истощением минерально-сырьевой базы происходит перманентное усложнение горнотехнических и горно-геологических условий, вовлекаемых в отработку россыпных месторождений золота [1–4]. В настоящее время недропользователям приходится разрабатывать сложноструктурные продуктивные пласты со все уменьшающимся содержанием и крупностью золота, увеличивающейся глубиной залегания, повышенной глинистостью и неравномерным содержанием полезного компонента. Согласно исследованию [1], за последние 20 лет в ряде районов Якутии доля простых по геоморфологии залежей уменьшилась более чем в два раза при одновременном увеличении числа сложных, за это же время в Якутии среднее содержание золота в песках россыпных месторождений уменьшилось в 1,9 раза с 1,8 до 0,95 г/м³.

Валовая выемка минеральной массы сложноструктурных пластов приводит к перемешиванию богатых и рядовых песков, а также их разубоживанию некондиционными песками, что ведет к росту объемов перерабатываемой минеральной массы, уменьшению в ней среднего содержания металла, а в результате к повышению себестоимости конечной продукции. Таким образом, все большее вовлечение в отработку сложноструктурных месторождений со сравнительно невысокими содержаниями полезного компонента в песках и значительным количеством мелкого золота требует разработки геотехнологий, основанных на соблюдении принципов энерго- и ресурсосбережения, позволяющих повысить эффективность горного производства [5–8].

Состояние вопроса и постановка проблемы

На большинстве россыпных месторождений распределение запасов как по содержанию, так и по геометрическим характеристикам изменяется в соответствии с определенной природной закономерностью по кластерному типу [5]. Так, проведенное в Институте горного дела Севера СО РАН с применением компьютерной числовой модели исследование по определению качественной структуры запасов песков и металла россыпи реки Большой Кураных показало, что в 20% песков с содержанием золота более $0,3 \text{ г/м}^3$ находится 62% металла, при этом всего в 2% богатых песков с содержанием более 1 г/м^3 сосредоточено 17% золота [8]. В исследовании [9] выявлено, что на некоторых россыпях имеется концентрация самородков в линзовидных скоплениях, вытянутых по простиранию россыпных тел, размеры линз варьируют от 3×1 до 30×4 м, данные скопления отделены друг от друга промежутками пониженной продуктивности. Неравномерность содержания полезных компонентов в россыпях прослеживается не только в плане, но и в разрезе.

Сохранение и даже увеличение в отдельных регионах количества добытого из россыпей золота достигается прежде всего за счет ускоренного возрастания объемов перерабатываемой минеральной массы с применением все более мощного оборудования, при этом технологии обогащения песков по-прежнему в основном ориентированы на гравобогащаемое золото с крупностью более 0,5 мм, что ведет к большим потерям металла [10-12]. Данные по технической оснащенности предприятий, ведущих открытую разработку ряда золотороссыпных месторождений Якутии и Магаданской области, представленные в работах [13, 14], также показывают, что выемка и перемещение песков и торфов в основном ведется с использованием сверхтяжелых бульдозеров Komatsu D-355, D-375, D-475 и других мощных машин. При этом необходимо отметить, что ширина отвала тяжелых и сверхтяжелых бульдозеров, выполняющих основной объем работ, составляет 4-5 м и более. Подобные размеры рабочих органов выемочно-транспортирующих машин не позволяют вести качественную селективную выемку разноразмерных песков сложноструктурных пластов россыпных месторождений. В результате пески с различным содержанием металла подаются на установку, где промываются в одном режиме, без учета изменчивости геолого-технологических характеристик минерального сырья.

Изменчивость геометрии залежей золота и других ценных полезных ископаемых имеет важное значение при выборе технико-технологических решений для отработки месторождений [15-17]. Существенного повышения эффективности разработки россыпей возможно достичь путем уменьшения объема направляемых на промывку песков. Так, после обследования работы одного из приисков Южной Якутии выявлено,

что распределение металла по дражным полигонам крайне неравномерное и изменяется от 0,001 до $1,770 \text{ г/м}^3$, в результате чего 40-80% песков перерабатывались драгами практически впустую [16], в результате была предложена усовершенствованная технология разработки россыпных месторождений с применением драг, предполагающая адаптацию технологии дражной разработки к закономерностям кластерной организации месторождения с выборочной отработкой песков, что должно привести к повышению в 1,5-2,5 раза среднего содержания золота в перерабатываемых песках, повышению до двух раз выработки конечной продукции на одного работающего при одновременном снижении стоимости металла на 10-25%. Это позволит включить в разработку минерально-сырьевую базу ряда месторождений с ныне нерентабельными запасами.

В исследовании [18] предлагается способ комбинированной разработки песков россыпного месторождения золота реки Большой Кураных, заключающийся в разделении песков по качеству путем установления внутренних границ продуктивной части с выделением по содержанию полезного компонента песков высокого и низкого качества, выемке добычным оборудованием, гидравлической сортировке песков различного качества в непосредственной близости от места добычи, транспортировке полученной пульпы двумя потоками: одним с высоким содержанием полезного компонента – непосредственно на обогащение, а вторым с меньшим содержанием полезного компонента – в промежуточную технологическую емкость, в которой происходит естественное разделение по плотности минералов породы и металла в водной среде с концентрацией золота в нижнем слое. После чего из технологической емкости верхний слой убирают в отвал, а обогащенный полезным компонентом нижний слой направляют на переработку.

Институтом горного дела ДВО РАН разработана технология формирования продуктивных зон в приплотиковой части техногенной россыпи за счет осуществления миграции частиц золота преимущественно в вертикальном направлении [19]. Технология подразумевает создание в блоке техногенных песков фильтрационного потока воды, перетекающей из водозаводной канавы в верхней части блока в аккумуляющую канаву в нижней части блока, что способствует процессам миграции полезного компонента в приплотиковую часть пласта. Экспериментальные исследования показали, что за два промывочных сезона возможно формирование продуктивной зоны с кондиционным содержанием металла.

В работе [20] на основе анализа гранулометрических характеристик песков и металла по совмещенной шкале крупности обоснована возможность дополнительного увеличения объема выделяемой некондиционной фракции на 5-37%, которая на стадии грохочения направляется в отвал. Установлено, что на отдельных россыпях возможно снижение крупно-

сти питания до размера менее 30 мм, что позволит при ведении обогащительных процессов использовать оборудование с меньшей производительностью, но с более высокими показателями извлечения.

Золотосодержащие пески в настоящее время в основном перерабатываются с применением гидроэлеваторных шлюзовых приборов (ПГШ) [3]. Различные исследования показывают, что на многих россыпях значительная часть металла представлена мелким и «тонким» золотом размером менее 0,2 мм, это предопределяет высокие потери полезного компонента при промывке песков посредством ПГШ, которые составляют до 50–70% металла данного класса крупности [21]. Также при обогащении песков на ПГШ существенны потери золота крупностью $-0,5+0,2$ мм, составляющие до 30% [21]. Снизить потери металла возможно за счет применения многостадийной технологии обогащения, однако в связи с более высокими капитальными и эксплуатационными затратами данное оборудование целесообразно применять при относительно высоком содержании мелкого и «тонкого» золота в песках [21, 22]. Очевидно, что многостадийную технологию обогащения, обеспечивающую максимальное извлечение золота, необходимо использовать прежде всего при переработке богатых песков для получения наибольшего эффекта.

Известна комбинированная технология разработки сложноструктурных глубокозалегающих россыпей золота [23], заключающаяся в опережающем извлечении богатых песков за счет механического расширения скважин специальным выемочным модулем и скважинной гидродобычи с направлением поднятых на поверхность песков на многостадийное обогащение и последующей доработке оставшихся запасов

пласта с использованием скважинного выщелачивания. Существенным недостатком скважинного выщелачивания является неполное растворение крупных золотинок размером более 1–1,5 мм, а также золотинок невысокой пробы (менее 0,800), количество которых на некоторых месторождениях может достигать 20–40% [24].

Целью данного исследования является повышение извлечения металла при открытой разработке сложноструктурных россыпных месторождений золота за счет применения технологии добычи и переработки с глубокоселективной выемкой богатых песков посредством модернизированного колесного скрепера с подачей на многостадийное обогащение, а также выемкой и транспортировкой рядовых песков бульдозерами с их обогащением на гидроэлеваторных шлюзовых приборах.

Результаты исследования

В Институте горного дела ДВО РАН обоснована технология освоения сложноструктурных россыпей, обеспечивающая повышение полноты извлечения металла из песков продуктивного пласта. В ходе эксплуатационной разведки месторождения производится оконтуривание зон богатых и рядовых песков. После вскрытия продуктивного пласта 1 (см. рисунок) осуществляется опережающая глубокоселективная выемка богатых песков посредством модернизированного колесного скрепера 2 с комбинированным рабочим оборудованием, прототипом для которого является колесный скрепер, оснащенный активной заслонкой для улучшения заполнения ковша разрыхленной горной массой [25].

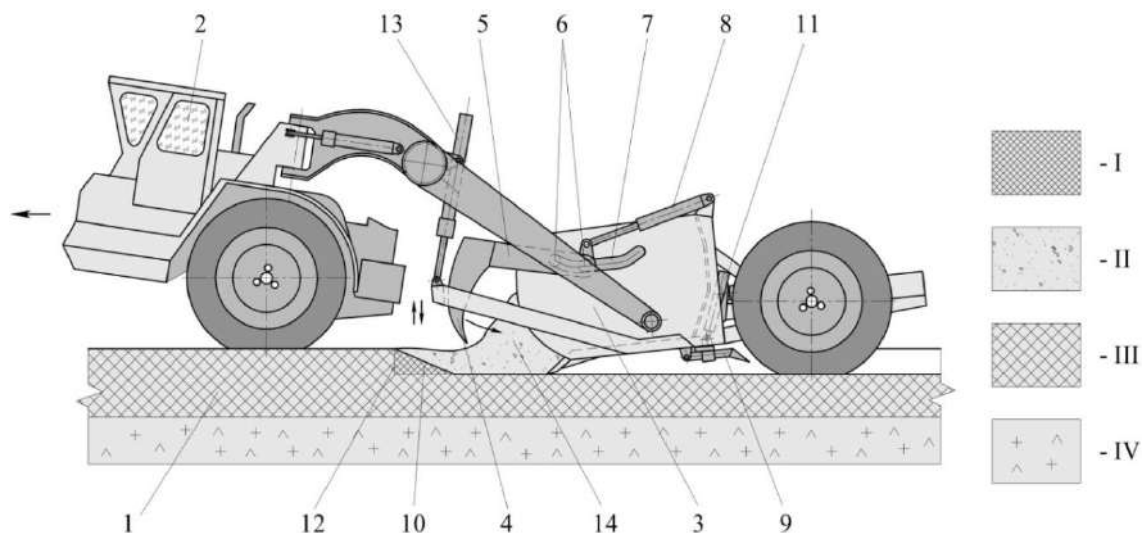


Рисунок. Схема опережающей выемки богатых песков продуктивного пласта модернизированным колесным скрепером: I, II – богатые пески соответственно в естественном залегании, в разрыхленном состоянии; III – рядовые пески; IV – плотик

Figure. Scheme of advanced extraction of rich sands of a productive reservoir with a modernized wheel tractor-scraper: I, II are rich sands in natural occurrence and in a loosened condition, respectively; III is ordinary sands; IV is bedrock

Модернизированный колесный скрепер 2 с комбинированным рабочим оборудованием кроме ковша 3 с активной заслонкой 4, тяги 5, которые на роликах 6 перемещаются в направляющих 7 посредством гидроцилиндров 8, также снабжен рыхлителем 9 с зубьями. Применение рыхлителя 9 целесообразно для предварительной подготовки к выемке связных песков, имеющих повышенное сопротивление копанью в связи с содержанием существенного количества глинистых частиц. Рыхление осуществляется на глубину, соответствующую мощности слоя богатых песков, и составляет 0,3–0,4 м. Если мощность слоя богатых песков больше, то их выемка ведется за 2–3 прохода, с предварительным рыхлением песков перед каждым проходом на всю длину богатого включения.

Если в продуктивном пласте слой богатых песков покрыт рядовыми песками, то первоначально бульдозером снимается слой, содержащий рядовые пески. Селективная выемка богатых песков из продуктивного пласта 1 (см. **рисунок**) осуществляется следующим образом. В случае если пески связные, колесный скрепер 2, двигаясь холостым ходом по зоне богатых песков 10 к месту начала загрузки, посредством гидроцилиндров 11 опускает рыхлитель 9 с зубьями и производит дезинтеграцию слоя богатых песков до границы 12 с рядовыми песками. Перед выемкой несвязных или слабосвязных богатых песков их предварительное рыхление не проводится. Затем колесный скрепер 2 разворачивается, посредством гидроцилиндров 8 и 13 производится соответственно выдвижение активной заслонки 4 вперед-вверх и опускание ковша 3. В процессе движения колесного скрепера 2 за счет силы тяги осуществляется заполнение ковша 3 разрыхленной минеральной массой, на конечном этапе заполнения перед ковшом формируется призма волочения 14, содержащая значительный объем богатых песков. При приближении ковша к границе 12 между богатыми и рядовыми песками колесный скрепер 2 останавливается и гидроцилиндры 8 посредством тяг перемещают активную заслонку 4 назад в исходное положение. Активная заслонка 4 продвигает в ковш 3 богатые пески из призмы волочения 14, исключая тем самым перемешивание богатых и рядовых песков и обеспечивая высокую заполняемость ковша 3. Ожидаемый коэффициент наполнения ковша с учетом перемещаемого активной заслонкой объема песков составит 0,9–1,0, в то же время заполнение ковша только за счет силы тяги скрепера в среднем равно 0,6–0,8 [26].

Путь заполнения ковша в среднем составит 15–20 м, при этом, в случае если длина богатого включения меньше пути заполнения ковша, ковш остается незагруженным, так как выемка ведется до границы богатых и рядовых песков, а если больше – то выемка богатого включения на всю длину осуществляется за несколько последовательных проходов. После выемки богатые пески россыпи транспортируются модернизированным колесным скрепером 2 на многостадийное гравитационное обогащение с применением

различных установок, включая оборудование для центробежного обогащения и отсадочных машин, что обеспечивает высокое извлечение золота различных классов крупности, в том числе мелкого и «тонкого». Высокопроизводительная выемка и транспортировка рядовых песков осуществляется бульдозерами с перемещением минеральной массы к промывочным приборам типа ПГШ, на которых ведется обогащение песков по шлюзовой технологии.

Автором проведены укрупненные расчеты по возможности применения предлагаемой технологии на одном из сложноструктурных россыпных месторождений золота в Хабаровском крае. Выполненная обработка данных детальной геологической разведки одного из участков исследуемого месторождения показала среднее содержание металла в интервалах опробования по участку – 0,77 г/м³, результаты ситового анализа золота выявили, что в среднем по участку золотины класса крупности +2 мм составляют 6,5% массы металла; класса крупности -2+1 мм – 35,1%; -1+0,5 мм – 11,2%; -0,5+0,2 мм – 42,2%; -0,2 мм – 5,0%. Мощность продуктивного пласта изменяется от 0,8 до 2,0 м при средней мощности 1,2 м, при этом включения богатых песков в пласте имеют мощность 0,4 м.

По содержанию полезного компонента пески продуктивного пласта были условно разделены на богатые – более 1,5 г/м³ и рядовые – менее 1,5 г/м³, доля богатых песков составила 12,5% объема минеральной массы со средним содержанием 2,41 г/м³, среднее содержание золота в рядовых песках 0,53 г/м³, при этом в богатых песках находится 39,4% металла рассматриваемого участка. С учетом данных по зависимости извлечения золота от его крупности [21] может быть определена величина средневзвешенного коэффициента извлечения золота при обогащении песков по *i*-й технологии:

$$k_{\text{ср}}^i = \sum_j k_j^i M_j, \quad (1)$$

где k_j^i – коэффициент извлечения *j*-го класса крупности золотин при использовании *i*-й технологии обогащения песков; M_j – доля по массе *j*-го класса крупности золотин.

Проведенные расчеты показали, что средневзвешенный коэффициент извлечения металла из песков при их обогащении с использованием шлюзовой технологии составляет $k_{\text{ср}}^{\text{ПГШ}} = 0,812$, а при многостадийном обогащении песков $k_{\text{ср}}^{\text{МН}} = 0,971$.

Общий коэффициент извлечения металла при обогащении богатых и рядовых песков по разным технологиям может быть определен по формуле

$$K_{\text{общ}} = \frac{k_{\text{ср}}^{\text{ПГШ}} Q_{\text{р}} + k_{\text{ср}}^{\text{МН}} Q_{\text{б}}}{100}, \quad (2)$$

где $Q_p = 60,6\%$, $Q_b = 39,4\%$ – доля металла, содержащегося в рядовых и богатых песках соответственно.

Таким образом, общий коэффициент извлечения металла при раздельной переработке песков составляет 0,875, что на 6,3% выше, чем при переработке всего объема песков на гидроэлеваторных шлюзовых приборах.

Выводы

В статье предложена технология разработки сложноструктурных россыпных месторождений с раздельной выемкой богатых и рядовых песков и их последующей переработкой с использованием различного обогащательного оборудования для повышения извлечения металла при приемлемой себестоимости процессов. Опережающая глубокоселективная выемка богатых песков осуществляется модернизированным колесным скрепером, оснащенным комбинированным рабочим оборудованием в виде ковша с активной заслонкой и рыхлителем, обеспечивающим высокую эффективность заполнения ковша минеральной массой. В процессе холостого хода модернизированного колесного скрепера рыхлителем ведется дезинтеграция слоя богатых песков, после чего осуществляется заполнение ковша разрыхленными песками с продвижением активной заслонкой на конечном этапе копания образовавшейся призмы волочения внутрь ковша, что обеспечивает уменьшение перемешивания богатых и рядовых песков.

Богатые пески, содержащие значительную долю запасов металла разрабатываемого участка направляются на дорогостоящее многостадийное обогащение, обеспечивающее максимальное извлечение полезного компонента. В связи с относительно небольшими объемами богатых песков оборудование для многостадийного обогащения будет перерабатывать богатые пески также и с других участков месторождения. Выемка и транспортировка рядовых песков осуществляется бульдозерами с подачей их на обогащение по низкостратной шлюзовой технологии. Проведенные исследования по возможности внедрения данного технико-технологического решения для одного из россыпных месторождений с учетом его горно-геологических условий, содержаний металла в песках, ситового анализа золота показали, что раздельная выемка и переработка богатых и рядовых песков позволит увеличить извлечение металла с 81,2 до 87,5% при сопоставимом уровне затрат на единицу продукции.

Список источников

1. Оценка влияния особенностей строения россыпных месторождений золота на эффективность их освоения на Севере / Батугина Н.С., Гаврилов В.Л., Ткач С.М., Хоютанов Е.А. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. №3. С. 67-76.

2. 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.
3. 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.
4. Quantitative mineralogy and geochemistry of pelletized sulfide-bearing gold concentrates in an alkaline heap leach / Holley E. A., Yu Ting Yu, Navarre-Sitchler A. Winterton J. // Hydrometallurgy. 2018, vol. 181, pp. 130–142.
5. 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.
6. Васильева С.В., Секисов А.Г. Экономика отраслевых рынков. Чита: Изд-во ЧитГУ, 2011. 124 с.
7. 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.
8. Ермаков С.А., Бураков А.М. Комбинирование процессов предварительной концентрации полезного компонента как основа для создания геотехнологий нового типа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. №4. С. 102-107.
9. Клепиков В.Н. Региональные и локальные особенности концентрации самородков золота в россыпях // Концентрация и рассеяние полезных компонентов в аллювиальных россыпях: тез. докл. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. С. 24-26.
10. Башмачников А. Производство золота в России – итоги 2021 года // Золото и технологии. 2022. №2. С. 18-29.
11. Чебан А.Ю., Рассказов И.Ю., Литвинцев В.С. Анализ парка горных машин горнодобывающих предприятий Амурской области // Маркшейдерия и недропользование. 2012. №2. С. 41-50.
12. Research and application of a Knelson concentrator: A review / Qiao Chen, Hong-ying Yang, Lin-lin Tong, Hui-qun Niu, Fu-sheng Zhang et al. // Minerals Engineering. 2020, vol. 152, 106339.
13. Ермаков С.А., Потехин А.В. Анализ применяемых способов разработки и оборудования на россыпных месторождениях Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. №S7. С. 218-224.
14. Курбатова В.В., Семькин Е.С., Голубев И.А. Депривация механизации процессов золотодобычи в условиях Северо-Востока России // Маркшейдерия и недропользование. 2022. №6. С. 23-32.
15. 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.

References

16. Батугина Н.С., Гаврилов В.Л., Ткач С.М. Кластерная организация россыпных месторождений Якутии и использование ее особенностей в геотехнологиях // Горный журнал. 2019. №2. С. 16-19.
17. How efficient are they really? A simple testing method of small-scale gold miner's gravity separation systems / Teschner B., Smith N. M., Borrillo-Hutter T., Zira Quaghe John, Wong T. E. // Minerals Engineering. 2017, vol. 105, pp. 44-51.
18. Пат. 2449126 Российская Федерация, МПК E21C 41/30. Способ комбинированной переработки песков россыпного месторождения золота реки Большой Куранах / С.А. Ермаков, А.М. Бураков, С.В. Панишев, И.С. Касанов, И.В. Иванов; заявитель и патентообладатель Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН. № 2010133211; заявл. 06.08.2010; опубл. 27.04.2012.
19. Алексеев В.С., Серый Р.С. Экспериментальные исследования технологии формирования продуктивных зон при отработке техногенных россыпных месторождений золота // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. №3. С. 110-115.
20. Ермаков С.А., Бураков А.М., Касанов И.С. Минимизация объемов переработки золотосодержащих песков россыпных месторождений Якутии по критерию предельной крупности некондиционного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. №4. С. 138-149.
21. Замятин О.В., Маньков В.М. Мелкое золото в россыпях: проблемы оценки и извлечения // Горный журнал. 2011. №4. С. 22-26.
22. 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.
23. 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.
24. Колпаков В.В., Неволько П.А., Фоминых П.А. Типохимизм и минеральные ассоциации самородного золота россыпей района Култуминского Au-Cu-Fe-скарнового месторождения (Восточное Забайкалье) // Разведка и охрана недр. 2023. №12. С. 20-31.
25. Чебан А.Ю., Хрунина Н.П., Якименко Д.В. Совершенствование комплекса горнотранспортного оборудования для работы совместно с машинами послойного фрезерования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 40-45.
26. Лешков В.Г. Разработка россыпных месторождений: учебник. М.: Недра, 1985. 568 с.
1. Batugina N.S., Gavrilov V.L., Tkach S.M., Khoiyutnov E.A. Influence of structural features of gold placers on mining efficiency in the North. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and technical problems of mining]. 2022; (3): 67-76. (In Russ.)
2. 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.
3. Rasskazov I.Yu., Cheban A.Yu., Litvintsev V.S. Analysis of the technical equipment of mining enterprises in the Khabarovsk Territory and the Jewish Autonomous Region. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal]. 2013;(2):30-34. (In Russ.)
4. 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.
5. Ermakov S.A., Burakov A.M. Complex-structure gold placer mining in Yakutia. *Journal of Mining Science*. 2013;49(2):273-278.
6. Vasilyeva S.V., Sekisov A.G. *Jekonomika otraslevykh rynkov* [Economics of industrial markets]. Chita: ChitGU, 2011, 124 p. (In Russ.)
7. Oberthuer T., Melcher F., Weiser T.W. Detrital platinum-group minerals and gold in deposits of south-eastern Samar Island, Philippines. *The Canadian Mineralogist*. 2017;55(1):45-62.
8. Ermakov S.A., Burakov A.M. Combining the processes of preliminary concentration of a useful component as the basis for creating a new type of geotechnologies. *Gornyy informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2008;(4):102-107. (In Russ.)
9. Klepikov V.N. Regional and local features of the concentration of gold nuggets in placers. *Koncentraciya i rasseyaniye poleznykh komponentov v allyuvial'nykh rossypyah: tez. dokl.* [Concentration and dispersion of useful components in alluvial placers: thesis report]. Yakutsk: YaF SB AN USSR, 1985, pp. 24-26. (In Russ.)
10. Bashmachnikov A. Gold production in Russia - results of 2021. *Zoloto i tehnologii* [Gold and technology]. 2022;(2):18-29. (In Russ.)
11. Cheban A.Yu., Rasskazov I.Yu., Litvintsev V.S. Analysis of the amur region mining enterprises machinery park. *Markshejderiya i nedropol'zovanie* [Mine surveying and subsurface use]. 2012;(2):41-50. (In Russ.)
12. 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.
13. Ermakov S.A., Potekhin A.V. Analysis of the applied development methods and equipment at alluvial deposits of Yakutia. *Gornyy informacionno-*

- analiticheskij bjulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2012;(S7):218-224. (In Russ.)
14. Kurbatova V.V., Semykin E.S., Golubev I.A. Depri-
vation of mechanization of gold mining processes in
the North-East of Russia. *Markshejderija i*
nedropol'zovanie [Mine surveying and subsurface
use]. 2022;(6):23-32. (In Russ.)
 15. Chanderman L., Dohm C. E., Minnitt R. C. A. 3D geo-
logical modeling and resource estimation for a gold de-
posit in Mali. *Journal of the Southern African Institute*
of Mining and Metallurgy. 2017;117(2):189-197.
 16. Batugina N.S., Gavrilov V.L., Tkach S.M. Cluster
organization of alluvial deposits in Yakutia and the
use of its features in geotechnologies. *Gornyj zhurnal*
[Mining Journal]. 2019;(2):16-19. (In Russ.)
 17. Teer 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.
 18. Ermakov S.A., Burakov A.M., Panishev S.V., Kasanov
I.S., Ivanov I.V. *Sposob kombinirovannoj pererabotki*
peskov rossypnogo mestorozhdenija zolota reki Bol'shoj
Kuranah [Method of combined processing of sands from
placer gold deposits of the Bolshoi Kuranakh River]. Pa-
tent RF, no. 2449126, 2012. (In Russ.)
 19. Alekseev V.S., Seryi R.S. Experimental studies into
technology of generation of pay zones in gold mine
waste. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki*
poleznyh iskopaemyh [Physical and technical prob-
lems of mining], 2016;52(3):110-115. (In Russ.)
 20. Ermakov S.A., Burakov A.M., Kasanov I.S. Minimi-
zation of processing volumes of gold-bearing sand of
Yakutia placer deposits by limit size criterion of sub-
standard raw materials. *Gornyj informacionno-*
analiticheskij bjulleten' [Mining Information and Ana-
lytical Bulletin], 2014;(4):138-149. (In Russ.)
 21. Zamyatin O.V., Mankov V.M. Fine gold alluvial de-
posits: problems of estimation and extraction. *Gornyj*
zhurnal [Mining Journal], 2011;(4):22-26. (In Russ.)
 22. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on la-
boratory Knelson Concentrator separation perfor-
mance: Part 1: Retained mass modeling. *Minerals En-*
gineering. 2017;112:57-67.
 23. Cheban A.Yu., Sekisov A.G. Combined technology
for the development of complex structure deep gold
placers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo*
tehnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik
of Nosov Magnitogorsk State Technical University],
2023;21(1):24-31. (In Russ.)
 24. Kolpakov V.V., Nevolko P.A., Fominykh P.A. Typo-
chemistry and mineral associations of native placer gold
in the Kultuminsky Au-Cu-Fe-skarn deposit district
(Eastern Transbaykalia). *Razvedka i ohrana nedr* [Ex-
ploration and protection of subsoil], 2023;(12):20-31.
(In Russ.)
 25. Cheban A.Yu., Khrunina N.P., Yakimenko D.V. En-
hanced mining and hauling equipment complex to be
used together with surface miners. *Vestnik Magnitogor-*
skogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta
im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State
Technical University], 2018;16(3):40-45. (In Russ.)
 26. Leshkov V.G. *Razrabotka rossypnyh mestorozhdenij*
[Development of placer deposits]. Moscow: Nedra,
1985, 568 p. (In Russ.)

Поступила 22.03.2024; принята к публикации 19.04.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 22/04/2024; revised 19/04/2024; published 24/12/2024

Чебан Антон Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, 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 – PhD (Eng.), Associate Professor, 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 622.014:502.12

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-23-29

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА ЭКОЛОГИЧЕСКИ СБАЛАНСИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ОСВОЕНИИ ГЕОРЕСУРСОВ (НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТОВ РАЗРАБОТКИ ТОМИНСКОГО ГОКА И ЛИКВИДАЦИИ КОРКИНСКОГО РАЗРЕЗА)

Гончар Н.В.¹, Гуман О.М.², Пикалов В.А.³, Терешина М.А.³

¹АО «Русская медная компания», Екатеринбург, Россия

²ООО «Уралгеопроект», Екатеринбург, Россия

³ООО «Научно-технический центр „Геотехнология”», Челябинск, Россия

Аннотация. Актуальность. Согласно государственному докладу Министерства природных ресурсов и экологии, в настоящее время в Российской Федерации образуется более 9,0 млрд т отходов производства и потребления, причём за последние 20 лет эти значения увеличились в 4 раза. Техногенные объекты, образованные в результате добычи полезных ископаемых открытым способом и выведенные из эксплуатации по различным причинам, приводят, как правило, к ряду экологических и социальных проблем. **Цель работы.** Раскрыть принцип и методические подходы экологически сбалансированного проектирования разработки месторождений твердых полезных ископаемых. **Результаты.** Сущность экологически сбалансированного проектирования в комплексном освоении георесурсов, при котором одни техногенные объекты могут быть использованы для ликвидации, размещения, создания или рекультивации других техногенных объектов с одновременным улучшением экологической обстановки и восстановлением окружающей среды и ландшафтов. Принцип экологически сбалансированного проектирования разработки месторождений твердых полезных ископаемых заключается в формировании на каждом этапе функционирования горнотехнической системы баланса между эколого-компенсирующими решениями и неизбежным негативным воздействием, возникающими на всех стадиях и во всех технологических процессах горнодобывающего и смежных производств. В основе экологически сбалансированного проектирования лежат природные и инженерные возможности, профилактические и компенсирующие мероприятия (воздействия), эколого-технологический мониторинг. Рассмотрен успешный опыт реализации принципа эколого-сбалансированного проектирования на основе проекта ликвидации Коркинского угольного разреза с использованием закладочного материала, приготовленного на основе хвостов обогащения Томинского ГОКа. Закладочный материал является продуктом, получаемым при сгущении хвостов обогатительной фабрики, и изготавливается по технологическому регламенту, утверждённому в установленном порядке, с соблюдением установленных санитарных норм и правил. **Рекомендации.** Для реализации таких проектов необходимо задействовать научно-исследовательские и проектно-изыскательские работы с привлечением ведущих научных и проектных институтов в области горного дела, геомеханики, гидрогеологии и экологии.

Ключевые слова: экология, экологическая сбалансированность, проектирование, георесурсы, комплексное освоение

© Гончар Н.В., Гуман О.М., Пикалов В.А., Терешина М.А., 2024

Для цитирования

Реализация принципа экологически сбалансированного проектирования при комплексном освоении георесурсов (на примере проектов разработки Томинского ГОКа и ликвидации Коркинского разреза) / Гончар Н.В., Гуман О.М., Пикалов В.А., Терешина М.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 23-29. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-23-29>



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

IMPLEMENTATION OF THE PRINCIPLE OF ENVIRONMENTALLY BALANCED DESIGN IN THE COMPLEX DEVELOPMENT OF GEORESOURCES (BASED ON THE EXAMPLE OF THE DEVELOPMENT PROJECTS OF THE TOMINSKY MINING AND PROCESSING PLANT AND LIQUIDATION OF THE KORKINSKY OPEN-PIT MINE)

Gonchar N.V.¹, Guman O.M.², Pikalov V.A.³, Tereshina M.A.³

¹JSC Russian Copper Company, Yekaterinburg, Russia

²LLC Uralgeoproekt, Yekaterinburg, Russia

³LLC Scientific and Technical Center Geotechnology, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Relevance. According to the state report of the Ministry of Natural Resources and Environment, the Russian Federation currently generates more than 7.5 billion tons of industrial waste, and over the past 20 years these values have increased 4 times. Technogenic objects formed as a result of open-pit mining and decommissioned for various reasons usually lead to a number of environmental and social problems. **Objectives.** It is required to reveal the principle and methodological approaches of environmentally balanced design for the development of solid mineral deposits. **The results.** The essence of environmentally balanced design consists of the integrated development of georesources, in which some technogenic objects can be used for the liquidation, placement, creation or reclamation of other technogenic objects while improving the environmental situation and restoring the environment and landscapes. The principle of environmentally balanced design of the solid minerals deposits development consists in the formation at each stage of the functioning of the mining engineering system of a balance between environmental-compensating solutions and the inevitable negative effects arising at all stages and in all technological processes of mining and related industries. The basis of environmentally balanced design is formed by natural engineering capabilities, preventive and compensatory measures (effects), environmental and technological monitoring. The successful experience of implementing the principle of environmentally balanced design based on the project for the liquidation of the Korkinsky open-pit coal mine using stowage material prepared on the basis of refinement tailings from the Tominsky Mining and Processing Plant is considered. The stowage material is a product obtained by thickening the tailings of a processing plant, and is manufactured according to technological regulations approved in the established order, in compliance with established sanitary norms and rules. **Recommendations.** To implement such projects, it is necessary to involve research and design and survey work with the involvement of leading scientific and design institutes in the field of mining, geomechanics, hydrogeology and ecology.

Keywords: ecology, environmental balance, design, georesources, complex development

For citation

Gonchar N.V., Guman O.M., Pikalov V.A., Tereshina M.A. Implementation of the Principle of Environmentally Balanced Design in the Complex Development of Georesources (Based on the Example of the Development Projects of the Tominsky Mining and Processing Plant and Liquidation of the Korkinsky Open-Pit Mine). *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 23-29. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-23-29>

Введение

Процесс добычи полезных ископаемых, как и любое производство, нарушает равновесие экосистемы. Согласно государственному докладу Министерства природных ресурсов и экологии, в настоящее время в Российской Федерации образуется более 9,0 млрд т отходов производства и потребления [1], причём за последние 20 лет эти значения увеличились в 4 раза [2].

Наибольшую опасность представляет та часть отходов и техногенных объектов, которая не утилизируется, а остается на территории горного предприятия, изменяя ландшафт и оказывая вредное воздействие на окружающую среду [3].

Техногенные объекты, образованные в результате добычи полезных ископаемых открытым способом и выведенные из эксплуатации по различным причинам, приводят, как правило, к ряду экологических и социальных проблем [4–6]:

- карьерные выемки зачастую оказывают влияние на подземные воды, атмосферный воздух, являются очагами техногенных пожаров, нередко стихийно заполняются коммунальными и промышленными отходами;

- неконтролируемые оползневые явления и обрушения бортов и откосов уступов создают угрозу расположенным вблизи промышленным и социальным объектам;

– ухудшение экологической ситуации, сокращение рабочих мест приводят к снижению качества и уровня жизни жителей территории.

Принцип экологически сбалансированного проектирования разработки месторождений твердых полезных ископаемых заключается в формировании на каждом этапе функционирования горнотехнической системы баланса между эколого-компенсирующими решениями и неизбежным негативным воздействием, возникающими на всех стадиях и во всех технологических процессах горнодобывающего и смежных производств.

Если рассматривать принцип как основное правило деятельности [6], то его можно сформулировать следующим образом: удерживать воздействие проектируемого объекта на окружающую среду на допустимом уровне благодаря компенсирующим процессам и инженерным мероприятиям.

Предпосылки для экологически сбалансированного проектирования создаются при комплексном освоении георесурсов, при котором одни техногенные объекты – выработанные пространства, полости, сооружения – могут быть использованы для ликвидации, размещения, создания или рекультивации других техногенных объектов – хранилищ хвостов обогащения, пустых пород, производственных отходов 5-го класса опасности с одновременным улучшением экологической обстановки и восстановлением окружающей среды и ландшафтов [7]. Реализация такого подхода приводит к значительному снижению нагрузки на окружающую среду.

Результаты исследования

Экологически сбалансированное проектирование является развитием «концепции контролируемого воздействия», предложенной Мироненко В.А., которая, по его мнению, должна «покоиться на трех китах» – самоочищении, инженерной профилактике и мониторинге, увязанных между собой последовательно уточняемыми (на основе результатов наблюдений) прогнозами [8].

В основе экологически сбалансированного проектирования лежат природно-инженерные возможности, профилактические и компенсирующие мероприятия, эколого-технологический мониторинг. Одним из успешных примеров реализации принципа эколого-сбалансированного проектирования на основе комплексного использования георесурсов является проект ликвидации Коркинского угольного разреза с использованием закладочного материала, приготовленного на основе хвостов обогащения Томинского ГОКа [4].

Коркинский разрез расположен в Челябинской области, близ г. Коркино. Разрез является самым глубоким в Евразии и вторым по глубине в мире. За годы эксплуатации (1934–2017 гг.) разрезом добыто 266 млн т угля, объем вскрышных пород составил 1,25 млрд м³. В результате разработки образована техногенная выемка

глубиной 493 м, длиной по поверхности 3120 м, шириной 2750 м и емкостью около 1,3 млрд м³ [4].

Коркинский разрез в последние годы эксплуатации являлся источником техногенных, экологических и социальных проблем. Применительно к Коркинскому разрезу концепция экологически сбалансированного проектирования может быть успешно реализована, так как он характеризуется наличием участков, имеющих защитные геологические свойства, предотвращающие загрязнение прикарьерного массива. Согласно тектонической схеме, исследуемый район находится в пределах Восточно-Уральского синклиниория. Сильно метаморфизированные и дислоцированные палеозойские породы этой зоны в виде ступенчатой системы сбросов и уступов погружаются под покров отложений Западно-Сибирской низменности [9, 10].

Переходные зоны от горно-складчатых областей к платформенным структурам являются с экологических предпосылок наиболее благоприятными, так как палеозойские, мезозойские породы перекрываются более молодыми осадочными породами кайнозойского времени, в которых формируются артезианские воды платформенных чехлов, используемые для хозяйственного водоснабжения. Водоносные горизонты верхних этажей отличаются повышенной водообильностью и водопроницаемостью в отличие от подстилающих пород, как правило это воды трещинного типа. В ходе заполнения закладочным материалом типичными будут процессы смешения, растворения (осаждения), окисления, молекулярной диффузии, капиллярного всасывания, выщелачивания, сорбции, ионного обмена, реакции комплексообразования и некоторые другие, которые можно рассматривать в перспективе как процессы «самоочищения» [11].

Пример изменения состава воды при рекультивации карьера медноколчеданных руд приведен на рис. 1.

Прогнозный расчет изменения химического состава воды, накапливающейся в разрезе, выполнен с учетом баланса источников питания карьерной выемки по значению минерализации смешивающихся вод, содержанию в них сульфатов как основных индикаторов возможных процессов окисления сульфидных минералов. Дополнительно сделан прогноз изменения содержания в воде цинка и марганца, без учета того фактора, что содержание металлов в водах зависит от физико-химических параметров растворов и возникающих в толще воды процессов комплексообразования, осаждения и прочих, приводящих к снижению концентраций металлов в воде. О наличии этих процессов свидетельствуют более низкие фактические их содержания в пробах воды, отобранных из ликвидируемой карьерной выемки, относительно расчетных [12].

Это позволяет рассматривать Коркинский разрез до отметки +210 м как безопасный объект. Подземные воды зоны активного водообмена расположены выше этой отметки и в настоящий момент разгружаются в него. За счет испарения с увеличивающейся

площади водной поверхности поднятие уровня воды выше этой отметки не прогнозируется.

Проект строительства Томинского горно-обогатительного комбината был включен в «Стратегию развития цветной металлургии России на 2014-2020 гг. и на перспективу до 2030 г.» (приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г.).

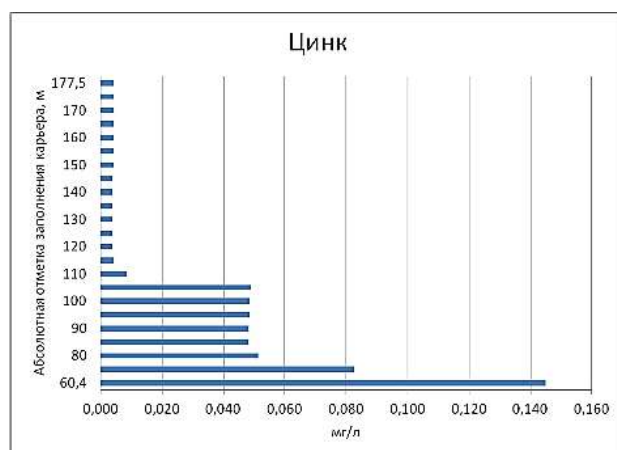
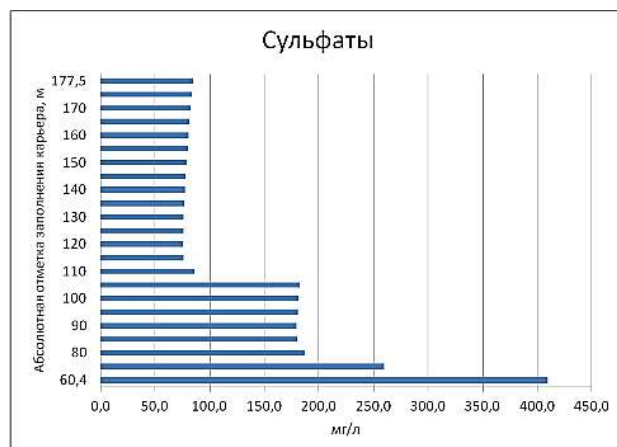
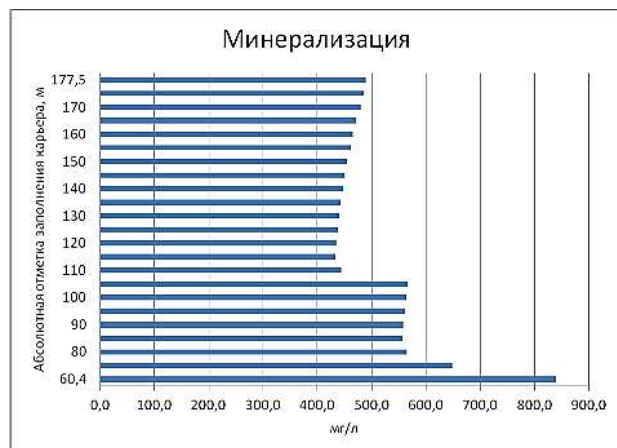


Рис. 1. Прогноз качества воды в карьере медноколчеданного месторождения
Fig. 1. Forecast of water quality in the quarry of the copper-sulphide deposit

Для отработки Томинского медного месторождения создано АО «Томинский ГОК», которое начало горные работы в 2017 г. Проектная производственная мощность ГОКа по сырой руде – 45 млн т [13].

К наиболее значимым достоинствам проекта освоения Томинского месторождения можно отнести возможность производства из хвостов обогащения закладочного материала, используемого для заполнения карьерной выемки Коркинского угольного разреза с целью его ликвидации [14]. Закладочный материал является продуктом, получаемым при сгущении хвостов обогатительной фабрики, и изготавливается по технологическому регламенту, утвержденному в установленном порядке, с соблюдением установленных санитарных норм и правил.

Закладочный материал представляет собой однородную суспензию. В зависимости от содержания влаги в продукте консистенция может незначительно варьироваться. По органолептическим, физико-химическим и водно-физическим показателям закладочный материал имеет характеристики, приведённые в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики закладочного материала
Table 1. Characteristics of the stowage material

Наименование показателя	Нормативное значение показателя
Внешний вид	Однородная масса текучепластичной консистенции
Цвет	Серый различных оттенков
Массовая доля влаги, %	45±1
Напряжение сдвига, Па	20 – 50
Кинематическая вязкость, мм ² /с	<800
Водоотдача, %	<24
Показатель pH	9,5±1,5
Абразивность	Малоабразивные, класс абразивности (по Л.И. Барону и А.В. Кузнецову) не выше II
Крупность частиц, мм	<0,5
Класс опасности	5

Физико-механические свойства техногенно-минеральных образований изучались с учетом процессов, которые возможны при размещении закладочного материала в разрезе: консолидация, испарение, промерзание. Выявлено, что основной процесс потери свободной воды в закладочном материале в процессе рекультивации происходит в результате консолидации под давлением. Значительное изменение фильтрационных свойств происходило в диапазоне нагрузок до 0,15 МПа. При промерзании потеря воды составила 2% в течение суток, до 15% в течение трех месяцев. Выявленные фильтрационные характеристики позволяют рассматривать данные техноген-

но-минеральные образования как противофильтрационные экраны, что является благоприятным фактором ликвидации горных выработок и последующей рекультивации [6].

Применение закладочного материала осуществляется в соответствии с ФЗ «Об охране окружающей среды», ГОСТ Р 59057-2020 и с «Руководством по использованию комплекса техногенных мероприятий для профилактики и тушения пожаров на разрезах».

Заполнение закладочным материалом выработанного пространства разреза позволило ликвидировать эндогенные пожары, снизило риск оползневых явлений, сократило размеры карьерной выемки по глубине [14]. Схема заполнения закладочным материалом выработанного пространства Коркинского угольного разреза приведена на **рис. 2**.

Для транспортирования закладочного материала построены пульпопровод, две аварийные емкости, три стационарные пульпонасосные станции, трубопровод оборотной воды для возврата на Томинский ГОК, а также водосборные каналы.

Минеральный состав закладочного материала определен методом рентгеноспектрального микроанализа (Демина Л.А, УГГУ) и представлен в отн. %: пирит – менее 1, карбонат – 3, рутил – 1, клинохор – 20, альбит – 32, биотит – 3, кварц – 40. Превышений содержаний загрязняющих химических компонентов в составе закладочного материала над установленными нормативами не зафиксировано.

Жидкая фаза закладочного материала имеет сульфатно-гидрокарбонатный и гидрокарбонатно-сульфатный кальциево-натриевый состав, пресная при величине сухого остатка 0,42–0,46 г/л, нейтральная при pH 7,28–8,20. За 2023 г. содержания марганца, кремния, алюминия, меди, цинка, свинца, кадмия,

ртути, мышьяка и нефтепродуктов в жидкой фазе закладочного материала не зафиксировано [4].

По данным мониторинга подземных вод в районе Коркинского разреза, тип воды соответствует карьерным водам, изученным до заполнения разреза закладочным материалом. Мониторинг в разрезе выполняется за составом и уровнем воды в нем и в наблюдательных скважинах, процессами на бортах и уступах разреза. Режимные наблюдения сопровождаются прогнозными расчетами с применением превентивных мер, то есть происходит управление процессом рекультивации.

Закключение

Опыт комплексного проектирования необходимо расширять, особенно в таких регионах, как Урал, где более 300 лет формируются нарушенные земли, появляются технологии, позволяющие отрабатывать малоперспективные месторождения в прошлом или техногенные месторождения.

Для реализации таких проектов необходимо задействовать научно-исследовательские и проектно-изыскательские работы с привлечением ведущих научных и проектных институтов в области горного дела, геомеханики, гидрогеологии и экологии.

Совместное использование техногенных ресурсов при отработке различных видов минерального сырья, в частности, связанное с заполнением отработанного пространства угольного разреза «Коркинский» закладочным материалом на основе хвостов обогатительной фабрики АО «Томинский ГОК», является уникальным и крупнейшим экологическим проектом России по устранению накопленного ранее экологического вреда.

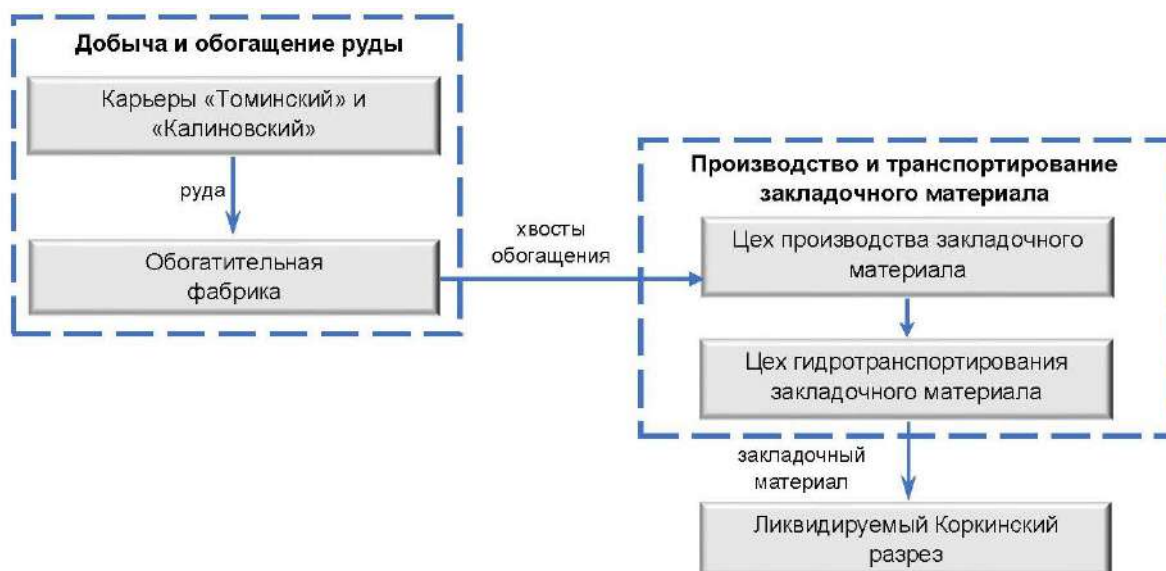


Рис. 2. Ресурсно-технологическая схема ликвидации Коркинского угольного разреза

Fig. 2. Resource and technological scheme of the Korkinsky open-pit coal mine liquidation

Список источников

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2023. 686 с.
2. Бабенко Д.А. Обеспечение экологической безопасности хранения отходов обогащения медных руд: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2021. 116 с.
3. Кокоев В.Т. Эколого-экономические аспекты природопользования при добыче руд в техногенных экосистемах высокогорья // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2020. Т. 10. № 11А. С. 220-229. DOI: 10.34670/AR.2020.34.75.022
4. Гончар Н.В., Соколовский А.В., Терешина М.А. Проект комплексного освоения георесурсов // Рациональное освоение недр. 2023. № 3. С. 38–44.
5. Роль техногенных минеральных образований при рекультивации нарушенных земель в Уральском регионе / Гуман О.М., Антонова И.А., Макаров А.Б., Гончар Н.В. // Инженерно-экологические изыскания – нормативно-правовая база, современные методы и оборудование: материалы Общероссийской научно-практической конференции, г. Москва, 22 сентября 2023 г. М., 2023. С. 75-83.
6. Гуман О.М. Эколого-геологические условия полигонов твердых бытовых и промышленных отходов Среднего Урала: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук: 25.00.36. Екатеринбург, 2009. 42 с.
7. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Принципы обоснования параметров устойчивого и экологически сбалансированного освоения месторождений твердых полезных ископаемых // Условия устойчивого функционирования минерально-сырьевого комплекса России. 2014. Вып. 2. № 12. С. 3–10.
8. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. Т. 3. Прикладные исследования. Кн. 1. М.: Изд-во МГТУ, 1998. С. 29-103.
9. Опыт освоения месторождений медно-порфирового типа на Урале / А.В. Сизиков, Ю.А. Король и др. // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 641-648.
10. Формирование гидрогеологических условий Челябинского угольного бассейна на постэксплуатационном этапе / Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Смирнов А.Ю., Галицкая И.В., Батрак Г.И., Лысенко О.В. Пономарев В.С. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2023. № 2. С. 3–18.
11. Эколого-геологические условия и мониторинг окружающей среды полигонов твердых бытовых отходов Среднего Урала / Гуман О.М., Грязнов О.Н., Антонова И.А., Макаров А.Б., Захаров А.В. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. 237 с.
12. Оптимизация техногенно-минеральных образований при разработке медно-порфировых руд Томинского рудного поля Урала / Гончар Н.В., Гу-

ман О.М., Косинова И. И., Бударина В.А. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2024. № 1. С. 89–101.

13. Томинский горно-обогатительный комбинат – одно из современных производств России / Улановский В.М., Гончар Н.В., Мананов Р.Ш., Соколовский А.В., Кузьмин К.Б., Петров А.М. // Горная промышленность. 2023. № 4. С. 42-45.
14. Соколовский А.В., Гончар Н.В. Оценка направлений использования техногенных ресурсов при отработке различных видов минерального сырья // Горная промышленность. 2023. №5. С. 124-129.

References

1. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2022. State report. Moscow: Ministry of Natural Resources and Environment of Russia, Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 2023. 686 p. (In Russ.)
2. Babenko D.A. *Obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti hraneniya othodov obogashcheniya mednyh rud: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Ensuring environmental safety of storage of copper ore enrichment waste. PhD dissertation]. Saint Petersburg, 2021. 116 p.
3. Kokoev V.T. Ecological and economic aspects of environmental management during ore mining in technogenic ecosystems of the highlands. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: yesterday, today, tomorrow], 2020;10(11A):220-229. (In Russ.) DOI: 10.34670/AR.2020.34.75.022.
4. Gonchar N.V., Sokolovsky A.V., Tereshina M.A. Project for the integrated development of georesources. *Racionalnoe osvoenie nedr* [Rational development of mineral resources], 2023;(3):38-44. (In Russ.)
5. Guman O.M., Antonova I.A., Makarov A.B., Gonchar N.V. The role of technogenic mineral formations in the reclamation of disturbed lands in the Ural region. *Inzhenerno-ekologicheskie izyskaniya – normativno-pravovaya baza, sovremennye metody i oborudovanie: materialy Obshcherossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Engineering and environmental research - legal framework, modern methods and equipment: materials of the All-Russian scientific and practical conference], Moscow, September 22, 2023 pp. 75-83. (In Russ.)
6. Guman O.M. *Ekologo-geologicheskie usloviya polygonov tverdyh bytovykh i promyshlennykh othodov Srednego Urala: avtoref. dis. ... dokt. geol.-min. nauk* [Ecological and geological conditions of landfills for solid household and industrial waste in the Middle Urals. Extended abstract of Doctoral dissertation]. Ekaterinburg, 2009, 42 p. (In Russ.)
7. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. Principles of substantiation of the parameters of sustainable and ecologically balanced development of solid mineral deposits. *Usloviya ustojchivogo funkcionirovaniya mineralno-syrevoogo kompleksa*

- Rossii* [Conditions of sustainable functioning of mineral resource complex of Russia], 2014;2(12):3-10. (In Russ.)
8. Mironenko V.A., Rumynin V.G. *Problemy gidrogeoeologii. T. 3. Prikladnye issledovaniya. Kn. 1.* [Problems of hydrogeoeology. Volume 3. Applied Research (Book 1)]. Moscow: Publishing house of Moscow State University for Humanities, 1998, pp. 29-103. (In Russ.)
 9. Sizikov A.V., Korol Yu.A. et al. Experience in the development of porphyry copper deposits in the Urals. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], 2017;228:641-648. (In Russ.)
 10. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Smirnov A.Yu., Galitskaya I.V., Batrak G.I., Lysenko O.V., Ponomarev V.S. Formation of hydrogeological conditions of the Chelyabinsk coal basin at the post-operation stage. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya* [Geoeology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology], 2023;(2):3-18. (In Russ.)
 11. Guman O.M., Gryaznov O.N., Antonova I.A., Makarov A.B., Zakharov A.V. *Ekologo-geologicheskie usloviya i monitoring okruzhayushchej sredy poligonov tverdyh bytovykh othodov Srednego Urala* [Ecological and geological conditions and environmental monitoring of solid waste landfills in the Middle Urals]. Ekaterinburg: LLC UIPTs, 2013, 237 p. (In Russ.)
 12. Gonchar N.V., Guman O.M., Kosinova I.I., Budarina V.A. Optimization of technogenic-mineral formations in the development of porphyry copper ores of the Tominsk ore field in the Urals. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* [Bulletin of Voronezh State University. Series: Geology], 2024;(1):89-101. (In Russ.)
 13. Ulanovsky V.M., Gonchar N.V., Mananov R.Sh., Sokolovsky A.V., Kuzmin K.B., Petrov A.M. Tominsky mining and processing plant is one of the most modern industries in Russia. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2023;(4):42-45. (In Russ.)
 14. Sokolovsky A.V., Gonchar N.V. Assessment of directions for the use of technogenic resources in the development of various types of mineral raw materials. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2023;(5):124-129. (In Russ.)

Поступила 10.06.2024; принята к публикации 01.07.2024; опубликована 24.12.2024

Submitted 10/06/2024; revised 01/07/2024; published 24/12/2024

Гончар Наталия Валерьевна – кандидат технических наук, вице-президент по экологической и промышленной безопасности, АО «Русская медная компания», Екатеринбург, Россия.
ORCID 0009-0002-0180-9592

Гуман Ольга Михайловна – доктор геолого-минералогических наук, директор, ООО «Уралгеопроект», Екатеринбург, Россия.

Пикалов Вячеслав Анатольевич – доктор технических наук, начальник отдела, ООО «Научно-технический центр „Геотехнология”», Челябинск, Россия.
Email: pikalov@ustup.ru. ORCID 0009-0003-9251-5190

Терешина Мария Александровна – кандидат экономических наук, первый заместитель генерального директора, ООО «Научно-технический центр „Геотехнология”», Челябинск, Россия.

Natalya V. Gonchar – PhD (Eng.), Vice President for Environmental and Industrial Safety, JSC Russian Copper Company, Yekaterinburg, Russia.
ORCID 0009-0002-0180-9592

Olga M. Guman – DrSc (Eng.), Director, LLC Uralgeoproekt, Yekaterinburg, Russia.

Vyacheslav A. Pikalov – DrSc (Eng.), Head of Department, LLC Scientific and Technical Center Geotechnology, Chelyabinsk, Russia.
Email: pikalov@ustup.ru ORCID 0009-0003-9251-5190

Maria A. Tereshina – PhD (Eng.), First Deputy General Director, LLC Scientific and Technical Center Geotechnology, Chelyabinsk, Russia.

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

УДК 622.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-30-43



О ВЛИЯНИИ ГРАНУЛОМЕТРИИ ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В РАБОЧЕМ ОБОРУДОВАНИИ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

Великанов В.С.^{1,2}, Чернухин С.А.^{1,2}, Тельминов Н.С.¹, Дремин А.В.³,
Ломовцева Н.В.⁴, Ситдикова С.В.²

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

³ООО «ДАВТЕХ», Екатеринбург, Россия

⁴Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Известно, что гранулометрический состав горных пород используется на горнодобывающих предприятиях в качестве одного из основных показателей для оценки эффективности взрывных работ. Контролируя процесс взрывных работ и генерируя оптимальное распределение по размерам кусков в развале, возможно частично оптимизировать экономические показатели горнодобывающего предприятия. В работе решается задача по установлению степени влияния гранулометрического состава взорванной горной массы при отработке месторождений открытым способом на распределение напряжений в рабочем оборудовании карьерного экскаватора. **Цель работы.** Анализ простоев парка карьерных экскаваторов на горнодобывающих предприятиях Уральского федерального округа выявил, что значительная доля простоев обусловлена выходом из строя металлоконструкций. Основное влияние на появление и развитие трещин в металлоконструкциях оказывают циклические нагрузки, возникающие при экскавации неоднородной взорванной горной массы. Изучение возможностей контроля гранулометрического состава взорванной горной массы позволит определить параметры буровзрывных работ, требующие корректировки для повышения эффективности при взрыве следующего блока. **Используемые методы.** При решении поставленных задач использовался комплексный подход, включающий системный научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований. Для оценки напряженно-деформированного состояния элементов несущих металлоконструкций карьерных экскаваторов применялся метод конечных элементов. **Новизна.** Использование современных цифровых технологий на базе машинного обучения для определения гранулометрического состава взорванной горной массы позволяют выявить зависимость влияния однородности грансостава в забое на износ рабочего органа экскаватора. **Результат.** Используя в качестве аппаратно-программного сопровождения экспериментальных исследований отечественное оборудование компании «Давтех», определены параметры кусковатости взорванной горной массы. Установлено влияние направления внешней нагрузки и показателей кусковатости развала на напряженно-деформированное состояние ковша карьерного экскаватора. **Практическая значимость.** Полученные в ходе исследования данные позволят разработать рекомендации по оптимизации режимов управления карьерным экскаватором, что в итоге позволит снизить количество отказов рабочего оборудования и увеличит его ресурс.

Ключевые слова: экскаватор, полезное ископаемое, рабочее оборудование, ковш, распределение напряжений

© Великанов В.С., Чернухин С.А., Тельминов Н.С., Дремин А.В., Ломовцева Н.В., Ситдикова С.В., 2024

Для цитирования

О влиянии гранулометрии взорванной горной массы на распределение напряжений в рабочем оборудовании карьерного экскаватора / Великанов В.С., Чернухин С.А., Тельминов Н.С., Дремин А.В., Ломовцева Н.В., Ситдикова С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 30-43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-30-43>



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

ON THE INFLUENCE OF THE GRANULOMETRY OF BLASTED ROCK MASS ON THE STRESS DISTRIBUTION IN THE WORKING EQUIPMENT OF A QUARRY EXCAVATOR

Velikanov V.S.^{1,2}, Chernukhin S.A.^{1,2}, Telminov N. S.¹, Dremin A.V.³, Lomovtseva N.V.⁴, Sitdikova S.V.²

¹Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

²Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

³LLC DAVTECH, Yekaterinburg, Russia

⁴Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The granulometric composition of rock is used at mining enterprises as one of the main indicators for assessing the efficiency of blasting operations. By controlling the blasting process and generating an optimal size distribution of fragments in the muck pile, it is possible to partially optimize the economic performance of the mining enterprise. This study addresses the task of determining the extent to which the granulometric composition of blasted rock mass during open-pit mining influences the stress distribution in the working equipment of a quarry excavator. **Objectives.** An analysis of the downtime of quarry excavator fleets at mining enterprises in the Ural Federal District revealed that a significant portion of downtime is due to the failure of metal structures. The primary influence on the appearance and development of cracks in metal structures is exerted by cyclic loads that arise during the excavation of heterogeneous blasted rock mass. Studying the possibilities of controlling the granulometric composition of blasted rock mass will allow the determination of drilling and blasting parameters that require adjustment to enhance the efficiency of blasting the next block. **Methods Applied.** To address the tasks set, a comprehensive approach was used, including a systematic scientific analysis and synthesis of previously published research. The finite element method was applied to assess the stress-strain state of the load-bearing metal structures of quarry excavators. **Originality.** The use of modern digital technologies based on machine learning to determine the granulometric composition of blasted rock mass allows for identifying influence dependency between the homogeneity of the granulometric composition in the muck pile and the wear of the excavator's working tool. **Result.** Using domestic equipment from the company Davtech for the hardware and software support of experimental research, the parameters of the granulometric composition of the blasted rock mass were determined. The influence of the direction of the external load and the indicators of the granulometric composition of the muck pile on the stress-strain state of the quarry excavator dipper was established. **Practical Relevance.** The data obtained in the course of the research will enable the development of recommendations for optimizing the operating modes of the quarry excavator, which will ultimately reduce the number of equipment failures and increase its lifespan.

Keywords: excavator, mineral, working equipment, shovel dipper, stress distribution

For citation

Velikanov V.S., Chernukhin S.A., Telminov N.S., Dremin A.V., Lomovtseva N.V., Sitdikova S.V. On the Influence of the Granulometry of Blasted Rock Mass on the Stress Distribution in the Working Equipment of a Quarry Excavator. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 30-43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-30-43>

Введение

Анализ мирового рынка выявил тенденцию постоянного увеличения потребления основных видов твердых полезных ископаемых. На разных этапах развития мировой промышленности, сопровождаемых как экономическим подъемом, так и спадом, отмечались колебания спроса на минеральные ресурсы. Суммарный объем его потребления за последние полвека растёт, данный рост обусловлен увеличением численности населения и неуклонным ростом промышленного производства. Добыча твердых полезных ископаемых открытым способом на протяжении всей истории горных разработок является самым значимым и масштабным направлением. Согласно исследованиям [1, 2], на открытые горные работы (ОГР) приходится порядка 73%

добываемых твердых полезных ископаемых в мире. В США этот показатель превышает 80%, а в Российской Федерации и странах СНГ – около 70%. Устойчивое увеличение объемов открытых горных работ сопровождается углублением карьеров, ростом коэффициента вскрыши и зачастую снижением содержания полезных компонентов в руде.

На данном этапе экономического развития нашей страны существует зависимость от объемов добычи и экспорта минерально-сырьевой базы, в частности таких ресурсов, как уголь, металлические руды (железная руда, медь и др.), то есть полезные ископаемые первой группы. Полезные ископаемые первой группы обладают достаточной сырьевой базой для удовлетворения внутренних потребностей и потенциального экспорта при различных сценариях экономического

развития. Аналитические отчеты и данные Федеральной службы государственной статистики показывают, что объемы добычи угля в РФ стабильно увеличивались с 2014 по 2019 годы. В 2020 году произошло снижение на 9,6% по сравнению с предыдущим годом, до 361,8 млн т, при этом валовая добыча (включая пустую породу) составила 402,1 млн т. В настоящее время в России эксплуатируются 108 угольных шахт и 224 разреза, при этом доля открытых работ выросла с 68 до 79%. Однако половина коксующегося угля (42,3 млн т в 2020 году) добывается подземным способом, часто в сложных горно-геологических условиях. Представленные результаты динамики объемов добычи угля отражены на **рис. 1, а**.

Одну из лидирующих позиций наша страна занимает по объему добываемого железнорудного сырья. Прирост производительности этого направления за последние годы составил порядка 15%. Одна пятая доля из 46 месторождений расположена в Уральском федеральном округе (**рис. 1, б**) [1, 2].

Еще одним стратегически важным направлением в горнодобывающей отрасли является добыча медной руды. Заметный рост объемов добычи в этом направлении с 2018 года позволяет России находиться в десятке крупнейших производителей медной рудничной продукции. Такое увеличение объемов добычи

связано с появлением новых разрабатываемых месторождений и выходом их на номинальную мощность. На 2020 год насчитывалось порядка 48 месторождений, 40 из которых существенно медных и 8 комплексных медесодержащих. Согласно исследованиям [2], объем производства медной руды составил 924,1 тыс. т (**рис. 1, в**).

Увеличение объемов добычи твердых полезных ископаемых стимулирует рост спроса на горнодобывающую технику. Ежегодное увеличение объемов выпуска горнодобывающей техники составляет от 8 до 10%. Основной номенклатурой российских производителей, занимающихся производством горных машин, являются карьерные экскаваторы, порядка 70% от общего объема [3].

На данный момент на открытых горных выработках России и стран СНГ эксплуатируется более 490 единиц карьерных мехлопат и гидравлических экскаваторов. Актуальность исследовательских задач, решаемых в данной работе, обусловлена тем, что отечественный и мировой опыт работы карьерного выемочно-погрузочного оборудования показывает, что при разработке крепких скальных пород в сложных забоях наиболее эффективными являются карьерные мехлопаты [4].

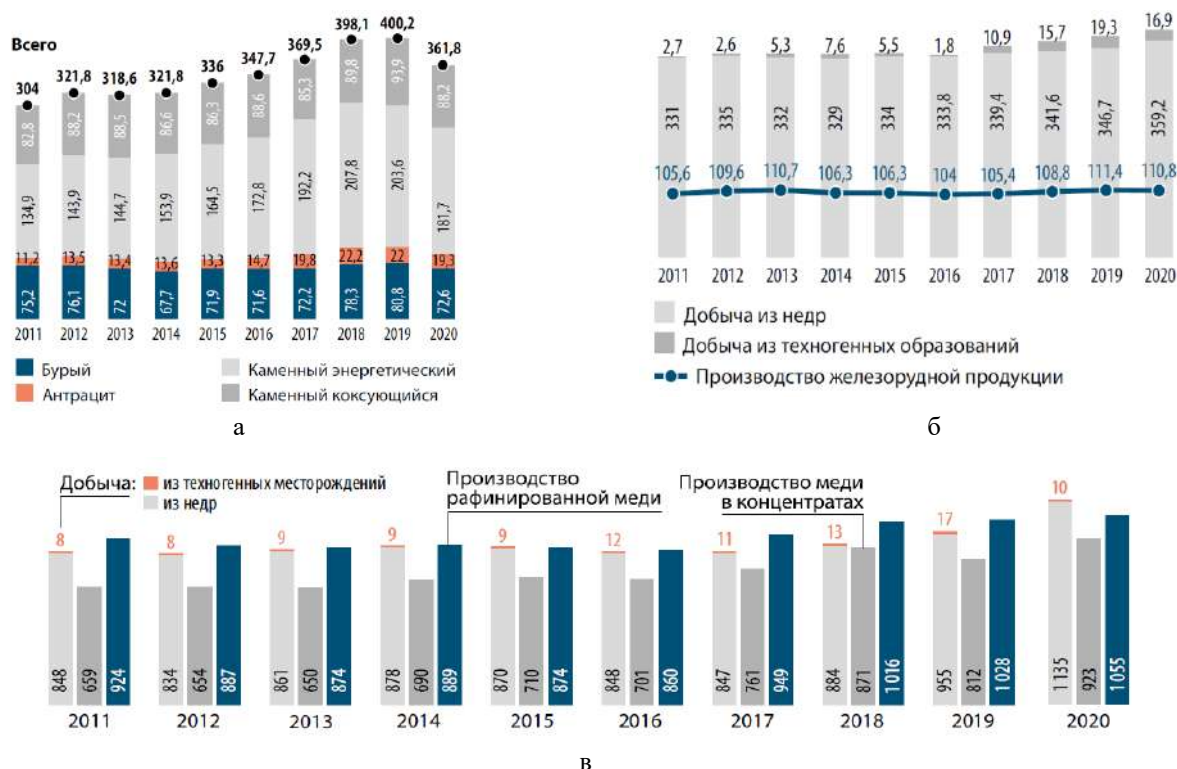


Рис. 1. Динамика добычи угля и металлических руд в 2011–2020 годах: а – объем добычи углей, млн т; б – объем добычи железных руд и производства железнорудной продукции, млн т; в – динамика добычи меди, производства меди в концентрате и рафинированной меди (включая вторичный металл), тыс. т
 Fig. 1. Dynamics of coal and metal ore extraction from 2011 to 2020: а is coal extraction volume, million tons; б is iron ore extraction volume and iron ore product output, million tons; в is dynamics of copper extraction, copper concentrate production, and refined copper (including secondary metal) production, thousand tons

Буровзрывные работы (БВР) представляют собой критически важный этап в процессе горного производства. Их проведение на карьерах направлено на разрушение и дробление горной массы до нужного размера фракций. Качество выполнения БВР оказывает значительное влияние на последующие операции, такие как экскавация, транспортировка и обогащение полезных ископаемых, которые являются наиболее энергоемкими в горно-обогатительном производстве. В настоящее время затраты на отбойку горной массы для горнодобывающих предприятий России варьируются от 20 до 35%, в зависимости от твердости горных пород. При этом каждое предприятие устанавливает свои требования к гранулометрическому составу взорванной горной массы (ВГМ) и размеру негабарита. На эти параметры влияют различные факторы, включая тип используемого на карьере выемочно-погрузочного оборудования (геометрическая емкость ковша), наличие дополнительного оборудования для вторичного дробления, а также физико-механические свойства полезного ископаемого и другие параметры.

Научные исследования [5] показывают, что производительность драглайна в значительной мере зависит от гранулометрического состава породы в забое. Установлено, что при увеличении доли фракций 0–200 мм в два раза производительность драглайна возрастает в три раза. В то же время при увеличении доли фракций 401–800 мм производительность экскаватора снижается в 5 раз, а при увеличении объема фракции 301–400 мм во ВГМ в 1,4 раза производительность драглайна падает в три раза. Эти зависимости также актуальны для подземной добычи полезных ископаемых. В частности, исследования [6] показали, что выход негабаритов существенно влияет на производительность погрузочно-доставочных машин.

С увеличением объемов взрывных работ часто наблюдается рост выхода крупных негабаритных фракций. Согласно проведенным исследованиям [4] 13-ти экскаваторов (ЭКГ-10 и ЭКГ-8) в условиях карьера ПАО «Ураласбест» за период с января 2019 по февраль 2021 года, выявлена пропорциональная зависимость количества отказов в карьерах экскаваторов от доли негабарита во взорванной горной массе (рис. 2). Это может быть связано с ухудшением горно-геологических условий по мере увеличения глубины разработки, неправильно подобранными параметрами буровзрывных работ, что обусловлено стремлением

сократить производственные затраты, и другими факторами. Такое явление ведет к неконтролируемому росту дополнительных расходов на вспомогательные операции, что в итоге отрицательно сказывается на экономической эффективности горнодобывающего предприятия [1, 7]. Согласно данным, полученным эмпирическим путем, ведущими организациями, специализирующимися на буровзрывной деятельности, наиболее важным показателем качества БВР является объем выхода негабарита, который не должен превышать 3% от общего объема взорванной горной массы. К факторам, влияющим на качество БВР, относят плотность применяемого взрывчатого вещества (ВВ), диаметр, глубину и сетку скважин, выбирающихся в зависимости от физико-технических характеристик взрывающейся породы.

Анализ литературных источников

Проведенный анализ научных исследовательских направлений по методам оценки распределения гранулометрического состава ВГМ показал значительное увеличение числа публикаций за последние десять лет. Ведущими странами по количеству опубликованных работ являются Китай, США и несколько западноевропейских стран. Технология оптического анализа крупности фрагментированных пород широко используется уже на протяжении многих лет (Franklin et. al, 1996). Система анализа изображений WipFrag была изначально разработана для оценки фрагментации взорванной породы с использованием переносной камеры и инструментов ручного анализа (Maerz et. al, 1987; Maerz et. al, 1996; Maerz, 1998). Так, в работе Bahrami et al. (2011) для разработки модели фрагментации горных пород использованы 220 наборов данных, собранных на действующих железных рудниках. В рамках исследования выбраны основные параметры: сетка скважин, линия наименьшего сопротивления, диаметр скважины, глубина скважины, длина забойки, удельный объем бурения, показатель взрываемости, вес заряда на интервал замедления, класс SMR, плотность и удельный расход ВВ [6]. В модели реализован алгоритм обратного распространения ошибки, как наиболее эффективный метод обучения многослойной сети с тремя или более слоями (входной, скрытый и выходной).

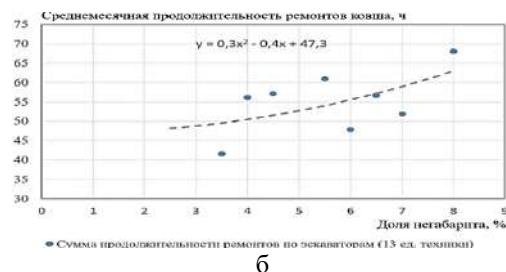
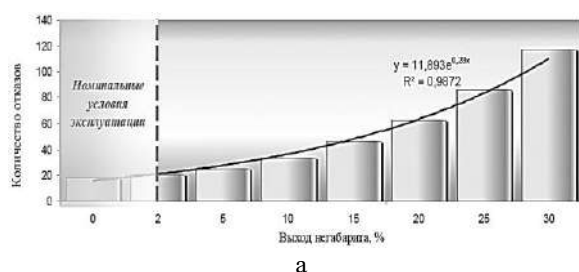


Рис. 2. Влияние выхода негабарита: а – на количество отказов экскаватора; б – на продолжительность ремонтов ковша
Fig. 2. The impact of oversized fragments: a is on the number of excavator failures, б is on the duration of shovel dipper repairs

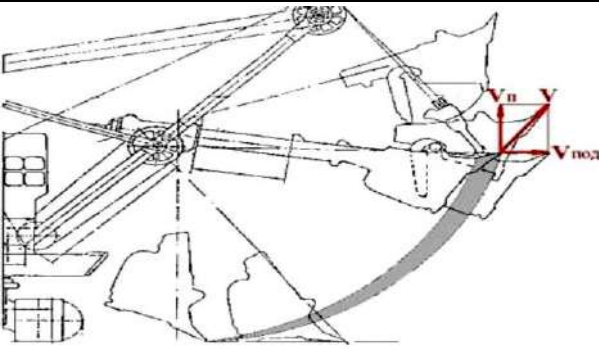
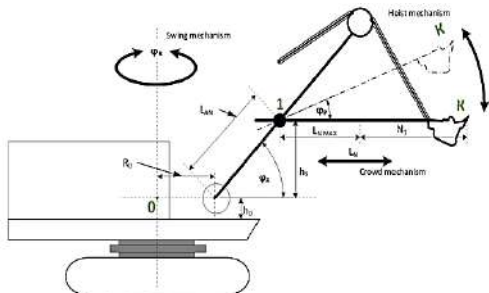
В статье Kulatilake et al. (2012) собраны результаты для 109 комплексов взрывных работ из различных карьеров и разработана прогнозная модель фрагментации с применением нейронной сети на базе многомерного регрессионного анализа. В исследованиях Sayadi et al. (2013) выполнено сравнительное исследование производительности нейронных сетей для прогнозирования фрагментации горных пород при взрывных работах на известняковых рудниках. При этом применены нейронная сеть с обратным распространением ошибки и нейронная сеть радиально-базисных функций. В работе Enayatollahi et al. (2014) изучены 70 схем взрывных работ, полученных на железных рудниках. В рамках исследования оценивались прогнозные модели, разработанные двумя способами: с использованием многомерного регрессионного анализа и искусственной нейронной сети. В работе Dhekne et al. (2014) в целом рассмотрены и описаны случаи успешного применения методов на базе машинного обучения для прогнозирования фрагментации горных пород на горнодобывающих предприятиях. В публикации определены ключевые элементы ИНС и очерчен широкий спектр их применения в горнодобывающей промышленности. В заключении описан ряд недостатков при разработке прогнозных моделей.

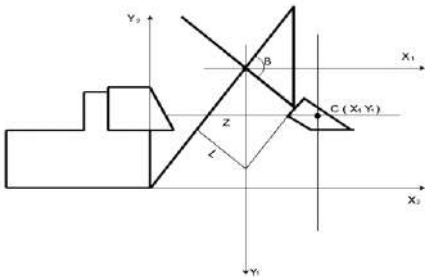
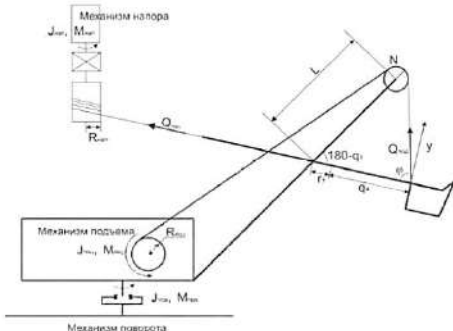
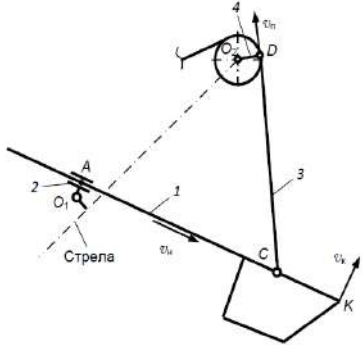
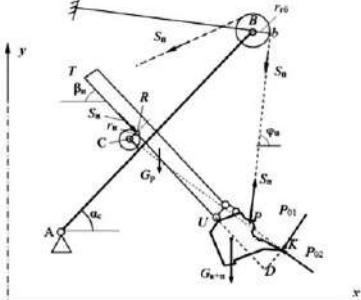
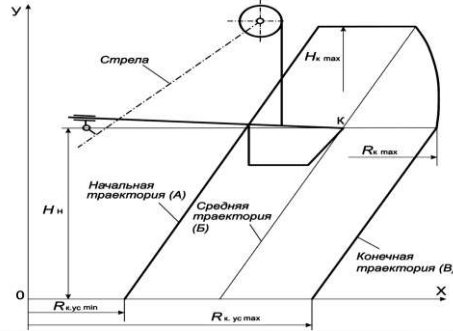
В работе Murlidhar et al. (2018) описана новая гибридная модель прогнозирования фрагментации горных пород на известняковом карьере. В рамках ис-

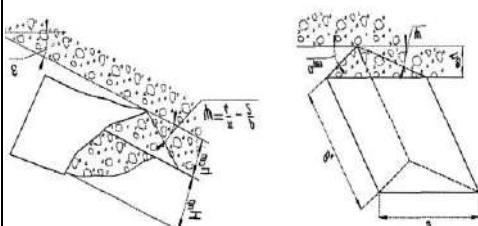
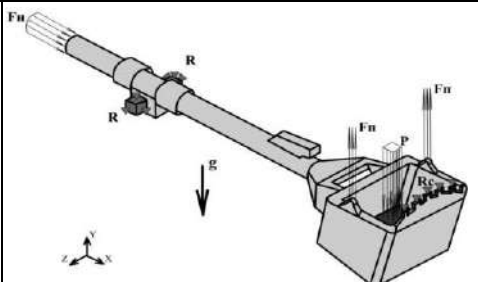
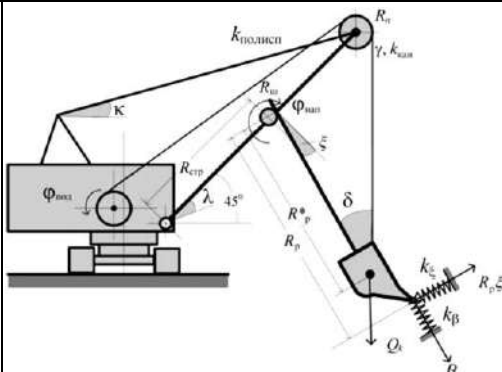
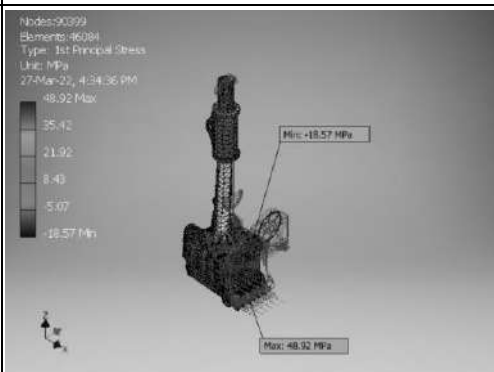
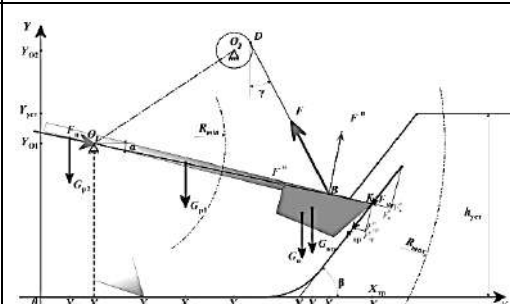
следования методом сравнения полученных результатов оценивалось влияние разработанного алгоритма на эффективность применения ИНС. В работе Dimitraki et al. (2019) на карьерах по добыче нерудных материалов в Греции успешно реализован другой подход к прогнозированию средней крупности фрагментации взорванной породы. В данном исследовании прогнозирование с помощью ИНС применено для оценки влияния на фрагментацию отдельных особенностей организации взрывных работ и инженерно-геологических характеристик. В исследовании Xie et al. (2021) объединены различные методы машинного обучения, включая ИНС, для оптимизации и повышения эффективности взрывных работ с использованием мягких вычислительных прогнозных моделей. Также оценено влияние входных параметров на точность прогнозной модели. Для разработки гибридных моделей использованы 136 наборов данных, собранных во время взрывных работ на известняковом руднике во Вьетнаме.

Вообще говоря, вопросам влияния характеристик взорванной горной массы на рабочее оборудование карьерных экскаваторов посвящено достаточно много научно-исследовательских работ, понятно, что охарактеризовать весь пласт таких работ в рамках данной публикации не представляется возможным. В табл. 1 приведены лишь отдельные современные публикации, касаемые данного вопроса.

Таблица 1. Краткий обзор исследовательских работ
Table 1. Brief overview of research works

№ п/п	Исследование	Авторы, проводившие исследование
1		Хромой М.Р., Свиначук В.П., Свиначук П.В. [8]
2		Tytiuk V., Khandakji K, Sivyakova G. и др. [9]

№ п/п	Исследование	Авторы, проводившие исследование
3		Волкова Е.А. [5]
4		Певзнер Л.Д., Бабаков С.Е. [10]
5		Комиссаров А.П. и др. [11]
6		Шестаков В.С. и др. [12]
7		Лукашук О.А., Летнев К.Ю. [13]

№ п/п	Исследование	Авторы, проводившие исследование
8		Сайтов В.И., Андреева Л.И., Красникова Т.И. [14]
9		Болотнев А.Ю., Унагаев Е.И., Авдеев А.Н. [15]
10		Кузнецов В.Ф., Плеханов Ю.В. [16]
11		До Дык Чонг [17]
12		Шешукова Е. И. и др. [18]

Полученные результаты и их обсуждение

Очевиден и тот факт, что в тяжёлых условиях эксплуатации, а именно высокая степень неоднородности, плотность добываемых пород составляет 2,48–2,78 т/м³, коэффициент крепости по шкале М.М. Протодьяконова 15–17, повышенная абразивность 66–90 мг, происходят необратимые процессы в металлоконструкциях рабочего оборудования карьерного экскаватора, приводящие к стремительному нарастанию потока отказов. Обработанная статистическая информация [4] количества отказов карьерного оборудования в период с 2011 по 2015 годы показана на рис. 3. Причём, несмотря на тяжёлые условия экскавации, целевой функцией, характеризующей эффективность использования экскаватора во времени, остаётся высокая производительность, а целевой показателем – длительность одного полного цикла экскавации составляет не более 30 с.

В процессе работы карьерного экскаватора непосредственный контакт с горной массой в забое осуществляет рабочий орган (ковш). Таким образом,

особенности взаимодействия ковша с породой и granulometricheskii состав развала определяют схему работы и характер рабочего процесса. В научно-технической литературе подробно рассматриваются конструкции ковшей, применяемых на экскаваторах, которые отличаются большим разнообразием в зависимости от назначения, способов изготовления и разгрузки. Ковши прямых лопат, в зависимости от типа соединения с рукоятью, делятся на две категории: с шарнирным и жестким соединением. Большинство карьерных экскаваторов используют ковши с шарнирным соединением. В случае жесткого соединения концевая отливка рукояти служит задней стенкой ковша. Классификация типов ковшей с емкостью более 4 м³ осуществляется согласно ОСТ 24.072.06–80.

Основными параметрами, влияющими на образование трещин в металлоконструкциях рабочего органа, является возникновение резких перегрузок вследствие столкновения ковша с негабаритами, с массивом горных пород, с невзорванными естественными отдельностями и при аварийном падении ковша (рис. 4, табл. 2).

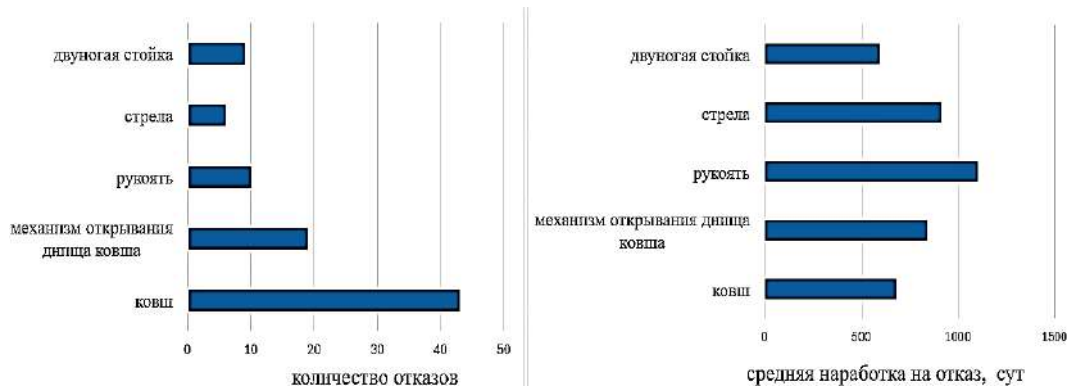


Рис. 3. Анализ показателей надёжности рабочего оборудования по парку карьерных экскаваторов
Fig. 3. Analysis of reliability indicators of the working equipment across the quarry excavator fleet

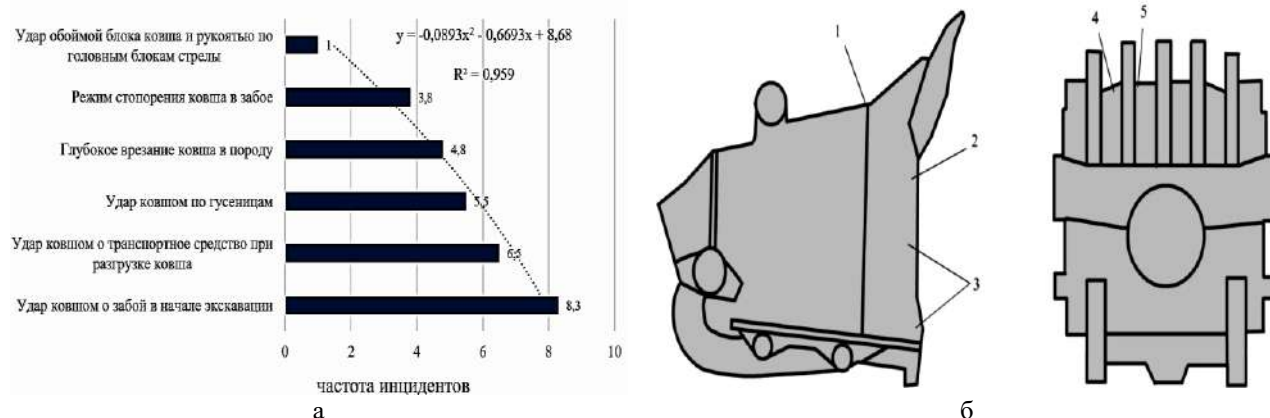


Рис. 4. Спектр относительных частот возможных инцидентов рабочего оборудования (ковш) (а) и места разрушения корпуса ковша экскаватора (б): 1 – зона соединения передней и боковых стенок ковша; 2, 3 – передние стенки ковша; 4, 5 – крепления зубьев ковша

Fig. 4. Spectrum of relative frequencies of potential incidents involving the working equipment (shovel dipper) (a); locations of shovel dipper body failures on the excavator (б): 1 is junction area of the front and side walls of the shovel dipper; 2, 3 are front wall of the shovel dipper; 4, 5 are tooth attachments on the dipper

Таблица 2. Возможные варианты дефектов и неправильных ремонтных воздействий на элементы рабочего оборудования

Table 2. Possible defects and incorrect repair actions on components of the working equipment

Пример верного технического обслуживания и эксплуатации узлов экскаватора		Нарушения условий технического обслуживания и эксплуатации	
	соединение коромысла ковш шплинтовое соединение + кольцо		неправильное соединение коромысла ковш
	соединение серьга ковш шплинт+ втулка		неправильное соединение шплинт на сварке
	соединение салазка с днищем ковша, шплинтовое соединение + кольцо		неправильное соединение салазка с днищем ковша на сварке
	цепь открывание днище ковша, исправна		неисправна, износ звена цепи

Для оценки воздействия качества подготовки за-
боя на эксплуатационные показатели и техническое
состояние металлоконструкций экскаваторов на од-
ном из горнодобывающих предприятий был проведён
производственный эксперимент. В рамках этого экс-
перимента определялись параметры кусковатости
взорванной горной массы и осуществлялся контроль
за появлением трещин в металлоконструкциях. В ка-
честве аппаратно-программного сопровождения экс-
периментальных исследований использовано отече-
ственное оборудование компании «Давтех», разрабо-
танное в рамках программы импортозамещения вы-
сокотехнологичного оборудования. В программно-
аппаратном комплексе реализован следующий спо-
соб, защищенный патентом определения грануломет-
рического состава [19], который заключается в том,
что: посредством стереоскопической камеры получа-
ют стереоизображение развала горной породы; на
основе полученного стереоизображения развала стро-
ят объемный рельеф поверхности развала, представ-
ляющий собой набор дальностей от матрицы стерео-

скопической камеры до поверхности выбранных
участков развала горной породы и соответствующих
им координат на изображении (рис. 5) [19].

Метод конечных элементов является одним из
наиболее эффективных инструментов для анализа
напряженно-деформированного состояния элементов
металлоконструкций. С его помощью можно быстро
и точно оценить прочность и долговечность кон-
струкций, что особенно важно для карьерных экска-
ваторов, работающих в тяжелых горно-геологических
условиях. Преимуществом метода конечных элемен-
тов является возможность учитывать различные фак-
торы, влияющие на работу конструкции, такие как
геометрия, материалы, внешние нагрузки и условия
эксплуатации. Кроме того, метод конечных элемен-
тов обладает высокой точностью и надежностью ре-
зультатов. При правильном подходе к моделирова-
нию и анализу можно получить детальную картину
напряженно-деформированного состояния конструк-
ции и предсказать возможные проблемы до их воз-
никновения [20].

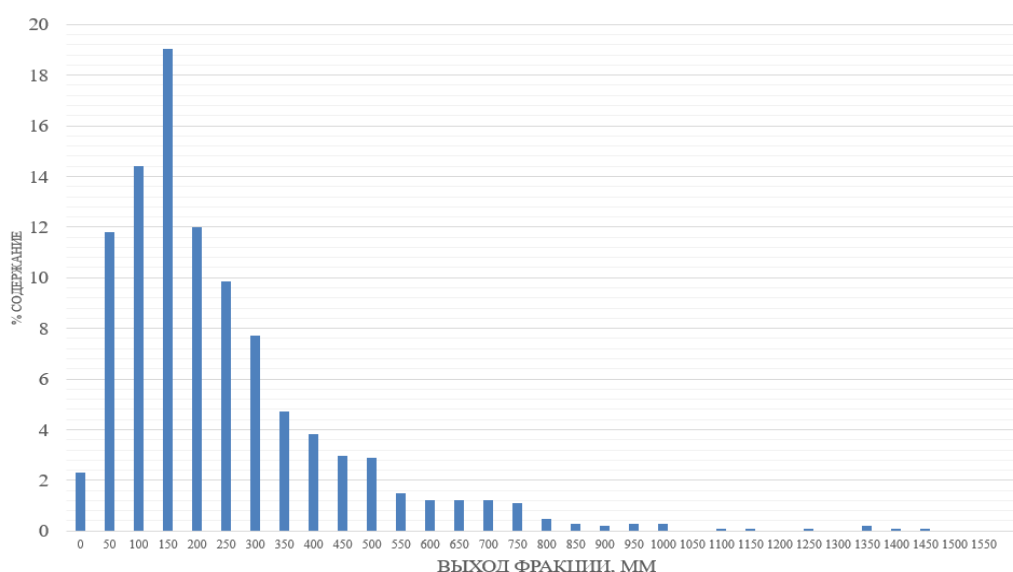
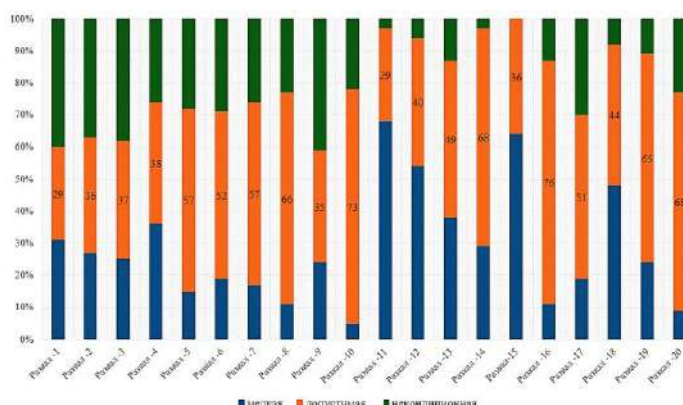
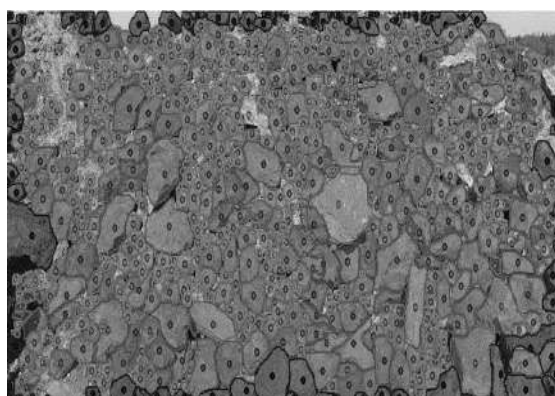


Рис. 5. Результаты производственного эксперимента на горнодобывающем предприятии УрФО
Fig. 5. Results of the production experiment at the mining enterprise of the Ural Federal District

Согласно полученным результатам настоящего исследования ЭКГ-10 (табл. 3), можно выявить зависимость влияния гранулометрического состава в забое на вид изнашивания ковша экскаватора (воздействие на определенный участок). Таким образом, при работе с крупнокусковыми скальными породами основное воздействие породы приходится на нижнюю часть ковша и зубьев, а при мелкокусковой породе изнашивание равномерно распределяется как на нижнюю, так и верхнюю часть. Это обстоятельство играет важную роль в выборе технологического решения по повышению износостойкости ковшей карьерных экскаваторов.

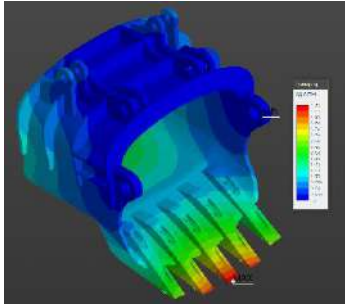
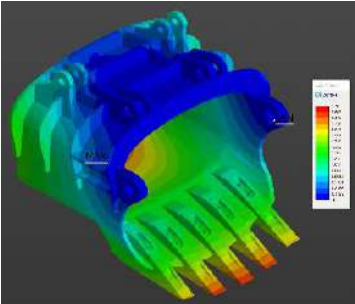
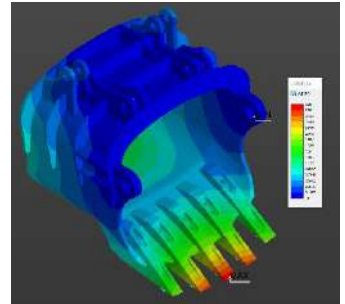
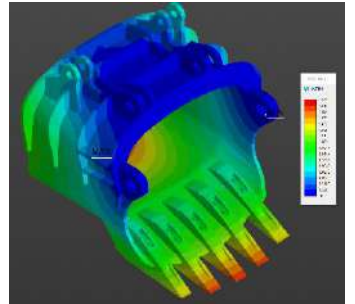
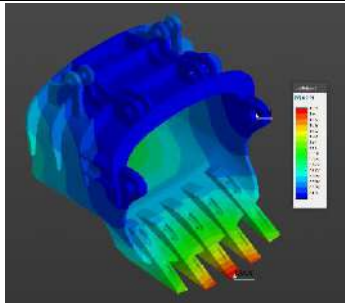
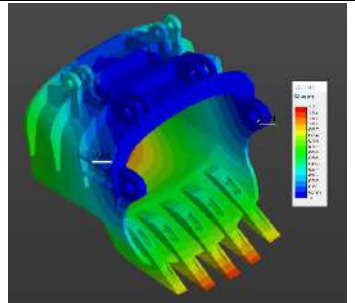
Закключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено и доказано, что гранулометрический состав горных пород – это один из основных

показателей, оказывающих прямое влияние на затраты на буровзрывные работы, а также на экономику последующих операций.

Комплексные исследования по установлению фактического распределения размеров кусков в развале с использованием инновационного отечественного оборудования, при условии обеспечения качества дробления взорванной горной массы в забое, определяемого содержанием негабаритного куска не более 3%, позволит разработать рекомендации по рациональным режимам управления карьерным экскаватором с целью минимизации внезапных отказов рабочего оборудования ЭКГ и разработку обновленной структуры ремонтного цикла, а также уменьшения продолжительности и стоимости ремонтных воздействий по парку карьерных экскаваторов, связанных с показателями гранулометрического состава взорванной горной массы в забое.

Таблица 3. Зависимость напряженно-деформированного состояния рабочего органа ЭКГ-10 при динамических нагрузках от грансостава в забое
Table 3. Dependence of the stress-strain state of the working tool of EKG-10 under dynamic loads on the granulometric composition in the pit

Медианный размер породы, мм	Фазы цикла черпания	
	Внедрение ковша в породу	Финальная фаза
200		
130		
95		

Список источников

- Дремин А.В., Великанов В.С. К вопросу о гранулометрическом составе взорванных скальных пород // Горная промышленность. 2023. № 4. С. 73–78. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-73-78>. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/18133-k-voprosu-o-granulometricheskom-sostave-vzorvannykh-skalnykh-porod>.
- Государственный доклад от 22.12.2021, Минприроды РФ «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году». Москва, 2021. 572 с.
- Великанов В.С. Научные основы системы снижения рисков отказов при управлении карьерным экскаватором: специальность 05.05.06 «Горные машины»: дис. ... д-ра техн. наук / Великанов Владимир Семенович; Уральский государственный горный университет. Екатеринбург, 2020. 292 с.
- Иванова П.В. Выявление закономерностей изменения наработки карьерного электрического экскаватора большой единичной мощности с учетом воздействия факторов природно-техногенного характера: специальность 05.05.06 «Горные машины»: дис. ... канд. техн. наук / Иванова Полина Викторовна, 2019. СПб., 134 с. EDN JBMAON.
- Волкова Е.А. Повышение эффективности функционирования одноковшовых экскаваторов за счет улучшения эксплуатационных характеристик: специальность 05.05.06 «Горные машины»: дис. ... канд. техн. наук / Волкова Евгения Алексеевна. Екатеринбург, 2022. 131 с. EDN NRPQMC.
- Рожков А.А. Исследование параметров технологии взрывной отбойки при подземной добыче гранулированного кварца: специальность 25.00.22 «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)»: дис. ... канд. техн. наук / Рожков Артём Андреевич. Екатеринбург, 2019. 138 с. EDN EEQTWS.

7. Галушко Ф.И., Комягин А.О., Мусатов И.Н. Управление качеством взрывной подготовки горной массы на основе оптимизации параметров БВР // Горная промышленность. 2017. №5 (135). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-kachestvom-vzryvnoy-podgotovki-gornoj-massy-na-osnove-optimizatsii-parametrov-bvr> (дата обращения: 17.06.2024).
8. Хромой М.Р., Свиначук В.П., Свиначук П.В. Изнашивание вооружения ковша карьерного одноковшового экскаватора // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2010. № 8. С. 106-113. EDN LOXOJO.
9. Determining the parameters of the trajectory of the bucket of mining quarries excavators / Tytiuk V., Khandakji K., Sivyakova G., Karabut N., Chornyi O., Busher V. // E3S Web of Conferences. 2021, 280, 05013. 10.1051/e3sconf/202128005013.
10. Певзнер Л.Д., Бабаков С.Е. Математическая модель динамики карьерного экскаватора как объекта управления // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 12. С. 249-252. EDN RMSLHJ.
11. Оценка степени противодействия двигателей приводов главных механизмов карьерного экскаватора / А.П. Комиссаров, О.А. Маслеников, Р.Ш. Набиуллин, С.А. Хорошавин // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 6(164). С. 10-16. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-10-16. EDN NIDNFT.
12. Безкорвайный П.Г., Шестаков В.С., Извеков К.А. Оптимизация рабочего оборудования карьерного экскаватора // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XX международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 07-08 апреля 2022 года. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2022. С. 222-225. EDN EPKEQI
13. Лукашук О.А., Летнев К.Ю. Определение энергозатрат при экскавации грунта // ГИАБ. 2018. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-energoztrat-pri-ekskavatsii-grunta> (дата обращения: 18.06.2024).
14. Саитов В.И., Андреева Л.И., Красникова Т.И. Влияние грансостава забоя на количество отказов механизма напора экскаватора циклического действия // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2. С. 234. EDN OXCNGV.
15. Болотнев А.Ю., Унагаев Е.И., Авдеев А.Н. Исследование распределения напряжений в рабочих узлах карьерного экскаватора ЭКГ-12,5 // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 12(59). С. 92-95. EDN NCDFJI.
16. Кузнецов В.Ф., Плеханов Ю.В. Математическая модель взаимодействия рабочего оборудования экскаватора-мехлопаты с забоем // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 1. С. 12-14. EDN JWWQGP.
17. До Д. Ч. Оценка нагруженности основных металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10, работающих на угольных разрезах Вьетнама : специальность 05.05.06 «Горные машины» : дис. ... канд. техн. наук / До Дык Чонг. СПб., 2022. 104 с. EDN CFBWTA.
18. Эффективность функционирования карьерного экскаватора как эргатической системы / Д.А. Шибанов, С.Л. Иванов, Е.И. Шешукова, Е.С. Недашкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 11-1. С. 144-158. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_144. EDN ATIRKG.
19. Дремин А. В., Марков Ю. В. Способ определения гранулометрического состава развала горной массы: пат. 2807542 РФ: МПК G01N 33/24, E21C 41/26. № 2023113622; заявл. 25.05.2023; опубл. 16.11.2023; бюл. № 32.
20. Чепурненко А.С., Тюрина В. С. Применение метода конечных элементов в сочетании с методом контактного слоя для определения напряженно-деформированного состояния многослойных балок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2023. № 4. С. 130-139. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.13

References

1. Dremine A.V., Velikanov V.S. On the granulometric composition of blasted rock formations. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2023;(4):73-78. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-73-78>. Available at: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/18133-k-voprosu-o-granulometricheskom-sostave-vzorvannykh-skalnykh-porod>.
2. On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2020. State report. Moscow: Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, 2021. 572 p.
3. Velikanov V.S. *Nauchnye osnovy sistemy snizheniya riskov otkazov pri upravlenii karernym ekskavatorom: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Scientific foundations of risk reduction system for failures management of quarry excavator. Doctoral dissertation]. Yekaterinburg, 2020, 292 p.
4. Ivanova P.V. *Vyyavlenie zakonmernostej izmeneniya narabotki karernogo elektricheskogo ekskavatora bolshoj edinichnoj moshchnosti s uchetom vozdeystviya faktorov prirodno-tekhnogennogo haraktera: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Identification of patterns of wear of large-capacity quarry electric excavator, taking into account the influence of natural and man-made factors. Ph.D. dissertation]. St. Petersburg, 2019, 134 p. EDN JBMAOH.
5. Volkova E.A. *Povyshenie effektivnosti funkcionirovaniya odnokovshovykh ekskavatorov za schet*

- uluchsheniya ekspluatatsionnykh harakteristik: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the efficiency of single-bucket excavators through improved operational characteristics. Ph.D. dissertation]. Yekaterinburg, 2022, 131 p. EDN NRPQMC.
6. Rozhkov A.A. *Issledovanie parametrov tekhnologii vzryvnoy otbojki pri podzemnoy dobyche granulirovannogo kvarca: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Study of parameters of explosive breaking technology in underground mining of granulated quartz. Ph.D. dissertation]. Yekaterinburg, 2019, 138 p. EDN EEQTWS.
 7. Galushko F.I., Komyagin A.O., Musatov I.N. Quality management of explosive preparation of rock mass based on optimization of BVR parameters. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2017;(5(135)). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-kachestvom-vzryvnoy-podgotovki-gornoy-massy-na-osnove-optimizatsii-parametrov-bvr> (Accessed June 17, 2024). (In Russ.)
 8. Khromoy M.R., Svinarchuk V.P., Svinarchuk P.V. Wear of bucket armament of quarry single-bucket excavator. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universitet*. [Scientific Bulletin of Moscow State Mining University], 2010;(8):106-113. (In Russ.) EDN LOXOJO.
 9. Tytiuk V., Khandakji K., Sivyakova G., Karabut N., Chorny O., Busher V. Determining the parameters of the trajectory of the bucket of mining quarries excavators. *E3S Web of Conferences*. 2021;280(05013). DOI: 10.1051/e3sconf/202128005013.
 10. Pevzner L.D., Babakov S.E. Mathematical model of the dynamics of a quarry excavator as an object of management. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining Information-Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2013;(12):249-252. (In Russ.) EDN RMSLHJ.
 11. Komissarov A.P., Maslenikov O.A., Nabiullin R.Sh., Khoroshavin S.A. Assessment of the degree of resistance of drives of main mechanisms of quarry excavator. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics]. 2022;(6(164)):10-16. (In Russ.) DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-10-16. EDN NIDNFT.
 12. Bezkorovainy P.G., Shestakov V.S., Izvekov K.A. Optimization of quarry excavator working equipment. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promyshlennosti : sbornik trudov XX mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Chteniya pamyati V.R. Kubacheka", provedennoj v ramkah Uralskoj gornopromyshlennoj dekady* [Technological equipment for mining and oil and gas industry: proceedings of the XX International Scientific and Technical Conference "Readings in memory of V.R. Kubacheka", held within the framework of the Ural Mining Decade], Yekaterinburg, April 07-08, 2022. Yekaterinburg: Ural State Mining University, 2022, pp. 222-225. (In Russ.) EDN EPKEQI.
 13. Lukashuk O.A., Letnev K.Yu. Determination of energy consumption during excavation. *GIAB* [Mining information and analytical bulletin]. 2018;(6). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-energozatrata-pri-ekskavatsii-grunta> (Accessed June 18, 2024).
 14. Saitov V.I., Andreeva L.I., Krasnikova T.I. Influence of the borehole granulometric composition on the number of failures of the actuator mechanism of cyclic excavator. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2012;(2):234. (In Russ.) EDN OXCNGV.
 15. Bolotnev A.Yu., Unagaev E.I., Avdeev A.N. Investigation of stress distribution in working units of EKG-12.5 quarry excavator. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2011;(12(59)):92-95. (In Russ.) EDN NCDFJI.
 16. Kuznetsov V.F., Plekhanov Yu.V. A mathematical model of the interaction of the working equipment of a mechanical shovel excavator with a face borehole. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics], 2009;(1):12-14. (In Russ.) EDN JWVQGP.
 17. Do D.Ch. *Ocenka nagruzhennosti osnovnykh metallokonstrukcij ekskavatorov EKG-10, rabotayushchih na ugolnykh razrezakh Vietnama: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Evaluation of the load on the main metal structures of EKG-10 excavators operating in coal mines in Vietnam. Ph.D. dissertation]. St. Petersburg, 2022, 104 p. EDN CFBWTA.
 18. Shibakov D.A., Ivanov S.L., Sheshukova E.I., Nedashkowskaya E.S. Efficiency of quarry excavator operation as an ergatic system. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining Information-Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2023;(11-1):144-158. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_144. EDN ATIRKG.
 19. Dremine A.V., Markov Yu.V. *Sposob opredeleniya granulometricheskogo sostava razvala gornoj massy* [Method for determining the granulometric composition of rock mass fragmentation]. Patent RF, no. 2807542, 2023.
 20. Chepurnenko A.S., Tyurina V.S. Application of the finite element method in combination with the contact layer method for determining the stress-strain state of multilayer beams. *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin]. 2023;(4):130-139. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.13

Поступила 19.06.2024; принята к публикации 23.09.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 19/06/2024; revised 23/09/2024; published 24/12/2024

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург;
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: rizhik_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

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

Тельминов Никита Станиславович – студент бакалавриата,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: Nikita.Telminov@urfu.me

Дремин Александр Владимирович – генеральный директор,
ООО «ДАВТЕХ», Екатеринбург, Россия.
Email: info@davtech.ru

Ломовцева Наталья Викторовна – кандидат педагогических наук, доцент,
проректор по образовательной деятельности и цифровизации,
Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: lomovtseva-nv@urgau.ru, ORCID 0000-0002-9350-3066

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

Vladimir S. Velikanov – DrSc (Eng.), Professor,
Ural State Mining University, Yekaterinburg,
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: rizhik_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

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

Nikita S. Telminov – Bachelor's Student,
Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: Nikita.Telminov@urfu.me

Alexander V. Dremin – General Director,
DAVTECH LLC, Yekaterinburg, Russia.
Email: info@davtech.ru

Natalia V. Lomovtseva – PhD (Pedagogy), Associate Professor,
Vice-Rector for Educational Activities and Digitalization,
Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia.
Email: lomovtseva-nv@urgau.ru. ORCID 0000-0002-9350-3066

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

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

УДК 622.735

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-44-49



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕАГЕНТОВ-ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ПОМОЛА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ

Гришин И.А.¹, Дегодя Е.Ю.¹, Гмызина Н.В.¹, Кутлубаев И.М.¹, Зотеев О.В.²

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

²Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В статье представлены результаты лабораторных исследований по повышению измельчаемости золотосодержащей руды, рекомендованные для внедрения. Рассмотрен один из наиболее эффективных методов повышения измельчаемости – реагентная обработка. Достижимый эффект при применении интенсификаторов помола объясняется снижением налипания мелких частиц на более крупные и эффектом Ребиндера. Объектом исследования являлась технологическая проба упорной золотосодержащей руды кварц-пиритового типа. **Цель работы.** Проведение технологических исследований для повышения производительности отделения измельчения золотоизвлекательной фабрики с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами, что объясняет выбор авторов в пользу реагентной обработки. **Используемые методы.** Пробоподготовка, заключающаяся в доведении представительной пробы до машинного класса крупности, пригодного для лабораторной мельницы –2+0 мм, ее усреднении, разделении на навески, определение вещественного состава пробы. Элементный и фазовый состав определяли химическим и рентгенофазовыми методами. Комплекс методик по изучению физико-механических свойств проб с определением измельчаемости и удельной поверхности. **Результат.** Проведено три серии опытов для подбора времени измельчения и влияния реагентов на измельчаемость. Определено оптимальное время измельчения пробы в лабораторной мельнице без добавления реагентов. В качестве наиболее эффективного для данного материала по результатам предварительных исследований выбраны реагенты известь, Antiprex D и DP-OMC 1127. Выявлено влияние расхода реагентов-интенсификаторов помола на содержание расчетного класса крупности –74 мкм в измельченном продукте. Установлена возможность повысить измельчаемость руды при применении интенсификатора помола Antiprex D совместно с добавлением извести. По результатам эксперимента принято решение отказаться от применения реагента DP-OMC 1127. Оптимальный реагентный режим при измельчении руды позволит повысить удельную производительность мельниц, установленных на фабрике, в 1,12 раза, общую производительность действующей фабрики возможно увеличить на 42 тыс. т в год.

Ключевые слова: измельчаемость, золотосодержащая руда, поверхностно-активные вещества, интенсификаторы помола, расчетный класс крупности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект №FRZU-2023–0008).

© Гришин И.А., Дегодя Е.Ю., Гмызина Н.В., Кутлубаев И.М., Зотеев О.В., 2024

Для цитирования

Исследование влияния реагентов-интенсификаторов помола на результаты измельчения золотосодержащей руды / Гришин И.А., Дегодя Е.Ю., Гмызина Н.В., Кутлубаев И.М., Зотеев О.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 44-49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-44-49>



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

STUDY OF THE INFLUENCE OF GRINDING INTENSIFIER REAGENTS ON THE RESULTS OF GRINDING GOLD ORE

Grishin I.A.¹, Degodya E.Yu.¹, Gmyzina N.V.¹, Kutlubaev I.M.¹, Zoteev O.V.²¹Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia²Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The article presents the results of laboratory researches on increase the grindability of gold ore recommended for implementation. One of the most effective methods for increasing grindability such as reagent treatment is considered. The effect achieved when using grinding intensifiers is explained by a decrease in the adhesion of small particles to larger ones and the Reh binder effect. The object of the research was a technological sample of refractory gold-bearing ore of the quartz-pyrite type. **Objectives.** It's required to conduct technological research to increase the productivity of the grinding department of the gold recovery plant with minimal capital and operating costs, which explains the authors' choice in favor of reagent treatment. **Methods Applied.** Sample preparation, which consists in bringing a representative sample to a machine size class suitable for a laboratory mill -2 + 0 mm, averaging it, dividing it into samples, determining the material composition of the sample was used. The elemental and phase composition were determined by chemical and X-ray phase methods. A set of techniques for studying the physical and mechanical properties of samples with determination of the shreddability and specific surface area was applied. **Result.** Three sets of experiments were conducted to select the grinding time and the effect of reagents on grindability. The optimal time for grinding a sample in a laboratory mill without adding reagents was determined. Based on the results of preliminary studies, lime, Antiprex D and DP-OMC 1127 reagents were selected as the most effective for this material. The effect of reagent consumption of grinding intensifiers on the content of the estimated size of -74 microns class in the ground product was revealed. The possibility of increasing the grindability of ore using the Antiprex D grinding intensifier together with the addition of lime was established. Based on the experiment results, a decision was made to abandon the use of DP-OMC 1127 reagent. The optimal reagent mode for ore grinding will increase the specific productivity of the mills installed at the plant by 1.12 times, the total productivity of the existing plant can be increased by 42 thousand tons per year.

Keywords: grindability, gold ore, surfactants, grinding intensifiers, calculated size class

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project FRZU-2023-0008).

For citation

Grishin I.A., Degodya E.Yu., Gmyzina N.V., Kutlubaev I.M., Zoteev O.V. Study of the Influence of Grinding Intensifier Reagents on the Results of Grinding Gold Ore. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 44-49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-44-49>

Введение

В процессах обогащения минерального сырья около 70% энергии расходуется на дробление и измельчение руды. Расход электроэнергии на процесс измельчения до крупности 0,05-0,1 мм в зависимости от типа руд составляет от 20 до 80 кВт·ч/т [1, 2].

В то же время увеличение тонины помола обусловлено как вовлечением в переработку более сложных руд с минеральными комплексами, имеющими тонкое взаимопрорастание составляющих их минералов, так и необходимостью переработки техногенного, уже подвергнувшегося процессам уменьшения крупности сырья.

Одним из направлений повышения эффективности работы измельчительного оборудования является применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) [3]. Этот способ интенсификации помола не требует значительных капитальных затрат в условиях действующего производства и наиболее прост с точки зрения аппаратного оформления.

Эффект от измельчения сырья в присутствии ПАВ может заключаться в увеличении производительности мельниц при сохранении прежней тонины помола, уменьшении удельных расходов электроэнергии, шаров и футеровки. Иногда основную цель метода усматривают в увеличении количества извлеченного ценного компонента за счёт избирательности вскрытия минералов при неизменных затратах [4].

Механизм действия интенсификаторов помола основан на адсорбции молекул ПАВ на поверхности частиц, что позволяет:

- снять электростатические заряды с поверхности частиц, что предотвращает агрегирование мелких частиц (coating), устраняет проблему налипания материала на шары и футеровку мельниц;
- понизить твердость измельчаемых продуктов (эффект П.А. Ребиндера), тем самым снизить энергозатраты на помол;

• изменить коэффициент сцепления (трения) между мелющими телами, бронефутеровкой и материалом, тем самым повысить силу удара и истирающего воздействия;

• повысить скорость продвижения материала по мельнице и циркуляцию в поперечном сечении [5].

Одной из главных особенностей эффекта Ребиндера является его избирательность. Она состоит в том, что требуемое изменение свойств твердого тела может обеспечить только родственное данному телу поверхностно-активное вещество [6, 7].

В работе использовались широкоизвестные интенсификаторы помола: известь, Antiprex D и DP-OMC 1127.

Целью работы было проведение технологических исследований для повышения производительности отделения измельчения золотоизвлекательной фабрики с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлась проба золотосодержащей руды с массовой долей золота 2,2 г/т. Особенностью технологических испытаний являлось требование применения шаровых мельниц, так как такой тип мельниц установлен на действующей фабрике.

Лабораторные исследования включали следующие этапы:

1. Пробоподготовка по ОСТ 41-08-249-85. 9 и определение вещественного состава проб. Элементный и фазовый состав определяли химическим и рентгенофазовым методами с использованием рентгеновского дифрактометра X'Pert PRO PANalytical.

2. Изучение физико-механических свойств проб в соответствии с государственными стандартами: влажность, гигроскопическая влажность по ГОСТ 5180-2015; истинная и насыпная плотность руды по ГОСТ 8269.0-97 и ГОСТ 5180-2015; гранулометрический состав с промывкой водой по ГОСТ 12536-2014.

3. Изучение измельчаемости руды. Исходная проба массой 25 кг высушивалась при нормальных условиях до постоянной массы, затем дробилась на лабораторных щековой и валковой дробилках до крупности -2+0 мм и измельчалась в лабораторной шаровой мельнице с объемом 1,1 дм³. Условия измельчения: степень заполнения мельницы – 40%, масса навески – 352 г, соотношение масс твердое : жидкое : шары – 1 : 0,5 : 6.

Полученные результаты и их обсуждение

По результатам минеральных анализов на трех пробах руды основным порообразующим компонентом является кварц. Полевых шпатов на порядок меньше. Главными рудными минералами являются пирит и блеклая руда, представленная теннантитом. В таблице представлен минеральный состав пробы руды.

После измельчения часть навески в виде пульпы отбиралась для дубликата, оставшаяся часть подвер-

галась ситовому анализу по классу -74 мкм мокрым способом.

Было проведено три серии опытов: подбор времени измельчения, изучение влияния расхода реагента Antiprex D на измельчаемость пробы руды, влияние расхода реагента Antiprex D с добавкой реагента DP-OMC 1127 на измельчаемость пробы руды.

Таблица. Минеральный состав руды
Table. Mineral composition of ore

Минералы, группы минералов	2016 г
	Массовая доля, %
Кварц	61,9
Слюдистые (серицит, браммалит, мусковит)	16,4
Глинисто-гидрослюдистые (пирофиллит, иллит, гидробраммалит, гидросерицит)	
Полевые шпаты (плагиоклаз, КППШ)	7,4
Карбонаты (кальцит, доломит, сидерит)	1,0
Пирит	9,1
Халькопирит	Редкие зерна
Арсенопирит	0,1
Сфалерит, пирротин, антимонит	Редкие зерна
Блеклая руда	1,2
Оксиды, гидроксиды железа	2,0
Окисленные минералы меди, куприт	Редкие зерна
Сульфосоли серебра, теллуриды золота и серебра	Единичные знаки
Акцессорные минералы: рутил, ильменит, касситерит, гранат, циркон, магнетит, алтаит, барит	0,3
Итого:	100,0

Первая серия опытов проводилась с целью установления времени измельчения руды до 70-80 % класса крупности -74 мкм, что объясняется степенью раскрытия минеральных сростков. Серия проводилась без добавления реагентов. Гранулометрический состав исходной руды приведен на **рис. 1**, а результаты исследований по изучению времени измельчения представлены на **рис. 2**.

Как видно из графика на **рис. 2**, массовая доля класса крупности -74 мкм в исходной пробе составляет 4,7%. Оптимальное время измельчения при заданных условиях составляет 25 мин. При этом времени массовая доля класса -74 мкм составляет 72,4%. В дальнейших опытах время измельчения не изменялось и составляло 25 мин.

Вторая серия опытов проводилась при оптимальном и постоянном расходе извести 5 кг/т руды и с изменяющимся от 0 до 1000 г/т расходом реагента Antiprex D. Реагенты добавлялись непосредственно в мельницу перед измельчением. Результаты второй серии опытов представлены на **рис. 3**.

Анализ результатов показывает, что массовая доля класса крупности -74 мкм в измельченном продукте при добавлении извести возрастает до 74%. Добавление реагента Antiprex D в количестве 100 г/т повышает это значение до 80,43%. Дальнейшее увеличение расхода Antiprex D эффекта не оказывает и наблюдается постепенное снижение доли класса -74 мкм до 75,2%.

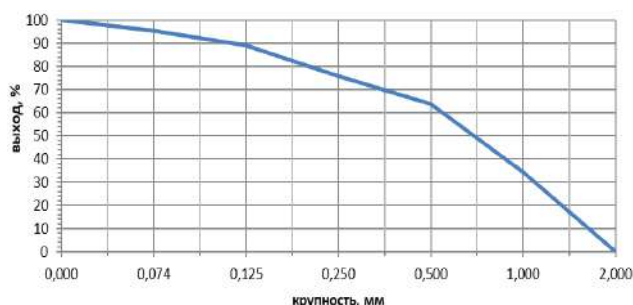


Рис. 1. Результаты гранулометрического состава пробы исходной руды

Fig. 1. Results of the particle size distribution of the original ore sample

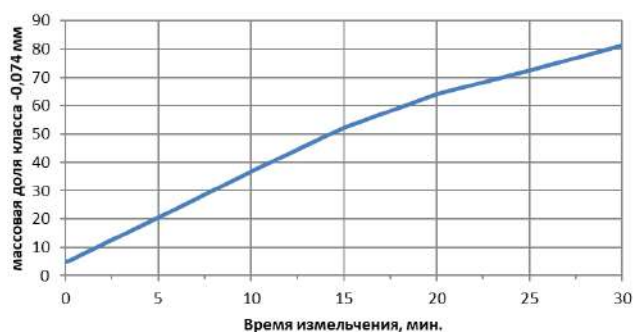


Рис. 2. Влияние времени измельчения на массовую долю класса -74 мкм

Fig. 2. Effect of grinding time on the mass fraction of the -74 microns class

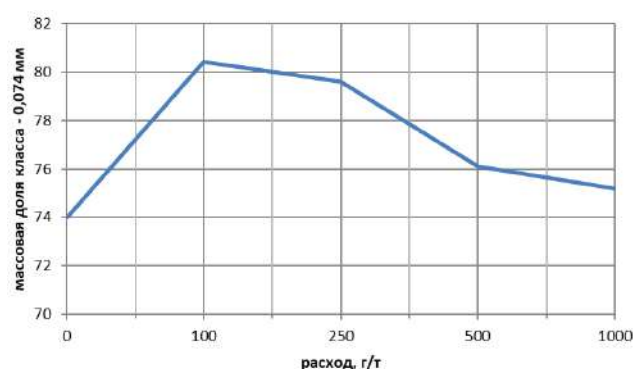


Рис. 3. Влияние расхода Antiprex D на массовую долю класса -74 мкм в измельченном продукте

Fig. 3. The effect of Antiprex D consumption on the mass fraction of the -74 microns class in the crushed product

Третья серия опытов имела целью установить влияние расхода реагента Antiprex D на измельчаемость при постоянных расходах извести и реагента DP-ОМС 1127. При этом расход извести поддерживался на уровне 5 кг/т, расход DP-ОМС 1127 составлял 50 г/т. Расход Antiprex D изменялся от 0 до 1000 г/т. Результаты исследований приведены на рис. 4.

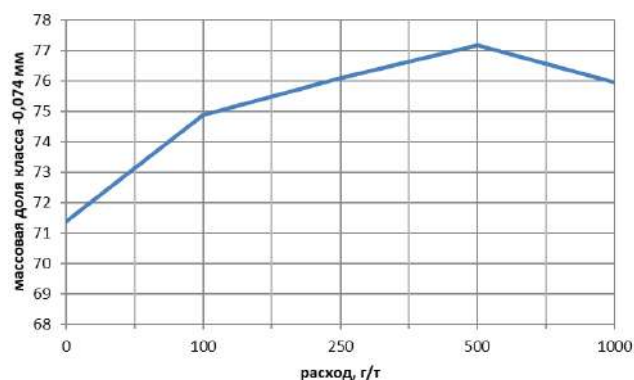


Рис. 4. Влияние расхода реагента Antiprex D в присутствии реагента DP-ОМС 1127 и извести на массовую долю класса -74 мкм в измельченном продукте

Fig. 4. Effect of Antiprex D consumption in the presence of DP-ОМС 1127 and lime to a mass fraction of class -74 microns in the ground product

Закключение

Анализ результатов показывает, что массовая доля класса -74 мкм в измельченном продукте в данных опытах несколько ниже, чем в опытах без добавления реагента DP-ОМС 1127. Однако наблюдается постепенное повышение массовой доли класса -74 мкм с 71,38 до 77,18% при увеличении расхода Antiprex D до 500 г/т. Дальнейшее увеличение расхода ведет к незначительному снижению этого показателя до 75,97%. Следует отметить, что добавление реагента DP-ОМС 1127 оказывало влияние на эффективность отмывки мельницы и шаров от измельченного продукта: отмывка происходила намного быстрее и с меньшим расходом промывной воды. В целом показатели измельчения с добавлением DP-ОМС 1127 хуже, поэтому его добавление считаем нецелесообразным.

Наилучшим результатом (80,43% класса -74 мкм) обладает опыт, проведенный при расходах: извести – 5 кг/т и Antiprex D – 100 г/т.

Оптимизированный реагентный режим позволит увеличить производительность шаровых мельниц на 11% и повысить общую производительность зодотизвлекающей фабрики на 42 тыс. т в год по исходной руде.

Список источников

1. Чантурия В.А. Инновационные процессы в технологиях переработки труднообогатимого минерального сырья // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 6. С. 558-568.
2. Khurmamatov A., Sultanova M., Mukhamedbaev A. Intensifying the cement grinding process // Universum: технические науки. 2024, no. 5-8(122), pp. 57-62. EDN XNXAEI.
3. Гмызина Н.В. Интенсификация процесса измельчения конвертерных шлаков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 3(27). С. 13-14. EDN KVLIDL.
4. Замотин П.А., Лобанов В.Г. Интенсификация процесса измельчения золотосодержащей руды с использованием поверхностно-активных веществ и дополнительной обработкой ультразвуком // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 25-32. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-25-32.
5. Классификации технологических добавок при помоле цемента / Л.Д. Шахова, Р.А. Черкасов, Н.М. Березина, Д.Б. Манелюк // Фундаментальные исследования. 2014. № 12-2. С. 295-299.
6. Горюнов Ю.В., Перцов Н.В., Сумм Б.Д. Эффект Ребиндера. М., 1966.
7. Ребиндер П.А., Шукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физических наук. 1972. Т. 108. Вып. 1. С. 3.
8. Pretreatment of rocks prior to comminution - A critical review of present practices / Somani A., Nandi, T.K., Pal, S.K., Majumder, A.K. // International Journal of Mining Science and Technology. 2017, vol. 27, no. 2, pp. 339-348.
9. Chakka V. M., Altuncevahir B., Jin Q., Li Y., Liu J. P.. Surfactant assisted ball milling // Journal of applied physics. 2006, vol. 99, pp. 99-101.
10. Mahbub Ullah, Md. Edqub Ali, Sh. Bee. Abd Hamid. Surfactant-assisted ball milling // Universiti Malaya. 2013.
11. Использование интенсификаторов помола при переработке железосодержащих руд / Г.В. Митрофанова, Е.В. Черноусенко, В.Ю. Голубев, Е.В. Матвеева // Обогащение руд. 2020. № 3. С. 3-7. DOI: 10.17580/or.2020.03.01. EDN GBEYBM.

References

1. Chanturia V.A. Innovative processes in technologies for processing refractory mineral raw materials. *Geologiya rudnyh mestorozhdenij* [Geology of ore deposits], 2008;50(6):558-568. (In Russ.)
2. Khurmamatov A., Sultanova M., Mukhamedbaev A. Intensifying the cement grinding process. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: technical sciences]. 2024;(5-8(122)):57-62. EDN XNXAEI.
3. Gmyzina N.V. Intensification of the converter slag grinding process. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of the Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009;(3(27)):13-14. (In Russ.) EDN KVLIDL.
4. Zamottin P. A., Lobanov V.G. Intensification of the process of grinding gold-bearing ore using surfactants and additional ultrasound treatment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of the Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018;16(3):25-32. (In Russ.). DOI:10.18503/1995-2732-2018-16-3-25-32.
5. Shakhova L.D., Cherkasov R.A., Berezina N.M., Manelyuk D.B. Classification of technological additives in cement grinding. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2014;(12-2):295-299. (In Russ.)
6. Goryunov Yu.V., Pertsov N.V., Summ B.D. Rehbinder effect. Moscow, 1966. (In Russ.)
7. Rehbinder P.A., Shchukin E.D. Surface phenomena in solids in the processes of their deformation and destruction. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 1972;108(1):3. (In Russ.)
8. Somani A., Nandi T.K., Pal S.K., Majumder, A.K. Pretreatment of rock prior to communion - A critical review of present practices. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017;27(2):339-348.
9. Chakka V.M., Altuncevahir B., Jin Q., Li Y., Liu J.P. Surfactant assisted ball milling. *Journal of applied physics*. 2006;99:99-101.
10. Mahbub Ullah, Md. Edqub Ali. Surfactant-assisted ball milling. University of Malaya. 2013.
11. Mitrofanov G.V., Chernousenko E.V., Golubev V.Yu., Matveeva E.V. Use of grinding intensifiers in the processing of iron-containing ores. *Obogashchenie rud* [Ore enrichment], 2020;(3):3-7. (In Russ.) DOI: 10.17580/or.2020.03.01. EDN GBEYBM.

Поступила 01.11.2024; принята к публикации 22.11.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 01/11/2024; revised 22/11/2024; published 24/12/2024

Гришин Игорь Анатольевич – кандидат технических наук,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: igorgri@mail.ru. ORCID 0000-0001-8010-7542

Дегодя Елена Юрьевна – кандидат технических наук,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: magur@mail.ru. ORCID 0000-0002-4220-7371

Гмызина Наталья Викторовна – кандидат технических наук,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: gmnat1307@mail.ru. ORCID 0000-0002-7959-4504

Кутлубаев Ильдар Мухаметович – доктор технических наук,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: Ptmr74@mail.ru. ORCID 0000-0002-1761-4258

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

Igor A. Grishin – PhD (Eng.),
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: igorgri@mail.ru. ORCID 0000-0001-8010-7542

Elena Y. Degodya – PhD (Eng.),
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: magur@mail.ru. ORCID 0000-0002-4220-7371

Natalya V. Gmyzina – PhD (Eng.),
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: gmnat1307@mail.ru. ORCID 0000-0002-7959-4504

Ildar M. Kutlubayev – DrSc (Eng.),
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: Ptmr74@mail.ru. ORCID 0000-0002-1761-4258

Oleg V. Zoteev – DrSc (Eng.),
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



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

УДК 662.7

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-50-59

ВЕРОЯТНОСТЬ СОВМЕСТНОГО УЛАВЛИВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ И ЛЕГКИХ ЧАСТИЦ В ОТСТОЙНИКЕ

Голованчиков А.Б., Залипаева О.А., Прохоренко Н.А., Меренцов Н.А.

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Аннотация. Проводится физическое и математическое моделирование гравитационного разделения суспензий, у которых плотность тонкодисперсных частиц больше и меньше плотности сплошной жидкой фазы. Аналитически выводятся формулы для расчета локальных степеней очистки частиц, размеры которых больше или равны номинальному эквивалентному диаметру, то есть улавливаемых на 100%. Приводится пример расчета с определением зависимости общей степени очистки и поверхности отстаивания от номинального эквивалентного диаметра частиц никелина и вмещающей породы в никелевой руде. Частицы, эквивалентный диаметр которых больше или равен полученному номинальному, полностью улавливаются. Показаны плотности распределения частиц никелина и вмещающей породы в никелевой руде и локальные пофракционные степени улавливания в отстойнике этих частиц при общей степени улавливания 90%, при этом номинальный размер осаждающихся частиц никелина в два раза меньше номинального размера всплывающих частиц вмещающей породы в никелевой руде. Полученные зависимости общей степени улавливания частиц никелевой руды и необходимой поверхности отстойника от номинального эквивалентного диаметра этих частиц показали, что для всплывающих частиц площадь отстойника должна быть на порядок выше площади отстойника для осаждающихся частиц. Предложенный алгоритм расчета позволяет подбирать геометрические параметры отстойника с заданной степенью улавливания частиц и может быть рекомендован для технологического расчета оборудования при гравитационном мокром методе разделения руды.

Ключевые слова: вероятность улавливания, плотность, вязкость, локальная и общая степени очистки, номинальный размер, поверхность отстойника, никелевые месторождения, вмещающая порода

© Голованчиков А.Б., Залипаева О.А., Прохоренко Н.А., Меренцов Н.А., 2024

Для цитирования

Вероятность совместного улавливания тяжелых и легких частиц в отстойнике / Голованчиков А.Б., Залипаева О.А., Прохоренко Н.А., Меренцов Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 50-59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-50-59>



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

PROBABILITY OF COMBINED CAPTURE OF HEAVY AND LIGHT PARTICLES IN A SETTLING TANK

Golovanchikov A.B., Zalipaeva O.A., Prokhorenko N.A., Merentsov N.A.

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Abstract. Physical and mathematical modeling of gravitational separation of suspensions is carried out, in which density of fine particles is more and less than density of continuous liquid phase. Formulas are analytically derived for calculating local degrees of purification of particles whose sizes are greater than or equal to the nominal equivalent diameter, that is, 100% captured. An example of calculation is given with determination of the dependence of the overall degree of purification and settling surface on the nominal equivalent diameter of nickeline particles and host rock in nickel ore. Particles whose equivalent diameter is greater than or equal to the nominal diameter obtained are completely captured. The distribution densities of nickeline particles and host rock in nickel ore and local fractional degrees of capture of these particles in the settling tank are shown with a total capture degree of 90%, while the nominal size of the settling nickeline particles is two times smaller than the nominal size of the floating particles of host rock in nickel ore. The obtained dependencies of the total degree of capture of nickel ore particles and the required surface of the settling tank on the nominal equivalent diameter of these particles showed that for floating particles the area of the settling tank should be an order of magnitude higher than the area of the settling tank for precipitating particles. The proposed calculation algorithm allows to select geometric parameters of the settling tank with the specified degree of particles capture and can be recommended for technological calculation of equipment at gravitational wet method of ore separation.

Keywords: probability of capture, density, viscosity, local and total degree of purification, nominal size, settling tank surface, nickel deposits, host rock

For citation

Golovanchikov A.B., Zalipaeva O.A., Prokhorenko N.A., Merentsov N.A. Probability of Combined Capture of Heavy and Light Particles in a Settling Tank. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 50-59. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-50-59>

Введение

Метод мокрого гравитационного разделения частиц дисперсной фазы от сплошной жидкой фазы основан на условии, что плотность дисперсной фазы больше плотности сплошной фазы, в которой частицы осаждаются на дне отстойника или каждой полки [1, 2]. Обычно, с точки зрения экономической целесообразности, в качестве сплошной фазы при мокром гравитационном разделении используют воду. Однако при переработке лома цветных металлов и аккумуляторного лома в качестве сплошной фазы используется тяжелая суспензия с плотностью $\rho = 3150 \text{ кг/м}^3$. В качестве утяжелителей тяжелой суспензии при переработке аккумуляторного лома используются тонкодисперсные соединения сульфатно-окисного свинца, которые выделяют из исходного сырья путем последовательного осуществления ряда технологических операций [3]. Метод мокрого гравитационного отделения рудных минералов от минералов вмещающей породы в тяжелой суспензии применяется на обогащательных предприятиях [4-6]. В практике обогащения руд в качестве утяжелителей используются тонко измельченный магнетит, глина, песок, ферросилиций и другие утяжелители суспензий. Неметаллическая легкая масса вмещающей породы, всплывающая на поверхность тяжелой суспензии, также является полезным продуктом, так как после очистки мо-

жет быть использована в качестве наполнителя буровых и тампонажных растворов при бурении нефтяных и газовых скважин. Такой вмещающей породой для никелевой руды является кварцево-карбонатная порода, которая может быть использована для приготовления буровых растворов при вскрытии продуктивных пластов. Легкие компоненты вмещающей породы также могут быть использованы в качестве модификатора для повышения спекающей способности при изготовлении каменноугольных брикетов [3]. От физических и химических параметров сплошной и дисперсной фаз зависит эффективность гравитационного разделения руд [7-9].

Кроме того, для совместного улавливания тяжелых и легких частиц в отстойнике в качестве сплошной фазы рекомендуется использовать тяжелые жидкости, в которых легкие частицы любых размеров всплывают и их извлечение не требует дополнительных технологических операций (сепарирования и т.п.). К таким тяжелым жидкостям относится бромформ с температурой плавления $+8^\circ\text{C}$ [10]. Использование при гравитационном разделении руд в качестве сплошной фазы тяжелой жидкости имеет ряд преимуществ, так как из вмещающей породы получается целевой продукт, не требующий очистки.

В цветной металлургии ежегодно образуется около 10 млн т шлаков, уровень переработки которых не

превышает 15%. При выплавке 1 т меди образуется до 30 т шлаков, а при выплавке 1 т никеля – до 150 т шлаков [3]. Из-за сложности технологических процессов переработки основная их часть направляется в отвалы на временное хранение с перспективой их обогащения после разработки новых экономически выгодных способов извлечения целевых металлов.

Целью работы является физическое и математическое моделирование совместного гравитационного разделения суспензий в отстойнике, у которых плотность тонкодисперсных частиц больше и меньше плотности сплошной жидкой фазы. То же касается обогащения бедных руд цветных, благородных и редких металлов, а также техногенного сырья – шлаков и шламов металлургических заводов, шламов обогатительных фабрик, аккумуляторного лома и т.п.

Вывод формул для локальной степени улавливания тяжелых и легких частиц в отстойнике

Рассмотрим горизонтальное одномерное движение тяжелой и вязкой жидкости в коридоре отстойника шириной b , длиной l и высотой H со свободной границей (рис. 1).

Из уравнения движения вязкой жидкости Навье-Стокса [1]

$$\frac{\partial v_x}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right),$$

где v_x, v_x, v_x – вектора скорости частиц жидкости, м/с;

$\frac{\partial v_x}{\partial \tau}$ – ускорение по оси x , м/с²;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

$\nu = \mu/\rho$ – кинематическая вязкость жидкости, м²/с;
 p – давление в аппарате, Па,

для стационарного одномерного движения получаем

$$\frac{\partial v_x}{\partial \tau} = 0; v_y = 0; v_z = 0.$$

Тогда

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{d^2 v_x}{dz^2}, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Градиент давления – величина постоянная, то

$$\text{есть } \frac{dp}{dx} = -\frac{\Delta p}{l},$$

$$\frac{\Delta p}{l} = -\mu \frac{d^2 v_x}{dz^2}, \quad (2)$$

где Δp – разница давлений на входе p_0 и на выходе p_l из отстойника.

Из реологического уравнения Ньютона для вязкой жидкости [11]

$$\tau = -\mu \frac{dv_x}{dz} \quad (3)$$

после алгебраических преобразований уравнений (1)–(3) получаем

$$\frac{\Delta p}{l} = -\frac{d\tau}{dz} \quad (4)$$

с граничным условием на свободной поверхности

$$z = H \quad \tau = 0. \quad (5)$$

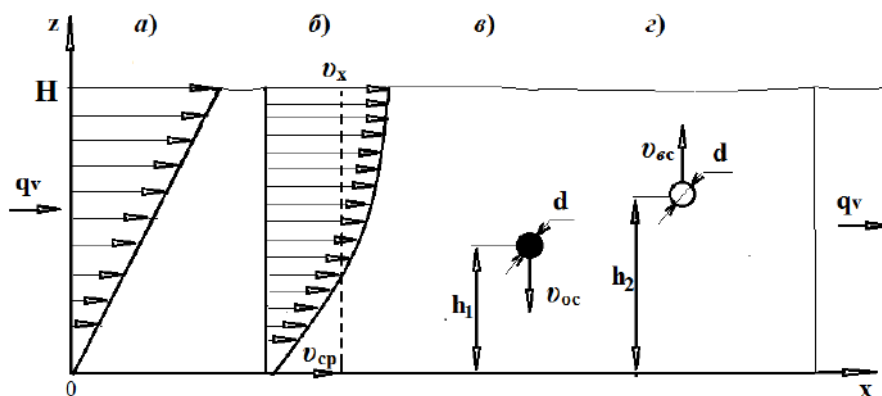


Рис. 1. Одномерное течение тяжелой вязкой жидкости в отстойнике со свободной границей:

а – эпюра касательных напряжений; б – профиль скорости; в – осаждение частицы, плотность которой больше плотности тяжелой жидкости; г – всплывание частицы, плотность которой меньше плотности тяжелой жидкости

Fig. 1. One-dimensional flow of a heavy viscous liquid in a settling tank with a free boundary

a) a plot of tangential stresses; б) speed profile; в) precipitation of a particle whose density is greater than the density of a heavy liquid; г) the floating of a particle whose density is less than the density of a heavy liquid

Тогда после интегрирования (4) с учетом (5) получаем формулу для линейности эпюры касательных напряжений (рис. 1, а):

$$\tau = \frac{\Delta p}{l}(H - z). \quad (6)$$

Последовательно дважды проинтегрируем уравнение движения (1) с учетом (2). Тогда

$$v_x = -\frac{1}{\mu} \frac{\Delta p}{l} \frac{z^2}{2} + P_1 z + P_2,$$

где P_1 и P_2 – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий (рис. 1, б);

$z = H$, $\frac{dv_x}{dz} = 0$ – отсутствие градиента скорости на свободной границе.

С учетом граничных условий

$$v_x = \frac{1}{\mu} \frac{\Delta p}{l} \left(Hz - \frac{z^2}{2} \right). \quad (7)$$

Рассмотрим процесс осаждения частиц, плотность которых больше плотности тяжелой жидкости.

Улавливание частиц подчиняется основному условию: время пребывания больше или равно времени осаждения. Для частиц номинального эквивалентного диаметра d_0 в пределе улавливание происходит на 100%.

$$\frac{l}{v_{cp}} = \frac{H}{v_{oc}}. \quad (8)$$

Определим связь между объемным расходом жидкости q_v и перепадом давления Δp . Элементарный расход на высоте z толщиной dz запишется в виде $dq_v = bv_x dz$ или с учетом формулы (7):

$$dq_v = b \frac{1}{\mu} \frac{\Delta p}{l} \left(Hz - \frac{z^2}{2} \right) dz,$$

где b – ширина коридора отстойника.

После интегрирования полученного уравнения от нуля до H

$$q_v = \frac{b}{\mu} \frac{\Delta p}{l} \left(\frac{H^3}{3} \right).$$

Свяжем среднюю скорость с объемной производительностью (уравнение неразрывности):

$$q_v = bHv_{cp}.$$

Тогда из совместного решения последних двух уравнений получаем

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{3\mu}{H^2} v_{cp}.$$

Подставляя полученное значение $\Delta p/l$ в уравнение (7), приходим к формуле зависимости текущей скорости v_x от средней v_{cp} :

$$v_x = 3v_{cp} \left[\left(\frac{z}{H} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

При $z = H$ $v_x = 1,5v_{cp}$, то есть скорость на свободной границе в 1,5 раза больше средней.

Из уравнения (8) несложно получить известное уравнение для поверхности отстойника, в котором улавливаются частицы номинального диаметра d_0 , то есть частицы, успевающие осесть на дно отстойника с самой неблагоприятной траектории при $z = H$, когда время осаждения наибольшее.

Домножим числитель и знаменатель левой и правой частей на ширину коридора отстойника b . Тогда поверхность дна отстойника, на которую осаждаются эти частицы,

$$F = l \cdot b,$$

и с учетом уравнения (8)

$$F = \frac{q_v}{v_o}, \quad (10)$$

где v_o – скорость осаждения частиц номинального эквивалентного диаметра d_0 .

То есть частицы фракционного состава больше или равные d_0 теоретически улавливаются при осаждении на 100%.

Определим высоту траектории $h < H$ для частиц, диаметр которых меньше диаметра частиц номинального эквивалентного диаметра $d < d_0$, но которые с этой траектории успевают осесть на дно отстойника.

Из дифференциального уравнения улавливания этих частиц по времени осаждения и пребывания $d\tau_{пр} = d\tau_{oc}$ получаем

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dz}{v_{oc}}, \quad (11)$$

где v_{oc} – скорость осаждения частиц диаметром $d < d_0$.

После разделения переменных с учетом значения v_x из уравнения (9) получаем

$$v_{oc} dx = 3v_{cp} \left[\left(\frac{z}{h} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right] dz.$$

Интегрируя слева от 0 до l , а справа от 0 до h , приходим к формуле

$$v_{oc} l = 3v_{cp} H \left[\frac{1}{2} \left(\frac{h}{H} \right)^2 - \frac{1}{6} \left(\frac{h}{H} \right)^3 \right].$$

Полагая, что частицы любого фракционного состава d равномерно распределены по объему суспензии и обозначая степень улавливания $\chi = \frac{h}{H}$, получаем формулу для локальной степени улавливания частиц диаметра $d < d_0$:

$$1,5\chi^2 - 0,5\chi^3 = \left(\frac{v_{oc}}{v_{cp}} \right) \frac{l}{H}. \quad (12)$$

При $\chi = 1$, $d = d_o$, $v_{oc} = v_o$, то есть частицы номинального эквивалентного диаметра (и больше) улавливаются на 100% даже с самой неблагоприятной верхней траектории $h = H$.

Тогда последнее уравнение принимает вид

$$1 = \frac{v_o}{v_{cp}} \frac{l}{H}. \quad (13)$$

Делим левые и правые части уравнения (12) на соответствующие части уравнения (13) и получаем формулу для локальной степени улавливания частиц диаметром $d < d_0$:

$$1,5\chi^2 - 0,5\chi^3 = \frac{v_{oc}}{v_o}. \quad (14)$$

Для ламинарного режима осаждения тонкодисперсных суспензий и эмульсий, скорость осаждения которых подчиняется закону Стокса, последнее уравнение упрощается:

$$1,5\chi^2 - 0,5\chi^3 = \left(\frac{d}{d_0} \right)^2. \quad (15)$$

Уравнения (14) и (15) приведены без выводов в учебном пособии [12], а программа для расчета отстойника с учетом этих уравнений представлена в свидетельстве о государственной регистрации программы на ЭВМ [13]. Однако для частиц, всплывающих в тяжелой жидкости, когда ее плотность больше плотности дисперсной фазы, такого уравнения не было выведено.

Ниже приводится вывод этой формулы.

Профиль скорости сплошной фазы – тяжелой вязкой жидкости, в которой всплывают легкие частицы, описывается уравнением (9) (рис. 1, б).

В уравнении (8) скорость осаждения заменяется на время всплывания:

$$\frac{l}{v_{cp}} = \frac{H}{v_{bc}}.$$

Аналогичное изменение касается уравнения (11):

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dz}{v_{bc}}. \quad (16)$$

После подстановки в уравнение (16) значения скорости v_x из уравнения (9) получаем

$$v_{bc} dx = 3v_{cp} \left[\left(\frac{z}{H} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right] dz.$$

Частицы с диаметром d меньше номинального d_0 (успевающих всплыть со дна отстойника при $z = 0$ и улавливаемых на поверхности тяжелой жидкости при $z = H$ на 100%) успевают всплыть с траектории $z = h$ (рис. 1, в).

Подставляем обозначенные пределы интегрирования в правую часть последнего уравнения и после алгебраических преобразований получаем

$$v_{bc} \ell = v_{cp} H \left[-1,5 \left(\frac{h}{H} \right)^2 + 0,5 \left(\frac{h}{H} \right)^3 + 1 \right]. \quad (17)$$

Полагаем, как и для осаждающихся частиц, что для всплывающих частиц любого фракционного состава с диаметром $d < d_0$ они на входе в отстойник равномерно распределены по объему.

Тогда локальная степень улавливания легких частиц

$$\chi = \frac{H - h}{H}, \quad (18)$$

и уравнение (17) приводится к виду

$$1 + 0,5(1 - \chi)^3 - 1,5(1 - \chi)^2 = \frac{v_{bc} l}{v_{cp} H}. \quad (19)$$

При $\chi = 1$, $d = d_o$, $v_{bc} = v_o$ и уравнение (19) принимает вид

$$1 = \frac{v_o l}{v_{cp} H}.$$

Делим левую и правую части уравнения (19) на соответствующие части последнего равенства. Получаем уравнение для локальной степени очистки улавливания всплывающих частиц, плотность которых меньше плотности тяжелой жидкости:

$$1 + 0,5(1 - \chi)^3 - 1,5(1 - \chi)^2 = \frac{v_{bc}}{v_o}. \quad (20)$$

Для тонкодисперсного фракционного состава, скорость частиц которых подчиняется закону Стокса, уравнение (20) упрощается до вида

$$1 + 0,5(1 - \chi)^3 - 1,5(1 - \chi)^2 = \left(\frac{d}{d_0} \right)^2. \quad (21)$$

Для сравнения графики локальных степеней улавливания всплывающих и осаждающихся частиц с диаметром меньше номинального $d < d_0$ как функции

относительных скоростей соответственно их всплытия и осаждения приведены на рис. 2.

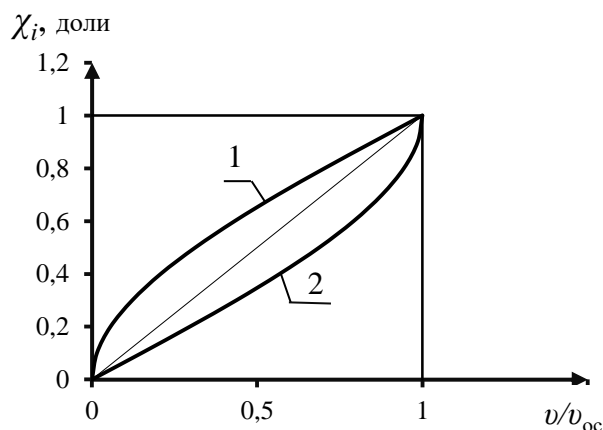


Рис. 2. Зависимость локальной степени улавливания частиц диаметром меньше номинального от относительной скорости осаждения (1) или всплытия (2) (формулы (14) и (20), $i=1$ – осаждение, $i=2$ – всплытие)

Fig. 2. Dependence of the local degree of capture of particles with a diameter less than the nominal one on the relative deposition rate (1) or ascent (2), formulas (14) and (20), $i=1$ is deposition, $i=2$ is ascent

Пример расчета совместного отделения никелина и вмещающей породы в тяжелой жидкости с использованием полученных уравнений (14) и (20). Никелевые руды – это минеральные агрегаты в форме сернистых, мышьяковых и кремнекислых соединений. Например, никелин – красный никелевый колчедан NiAs с плотностью $\rho_{m1} = 7600\text{--}7800 \text{ кг/м}^3$ содержится в кварцево-карбонатных рудных породах с плотностью $\rho_{m2} = 2800 \text{ кг/м}^3$ [14]. Выбираем в качестве сплошной фазы тяжелую жидкость – бромформ с плотностью $\rho_{m2} = 2900 \text{ кг/м}^3$ и вязкостью $\mu = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ [10, 15], применяемый для гравитационного разделения суспензий [15, 16].

Таблица 1. Распределение частиц никелина по фракциям
Table 1. Distribution of nickel particles by fractions

Номер фракции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Σ
Диаметр d , мкм	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	
Масса ΣG , г	5	25	55	84	91	87	75	60	48	35	26	18	11	7	2	629

Таблица 2. Распределение частиц вмещающей породы по фракциям
Table 2. Distribution of particles of host rock by fractions

Номер фракции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Σ
Диаметр d , мкм	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	
Масса ΣG , г	13	48	76	85	83	72	60	50	40	30	22	15	9	5	2	610

Распределение частиц никелина и вмещающей породы после измельчения представлено в табл. 1 и 2.

Ниже приведены основные формулы алгоритма расчета [12].

1. Для заданного размера фракции d определяется число Архимеда:

$$Ar = \frac{gd^3 |\Delta\rho| \rho}{18\mu},$$

где $\Delta\rho_i = \rho_{mi} - \rho$, $i = 1, 2$.

2. Определяется число Рейнольдса:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,575\sqrt{Ar}}.$$

3. Определяется скорость осаждения частиц никелина или всплытия частиц вмещающей породы:

$$v = \frac{\mu Re}{\rho d},$$

где $v = v_{ос}$ или $v_{вс}$.

4. Выбирается диаметр номинальных частиц d_0 , улавливаемых (оседающих на дно отстойника или всплывающих на поверхность тяжелой жидкости) на 100%. Номинальный диаметр варьируется с подбором для заданной степени улавливания [13].

5. Для фракции $d_i \leq d_0$ рассчитываются локальные степени улавливания χ_i по формуле (14) для оседающих частиц никелина ($\rho_{m1} > \rho$) или для всплывающих частиц вмещающей породы ($\rho_{m2} < \rho$) по формуле (20).

6. Определяется поверхность отстойника для заданных диаметров частиц никелина и частиц вмещающей породы по формуле

$$F_i = \frac{q_v}{v_{oi}},$$

где $i = 1, 2$ ($i = 1$ – для оседающих частиц, $i = 2$ – для всплывающих частиц).

Результаты и их обсуждение

На **рис. 2** показана зависимость локальной степени улавливания частиц диаметром $d_i \leq d_0$ от относительной скорости осаждения или всплытия, меньшей, чем соответственно скорость осаждения $v_{ос}$ осаждающихся или всплывающих частиц:

- 1 – для осаждающихся частиц с плотностью $\rho_{m1} > \rho$;
- 2 – для всплывающих частиц с плотностью $\rho_{m2} < \rho$.

На **рис. 3 и 4** показаны плотности распределения частиц никелина и вмещающей породы в никелевой руде, а также локальные пофракционные степени улавливания в отстойнике этих частиц при общей степени улавливания $\sum \chi_i = 90\%$, области уловленных

частиц никелина и частиц вмещающей породы заштрихованы.

Как видно из **рис. 3 и 4**, номинальный размер осаждающихся частиц никелина $d_{01} = 28,5$ мкм, а номинальный размер всплывающих частиц вмещающей породы в никелевой руде $d_{02} = 61,5$ мкм. Частицы больше полученных номинальных диаметров d_0 полностью улавливаются.

На **рис. 5 и 6** показаны номограммы зависимостей общей степени улавливания частиц никелина и разделения частиц вмещающей породы никелевой руды, а также необходимой поверхности отстойника от диаметра этих частиц.

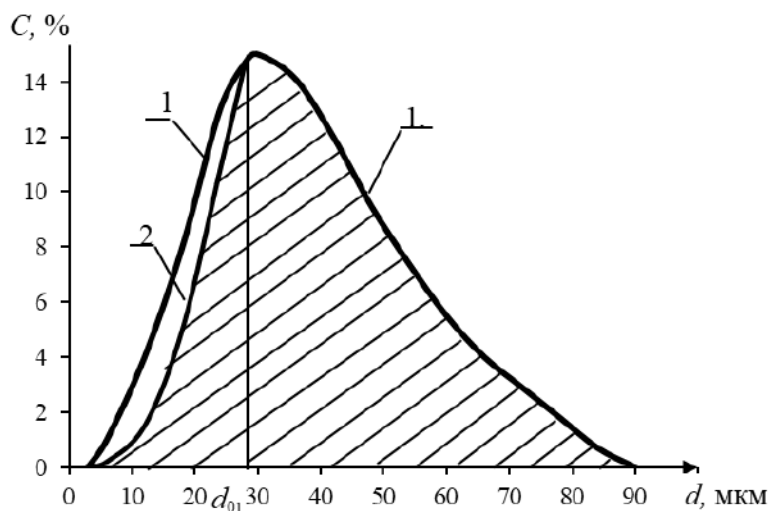


Рис. 3. Плотность распределения никелина по фракциям (1) и локальные пофракционные степени улавливания в отстойнике этих частиц

Fig. 3. Distribution density of nickeline by fractions (1) and local fractional degrees of capture of these particles in the settling tank

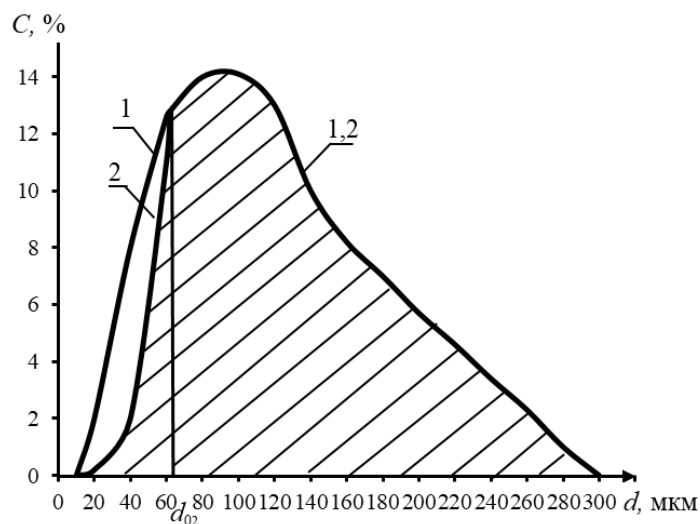


Рис. 4. Плотность распределения частиц вмещающей породы в никелевой руде и локальные пофракционные степени улавливания в отстойнике этих частиц

Fig. 4. Distribution density of host rock particles in nickel ore and local fractional degrees of capture of these particles in a settling tank

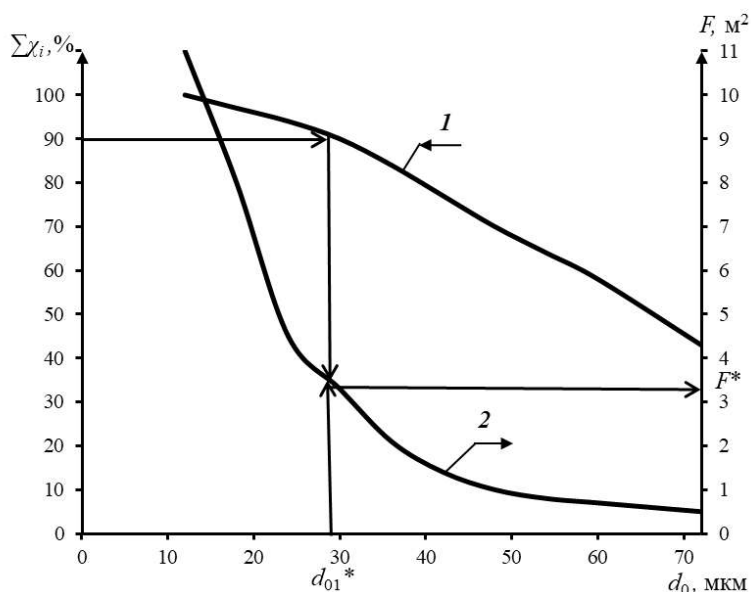


Рис. 5. Номограмма зависимости общей степени улавливания частиц никелина (1) и необходимой поверхности отстойника (2) от номинального диаметра этих частиц

Fig. 5. Nomogram of the dependence of the total degree of capture of nickeline particles (1) and the required surface of the settling tank (2) on the nominal diameter of these particles

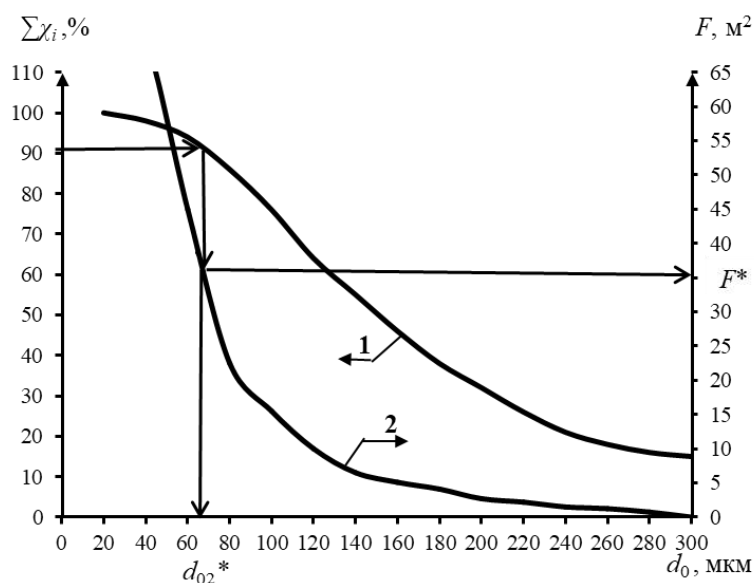


Рис. 6. Номограмма зависимости общей степени разделения частиц вмещающей породы от никелевой руды (1) и необходимой поверхности отстойника (2) от номинального диаметра этих частиц

Fig. 6. Nomogram of the dependence of the overall degree of separation of particles of the host rock from nickel ore (1) and the required surface of the settling tank (2) on the nominal diameter of these particles

На **рис. 5** показана схема с определением номинального диаметра $d_0^* = 28,5$ мкм и необходимой поверхности отстойника $F^* = 3,16$ м² для общей степени улавливания 90% при осаждении частиц никелина в отстойнике. На **рис. 6** показана схема с определением номинального диаметра частиц вмещающей породы от никелевой руды $d_{02}^* = 61,5$ мкм и необходимой при этом поверхности отстойника $F^* = 35,04$ м² также для общей степени улавливания 90% при всплывании этих частиц в отстойнике.

Как видно из приведенных графиков, для получения целевого продукта никелевой руды (никелина и т.п.) по заданным технологическим параметрам достаточно выбрать отстойник с поверхностью до 4 м². Для улавливания частиц всплывающей вмещающей породы из никелевой руды необходимо подобрать отстойник со значительно большей рабочей поверхностью – не менее 35 м².

Заключение

Таким образом, при технологическом расчете отстойника для разделения никелевой руды (совместного извлечения частиц никелина и вмещающей породы) при использовании полученных зависимостей можно получить необходимую поверхность отстойника, обеспечивающую необходимую степень очистки как по тяжелой, так и по легкой дисперсной фазе.

Приведенный алгоритм расчета позволяет подбирать геометрические параметры отстойника с заданной степенью улавливания частиц. Полученные закономерности и алгоритм расчета могут быть использованы для гравитационного разделения суспензий, у которых плотность частиц больше или меньше плотности сплошной тяжелой жидкой фазы, и применимы также для бедных руд, шламов обогатительных фабрик, шламов и шлаков металлургических заводов, когда имеется существенная разность в плотностях разделяемых частиц.

Список источников

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. 14-е изд., стер. М.: Альянс, 2008. 750 с.
2. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для студ. хим.-технолог. спец. вузов / под ред. П.Г. Романкова. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Альянс, 2013. 576 с.
3. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. В 3 т. Т. 3. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. 881 с.
4. Справочник по обогащению руд. Основные процессы / под ред. О. С. Богданова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1983. 381 с.
5. Полькин С.И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1987. 428 с.
6. Кравец Б.Н. Специальные и комбинированные методы обогащения: учебник по спец. «Обогащение полезных ископаемых». М.: Недра, 1986. 303 с.
7. Nzeh N.S. et al. Physical beneficiation of heavy minerals. Part 2: A state of the art literature review on gravity concentration techniques // *Heliyon*. 2023, vol. 9, no. 8, article e18919. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18919.
8. Yongming G. et al. Ore Technical Characteristics and Ore Dressing Test of Low Grade Cu-Ni Ore in Huangshan Deposit, NW China // *International journal of earth sciences*. 2016, vol. 9, no. 5, pp. 1972-1978.
9. Ersoy B. et al. Descriptive Process Mineralogy to Evaluate Physical Enrichment Potential of Malatya/Kuluncak Rare Earth Ore through MLA // *Minerals*. 2023, vol. 13, no. 9, pp. 1197.
10. Бромформ. Паспорт вещества. International Labour Organization. World Health Organization, 2018.
11. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. 2-е изд.,

перераб. и доп. Ленинград: Химия. Ленингр. отделение, 1974. 288 с.

12. Моделирование гидродинамических и биоэкологических процессов очистки многокомпонентных систем от дисперсной фазы: монография / А.Е. Новиков, А.Б. Голованчиков, Е.А. Дугин, М.И. Филимонов; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Волгоградский государственный технический университет. Волгоград: ВолГТУ, 2019. 198 с.
13. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018613319 от 7 марта 2018 г. Российская Федерация. Программа для расчёта основных технологических параметров процесса разделения суспензий и эмульсий в отстойнике / А.Б. Голованчиков, П.С. Васильев, Минь Кыонг Доан, М.И. Филимонов; ВолГТУ. 2018.
14. Большая советская энциклопедия. Т. 29. Никелевые руды / под ред. Б.А. Введенского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Гос. науч. изд. «Большая советская энциклопедия», 1954. 627 с.
15. Abdel-Karim A.A.M., Barakat M.G. Separation, upgrading, and mineralogy of placer magnetite in the black sands, northern coast of Egypt // *Arabian Journal of Geosciences*. 2017, vol. 10, pp. 1-17.
16. Matveev A. et al. Possibility of implementation of dry technology of gold-bearing ores roughing: case study of "Gurbey" deposit // *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. 2018, vol. 56, pp. 3012.

References

1. Kasatkin A.G. *Osnovnye processy i apparaty himicheskoy tekhnologii: uchebnik dlya vuzov*. [The main processes and devices of chemical technology: Textbook for universities]. 14th ed., revised. Moscow: Alliance, 2008, 750 p.
2. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu processov i apparatov himicheskoy tekhnologii: ucheb. posobie dlya stud. him.-tekhnolog. spec. vuzov*. [Examples and tasks on the course of processes and apparatuses of chemical technology: Textbook for students of chemical and technological specialties of universities]. Ed. by P. G. Romankova, 10th ed., revised and add. Moscow: Alliance, 2013, 576 p.
3. Timonin A.S. *Inzhenerno-ekologicheskij spravochnik*. [Engineering and Environmental Handbook]. Vol. 3. Kaluga: N. Bockhareva Publishing House, 2003, 881 p.
4. *Spravochnik po obogashcheniyu rud. Osnovnye processy*. [Reference book for ore dressing. Main processes]. Ed. by O.S. Bogdanov, 2nd ed., revised and supplemented. Moscow: Nedra, 1983, 381 p.
5. Polkin S.I. *Obogashchenie rud i rossypej redkih i blagorodnykh metallov: uchebnik dlya vuzov*. [Enrichment of ores and placers of rare and noble metals: Textbook for universities]. 2nd ed., revised and add. Moscow: Nedra, 1987, 428 p.
6. Kravets B.N. *Special'nye i kombinirovannye metody obogashcheniya: uchebnik po spec. "Obogashchenie*

- poleznyh iskopaemyh*". [Special and combined enrichment methods: Textbook on the specialty "Mineral processing"]. Moscow: Nedra, 1986, 303 p.
7. Nzeh N.S. et al. Physical beneficiation of heavy minerals – Part 2: A state of the art literature review on gravity concentration techniques. *Heliyon*. 2023;9(8). Article e18919. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18919.
 8. Yongming G. et al. Ore Technical Characteristics and Ore Dressing Test of Low Grade Cu-Ni Ore in Huangshan Deposit, NW China. *International journal of earth sciences*. 2016;9(5):1972-1978.
 9. Ersoy B. et al. Descriptive Process Mineralogy to Evaluate Physical Enrichment Potential of Malatya/Kuluncak Rare Earth Ore through MLA. *Minerals*. 2023;13(9):1197.
 10. Bromoform. Substance passport. International Labour Organization. Word Health Organization, 2018.
 11. Romankov P.G., Kurochkina M.I. *Gidromekhanicheskie processy himicheskoy tekhnologii*. [Hydromechanical processes of chemical technology]. 2nd ed., revised and add. Leningrad: Khimiya. Leningradskoye otdeleniye, 1974, 288 p.
 12. Novikov A.E., Golovanchikov A.B., Dugin E.A., Filimonov M.I. *Modelirovanie gidrodinamicheskikh i bioekologicheskikh processov ochistki mnogokomponentnykh sistem ot dispersnoy fazy: monografiya*. [Modeling of hydrodynamic and bioecological processes of cleaning multicomponent systems from a dispersed phase: monograph]. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Volgograd State Technical University. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2019, 198 p.
 13. Golovanchikov A.B., Vasiliev P.S., Min Kyong Doan, Filimonov M.I. *Programma dlya raschyota osnovnykh tekhnologicheskikh parametrov processa razdeleniya suspenzij i emul'sij v otstojnike*. [Program for calculating the main technological parameters of the process of separation of suspensions and emulsions in a settling tank]. Certificate of state registration of a computer program RF, no. 2018613319, 2018.
 14. *Bol'shaya sovetskaya enciklopediya*. T. 29. *Nikelevye rudy* [Great Soviet Encyclopedia. Vol. 29. Nickel ores]. Ed. By B.A. Vvedensky, 2nd ed., revised and supplemented. Moscow: State Scientific Publishing House "Great Soviet Encyclopedia", 1954, 627 p.
 15. Abdel-Karim A.A.M., Barakat M.G. Separation, upgrading, and mineralogy of placer magnetite in the black sands, northern coast of Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*. 2017;10:1-17.
 16. Matveev A. et al. Possibility of implementation of dry technology of gold-bearing ores roughing: case study of "Gurbey" deposit. *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2018;56:3012.

Поступила 14.04.2024; принята к публикации 19.04.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 14/04/2024; revised 19/04/2024; published 24/12/2024

Голованчиков Александр Борисович – доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия.
Email: pahp@vstu.ru. ORCID 0000-0002-4576-4229

Залипаева Ольга Александровна – кандидат технических наук, доцент, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия.
Email: zalipaevaolga@yandex.ru. ORCID 0000-0002-9345-2625

Прохоренко Наталья Андреевна – кандидат технических наук, старший преподаватель, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия.
Email: natasha292009@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5706-1475

Меренцов Николай Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия.
Email: steeples@mail.ru. ORCID 0000-0002-6579-2630

Alexander B. Golovanchikov – DrSc (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.
Email: pahp@vstu.ru. ORCID 0000-0002-4576-4229

Olga A. Zalipaeva – PhD (Eng.), Associate Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.
Email: zalipaevaolga@yandex.ru. ORCID 0000-0002-9345-2625

Natalia A. Prokhorenko – PhD (Eng.), Senior lecturer, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.
Email: natasha292009@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5706-1475

Nikolay A. Merentsov – PhD (Eng.), Associate Professor, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia.
Email: steeples@mail.ru. ORCID 0000-0002-6579-2630

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

УДК 622.767.55

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-60-69



ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЕЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Тюкин А.П.

Горный институт НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

Аннотация. В статье приводится анализ существующих программных комплексов, позволяющих моделировать гидродинамические процессы, а также программных комплексов, в функционал которых входит расчет обогащательных и металлургических технологических схем. В связи с тем, что программных средств, объединяющих в себе обе рассмотренные области функционала, на рынке автором найдено не было, разработан собственный программный инструмент, моделирующий процесс газодинамической сепарации зернистых материалов ламинарным потоком газа, рассчитывающий технические показатели обогащения и в автоматическом режиме подбирающий оптимальные параметры процесса с целью достижения максимальной эффективности разделения. Описана работа модулей физико-математической модели, отвечающих за просчет процессов ускорения частиц в разгонном канале, вылета из него, движения в струе газа, выхода из струи, свободного падения сквозь среду и улавливания в приемных контейнерах, а также модулей, отвечающих непосредственно за расчет показателей обогащения и расчет различных величин по двумерным матрицам входных параметров. Разработанный программный инструмент (физико-математическая модель газодинамической сепарации), находящийся в открытом доступе, позволяет изучать закономерности и особенности каждой составляющей процесса газодинамической сепарации при различных комбинациях свойств разделяемых компонентов и режимных параметров, а также позволяет в автоматическом режиме подобрать режимные параметры газодинамической сепарации новой смеси двух компонентов, обеспечивающие максимальную эффективность разделения с учетом критерия Ханкока-Луйкена с поправкой на критерий Шехирева.

Ключевые слова: обогащение, газодинамическая сепарация зернистых материалов, математическая модель, программно-аппаратная реализация

© Тюкин А.П., 2024

Для цитирования

Тюкин А.П. Физико-математическая модель газодинамической сепарации зернистых материалов и ее программно-аппаратная реализация // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 60-69. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-60-69>



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

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL OF GAS DYNAMIC SEPARATION OF GRANULAR MATERIALS AND ITS HARDWARE AND SOFTWARE IMPLEMENTATION

Tukin A.P.

Institute of Mining of the National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

Abstract. The article provides an analysis of existing software systems that allow modeling hydrodynamic processes, as well as software systems whose functionality includes the calculation of ore processing and metallurgical technological schemes. Due to the fact that the software tools combining both considered functional areas were not found on the market, the software tool that simulates the process of gas-dynamic separation of granular materials by laminar gas flow, calculates the technical parameters of concentration and automatically selects the optimal process parameters in order to achieve maximum separation efficiency was developed. The work of the modules of the physic and mathematical model responsible for calculating the processes of particle acceleration in the acceleration channel, departure from it, movement in a gas jet, exit from the jet, free fall through the medium and collection in receiving containers, as well as modules responsible directly for calculating concentration indicators and calculating various values using two-dimensional matrices of input parameters is described. The developed software tool (a physic and mathematical model of gas dynamic separation), which is in the public domain, allows to study the patterns and features of each component of the gas dynamic separation process with various combinations of properties of the separated components and operating parameters, and also allows to automatically select the operating parameters of the gas dynamic separation of a new mixture of two components, ensuring maximum separation efficiency taking into account the Hancock-Luiken criterion adjusted by the Shekhirev criterion.

Keywords: concentration, gas dynamic separation of granular materials, mathematical model, hardware and software implementation

For citation

Tukin A.P. Physical and Mathematical Model of Gas Dynamic Separation of Granular Materials and its Hardware and Software Implementation. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 60-69. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-60-69>

Введение

Ранее автором была разработана физико-математическая модель газодинамической сепарации зернистых материалов ламинарным потоком газа [1-3]. Данная модель позволяет на основе заданных средних величин характеристик частиц каждого компонента смеси и параметром разброса данных величин выполнять расчет разделения такой смеси и рассчитывать показатели обогащения.

В ходе работы возник вопрос о программно-аппаратной реализации указанной физико-математической модели. Стандартными средствами Microsoft Excel с использованием среды программирования Visual Basic for Applications (VBA) реализация возможна, но расчеты занимают существенное время, вплоть до недель и месяцев, так как физико-математическая модель является детерминированной и просчитывает траекторию полета каждой частицы, что предполагает выполнение десятков миллиардов элементарных арифметических операций, для чего MS Excel не оптимизирован.

В связи с этим на определенном этапе исследований возник вопрос о программно-аппаратной реализации разработанной физико-математической модели. Математические модели гидродинамических процессов, в

том числе таких, как поток газа в трубе, движение струи газа, обтекание твердых тел, широко применяются в машиностроении [4]. В частности, система автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks, разработанная и поддерживаемая французской компанией Dassault Systèmes SE, содержит модуль автоматизированного расчета потоков сред, интегрированный в основной интерфейс данной САПР. Это позволяет инженерам проектировать и моделировать потоки жидкостей и газов одновременно, с самого начала процесса проектирования, что имеет существенное коммерческое значение, так как значительно ускоряет сроки проектирования [5, 6].

Вместе с тем указанный программный инструмент не содержит функционала для расчета разгона твердых частиц, имеющих случайные характеристики с заданными параметрами разброса, потоком газа в разгонном канале щелевого сечения с последующим движением частиц в струе газа, выходом из нее, улавливанием в приемные контейнеры и расчетом показателей обогащения.

Программный пакет Fluent, разработанный и поддерживаемый американской компанией Ansys, Inc., позволяет создавать физические модели и анализировать различные явления в жидкостях и газах, в том числе позволяет проектировать наземные, авиационные и

аэрокосмические транспортные средства, рассчитывать газовые турбины, процессы смешивания, теплообмена и др. [7, 8]. При этом аналогично Solid Works программный пакет Fluent не содержит встроенных средств для расчета показателей обогащения зернистых материалов методом газодинамической сепарации.

Программный пакет FlowVision, разработанный и поддерживаемый российской инженеринговой компанией «ТЕСИС», также позволяет выполнять расчеты и решать задачи в аэрокосмической области, в области автомобилестроения, турбомашиностроения, энергетики (в том числе атомной), судостроения, химической промышленности, биомеханики и строительства [9]. Отечественный программный пакет поддерживает технологию параллельных вычислений и многопоточный режим расчета, что позволяет эффективно использовать вычислительные ресурсы [10].

Вместе с тем специалисты в области обогащения руд и металлургии во всем мире широко используют так называемый «Chemical Engineering», то есть различные программные пакеты, позволяющие моделировать соответствующие процессы и рассчитывать их показатели. По состоянию на май 2024 года существует, как минимум, 98 таких программных пакетов [11].

Вместе с тем даже такие приближенные к специфике рассматриваемой задачи программные пакеты, как, например, MetSim (разработчик – MetSim International, LLC, США [12]) и JKSImMet (разработчик – The University of Queensland, Австралия [13]), позволяющие выполнять широкий спектр обогатительных и металлургических расчетов, в ряде случаев уже содержащие информацию о химизме ряда процессов, тем не менее не решают задачи гидродинамики в условиях рассматриваемого способа газодинамической сепарации.

Таким образом, за время исследований с 2013 по 2024 годы на рынке программного обеспечения автором не найдено ни одного готового программного инструмента, который позволил бы рассчитать показатели газодинамической сепарации зернистых материалов ламинарным потоком разреженного газа, задавая на вход свойства частиц смеси и параметры разброса этих свойств.

Теория, методы исследования и технические разработки

В качестве аппаратной вычислительной платформы автором был выбран сервер российского хостинг-провайдера АО «Региональный Сетевой Информацион-

ный Центр». Программа написана автором собственными силами на языке программирования PHP, все данные хранятся в базе данных в формате MySQL. Интерфейс также написан собственными силами на языках HTML и JavaScript. Все вышеуказанные форматы являются открытыми в Российской Федерации, поддерживаются бесплатно (за исключением услуг хостинга), какие-либо затруднения, связанные с санкционной политикой недружественных стран, не влияют на их работу и не создают рисков попадания в зависимость от чьих-либо коммерческих интересов.

В частности, это означает, что при использовании в будущем физико-математической модели для решения задач, попадание результатов которых к потенциальным противникам и конкурентам России является недопустимым (например, [14]), будет возможно обеспечить требования технологического и информационного суверенитета.

Физико-математическая модель размещена автором в открытом доступе и доступна для проверки и работы с ней [15].

Упрощенная принципиальная схема процесса газодинамической сепарации показана на **рис. 1**.

На вход модели подаются следующие параметры:

- характеристики двух разделяемых компонентов смеси: диаметр частиц (среднее арифметическое и среднеквадратическое отклонение), коэффициент сферичности (среднее и СКО), эффективный коэффициент трения (среднее и СКО), плотность, масса навески для расчета;
- режимные параметры процесса сепарации: температура, молярная масса, статическое давление, плотность и динамическая вязкость рабочей среды (газа), линейная скорость газа в начальной точке разгонного канала, длина, ширина и высота внутренней части разгонного канала, ускорение свободного падения в месте проведения сепарации (важно для расчета процесса за пределами Земли), коэффициент ширины струи и коэффициент турбулентного перемешивания;
- параметры расчета: шаг интервала продольного расстояния (определяет количество итераций и точность расчета), количество отдельных частиц каждого компонента (определяет точность расчета стохастических характеристик разброса компонентов), высота установки разгонного канала над приемными контейнерами, длина приемного контейнера и общая длина установки.

Математический аппарат физико-математической модели в настоящей статье не дублируется, так как детально описан в [3].

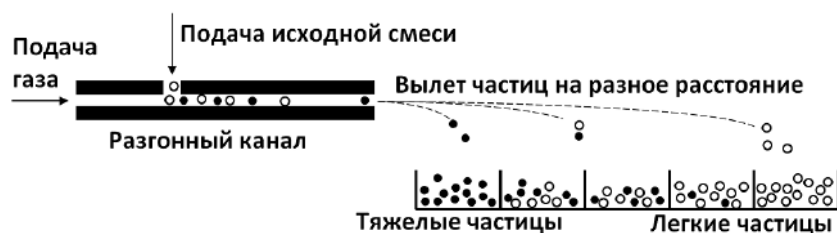


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема газодинамической сепарации

Fig. 1. Simplified schematic diagram of gas dynamic separation

Результаты работы и их обсуждение

Физико-математическая модель позволяет рассчитывать и визуализировать следующие процессы:

1. Ускорение твердых частиц под воздействием ламинарного потока газа в горизонтальном разгонном канале, имеющем малую высоту, сравнимую с размерами частиц, и ширину, многократно превышающую размер частиц. Такая форма сечения позволяет снизить гидравлический диаметр трубы и, как следствие, сместить режим проведения процесса в ламинарную область при сохранении требуемой линейной скорости газа.

2. Движение твердых частиц по баллистическим траекториям после выхода из разгонного канала и их падение в приемные контейнеры. Условно делится на составляющие:

2.1. Вылет частиц из разгонного канала, кратковременное повышение продольного ускорения за счет потери трения о нижнюю стенку разгонного канала при сохранении динамического давления рабочей среды.

2.2. Движение частиц в расширяющейся плоской турбулентной струе рабочей среды, снижение продольного ускорения.

2.3. Выход частиц из плоской турбулентной струи, свободное падение в приемные контейнеры и торможение о рабочую среду.

Работа с физико-математической моделью газодинамической сепарации осуществляется в следующем общем порядке:

1. Занесение в базу данных информации о разделяемых материалах (компонентах смеси).
2. Занесение в базу данных информации о режимных параметрах газодинамической сепарации.
3. Настройка отдельных параметров расчета.
4. Выполнение необходимых расчетов и визуализации.

«Расчет ускорения» – модуль, предназначенный для расчета и визуализации процессов, происходящих

в разгонном канале. В этом разделе при помощи физико-математической модели можно визуализировать форму разгонного канала, построить графики средних скоростей частиц разных компонентов смеси, график отношения скоростей и графики ускорений частиц.

Пример работы модуля «Расчет ускорения» показан на **рис. 2**.

Модуль «Расчет ускорения» позволяет визуализировать изменение ширины сечения разгонного канала по его длине, а также построить диаграммы линейной скорости газа, скоростей частиц двух разделяемых материалов, их ускорений, а также отношения их скоростей.

«Расчет потока» – модуль, предназначенный для расчета и визуализации процессов, происходящих после выхода частиц из разгонного канала. В этом разделе при помощи физико-математической модели можно визуализировать расширяющуюся струю газа, построить траектории частиц разных компонентов разделяемой смеси, оценить разброс траекторий и расстояний, на котором частицы улавливаются в приемные контейнеры.

Модель позволяет расчетно отключить взаимодействие частиц со средой сразу после их выхода из разгонного канала. Такой режим предназначен для изучения разделительного массопереноса внутри самого разгонного канала.

Примеры работы модуля «Расчет потока» показаны на **рис. 3 и 4**.

«Обогащение» – модуль, предназначенный для расчета показателей газодинамической сепарации и отображения столбчатой диаграммы, позволяющей наглядно увидеть, как распределяется каждый из двух компонентов смеси по приемным контейнерам, а также в автоматическом режиме рассчитать показатели обогащения при условном выделении хвостов и концентрата на том или ином расстоянии по длине ряда приемных контейнеров.

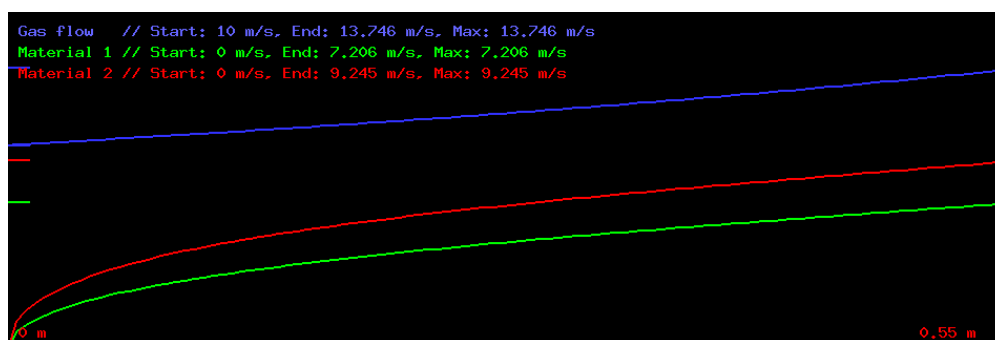


Рис. 2. Построенные диаграммы средней линейной скорости частиц ильменита (зеленым цветом), кварца (красным цветом) и собственной линейной скорости потока газа (синим цветом) в линейно сужающемся разгонном канале (ширина диаграммы 0,55 м)

Fig. 2. Diagrams of the average linear velocity of ilmenite particles (in green), quartz (in red) and the intrinsic linear velocity of the gas flow (in blue) in a linearly narrowing acceleration channel (diagram width 0.55 m)

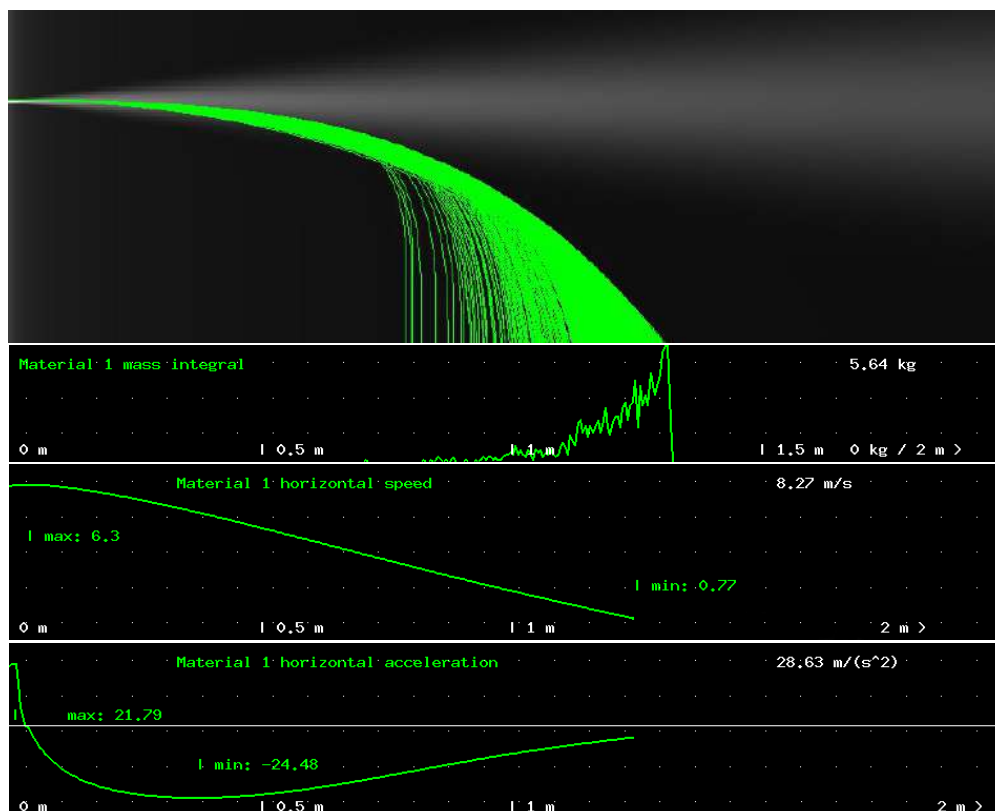


Рис. 3. Пример работы модуля «Расчет потока»: в верхней части – цветовая визуализация струи газа, выходящего из разгонного канала, траектории частиц материала; во второй части – распределение масс уловленных частиц; в третьей части – график горизонтальной проекции средневзвешенной скорости частиц; в нижней части – график горизонтальной проекции ускорения частиц

Fig. 3. An example of the operation of the Flow Calculation module: in the upper part – a color visualization of the gas jet coming out of the acceleration channel, the trajectory of the material particles; in the second part – the distribution of the masses of collected particles; in the third part – a graph of the horizontal projection of the weighted average particle velocity; in the lower part – a graph of the horizontal projection of particle acceleration

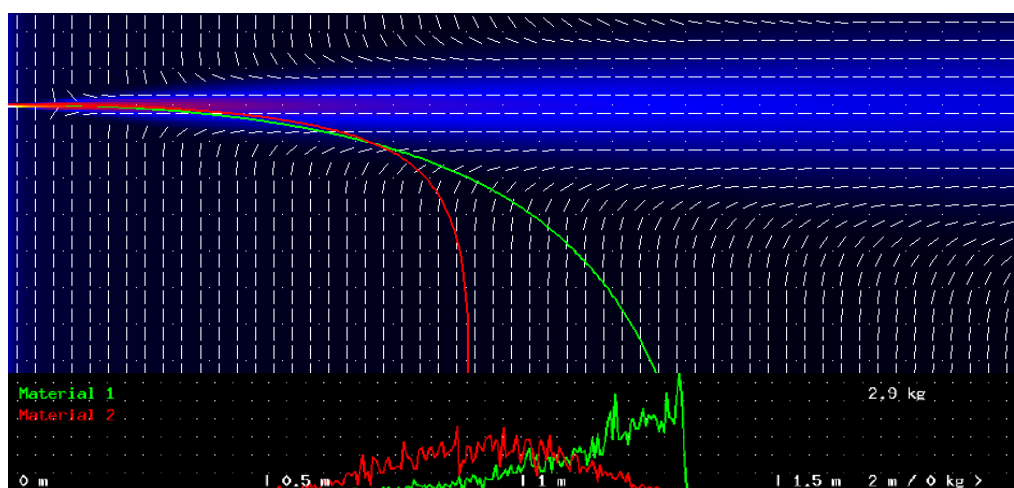


Рис. 4. Пример работы модуля «Расчет потока»: в верхней части – цветная визуализация струи газа, средние траектории частиц материалов, штриховые обозначения вектора линейной скорости газа; в нижней части – распределения масс уловленных частиц материалов

Fig. 4. An example of the operation of the Flow Calculation module: in the upper part – a color visualization of a gas jet, average trajectories of material particles, dashed designations of the linear velocity vector of the gas; in the lower part – mass distributions of collected material particles

Пример работы модуля «Обогащение» показан на рис. 5 и в табл. 1. Конечным результатом работы модуля является информация о том, начиная с какого приемного контейнера материал необходимо выделить в концентрат (либо, наоборот, в хвосты) для достижения максимальной эффективности разделения (по критерию Ханкока-Луйкена) с учетом задаваемой цели – работы на качество либо на извлечение (по критерию Шехирева [16]).

Также модуль «Обогащение» выдает отчет о показателях обогащения. Для рассмотренного примера данная информация получена в следующем виде:

«Концентрат: дальнее поле
Отсечка после контейнера № 9 (0,9 м)
 $m_{исх} = 200$ кг, $m_k = 74,7$ кг, $m_{хв} = 125,3$ кг
 $\gamma_k = 37,35\%$, $\gamma_{хв} = 62,65\%$
 $\alpha = 50,00\%$, $\beta = 94,91\%$, $\theta = 23,22\%$
 $\varepsilon_k = 70,90\%$, $\varepsilon_{хв} = 29,10\%$
 $\beta / \alpha = 1,90$ (степень концентрации)
 $E = 0,67$ (критерий Ханкока-Луйкена)
 $D = 0,12$ (критерий Шехирева)».

«Серии экспериментов» – модуль, предназначенный для расчета различных искомых результирующих величин при подстановке разных значений каких-либо двух входных параметров.

Первым параметром двумерной матрицы серии расчетных экспериментов могут быть:

- сопротивление в цепи компрессора, кОм, – сопротивление в электрической цепи привода компрессора сепаратора, построенного автором, задаваемое переменными резисторами с пульта управления и определяющее линейную скорость газа;

- температура газа, К;
- линейная скорость газа, м/с;
- плотность 1-го материала, кг/м³;
- диаметр частицы 1-го материала, мкм;
- эффективный коэффициент трения 1-го материала;
- длина разгонного канала, мм.

Вторым параметром могут быть:

- статическое давление рабочей среды, мбар, – давление рабочей среды (газа) после выхода из разгонного канала;

- температура газа, К;
- коэффициент сферичности 1-го материала.

Искомой величиной, рассчитываемой физикоматематической моделью, могут быть:

- скорость частицы в точке выхода из разгонного канала, м/с;

- горизонтальная координата падения, м, – рассчитывается по одной частице с заданными свойствами (диаметр, коэффициент сферичности и эффективный коэффициент трения);

- средняя горизонтальная координата падения, м, – рассчитывается для каждой частицы в выборке, размер которой задан в выбранном наборе настроек, и вычисляется среднее арифметическое значение;

- среднеквадратическое отклонение координаты падения, отн. %;

- среднеквадратическое отклонение скорости частицы в точке выхода из разгонного канала, отн. %;

- средняя линейная скорость газа в канале, м/с;

- число Рейнольдса для режима течения газа в разгонном канале;

- средняя скорость слоя, действующего на сферическую частицу, м/с;

- начальное отношение скоростей двух частиц (с возможностью выбора прямого или обратного соотношения);

- конечное отношение скоростей двух частиц (с аналогичным выбором);

- поле улавливания концентрата (ближнее/дальнее);

- номер контейнера отсечки – номер приемного контейнера, после которого происходит разделение продукта на концентрат и хвосты (данный параметр, как и все последующие показатели обогащения, рассчитывается автоматически по критерию Ханкока-Луйкена и критерию Шехирева);

- масса концентрата, кг;

- масса хвостов, кг;

- выход концентрата, %;

- выход хвостов, %;

- содержание 1-го компонента в руде, %;

- содержание 1-го компонента в концентрате, %;

- содержание 1-го компонента в хвостах, %;

- извлечение 1-го компонента в концентрат, %;

- извлечение 1-го компонента в хвосты, %;

- степень концентрации;

- критерий Ханкока-Луйкена;

- критерий Шехирева.

Значения искомой величины при различных значениях 1-й и 2-й входных переменных отображаются в виде таблицы. Пример работы модуля «Серии экспериментов» показан в табл. 2 и 3.

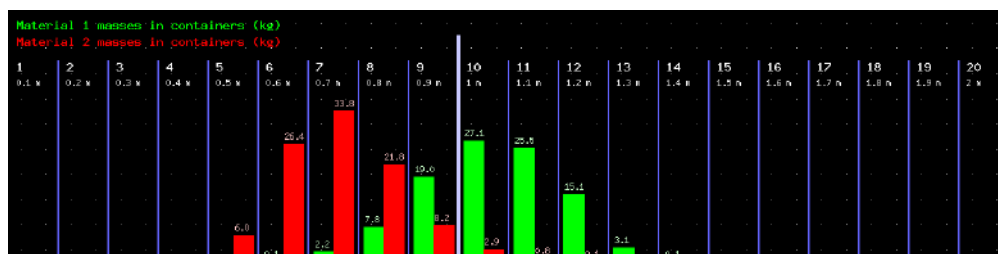


Рис. 5. Результат работы модуля «Обогащение»: 20 приемных контейнеров общей длиной 2 м и массы кварца (красный) и ильменита (зеленый) в каждом из них

Fig. 5. The result of the Concentration module: 20 receiving containers with a total length of 2 m and masses of quartz (red) and ilmenite (green) in each of them are shown

Таблица 1. Результаты работы модуля «Обогащение» для условной смеси, состоящей из 100 кг кварца и 100 кг ильменита

Table 1. Results of the Concentration module for a conditional mixture consisting of 100 kg of quartz and 100 kg of ilmenite

Контейнеры																					
Номер Контейнера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Всего
L мин, м	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	
L макс, м	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	
Массы компонентов в контейнерах																					
Ильменит, кг						0,1	2,2	7,8	19,0	27,1	25,5	15,1	3,1	0,1							100
Кварц, кг					6,0	26,4	33,8	21,8	8,2	2,9	0,8	0,1									100
Смесь, кг					6,0	26,5	36,0	29,6	27,2	30,0	26,3	15,2	3,1	0,1							200
Массы компонентов с 1-го по текущий контейнер																					
Ильменит, кг						0,1	2,3	10,1	29,1	56,2	81,7	96,8	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Кварц, кг					6,0	32,4	66,2	88,0	96,2	99,1	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Смесь, кг					6,0	32,5	68,5	98,1	125,3	155,3	181,6	196,8	199,9	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	
Массы компонентов с текущего по последний контейнер																					
Ильменит, кг	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	97,7	89,9	70,9	43,8	18,3	3,2	0,1							
Кварц, кг	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	94,0	67,6	33,8	12,0	3,8	0,9	0,1									
Смесь, кг	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	194,0	167,5	131,5	101,9	74,7	44,7	18,4	3,2	0,1							
Содержание компонентов в контейнерах																					
Ильменит, %					0,0	0,4	6,1	26,4	69,9	90,3	97,0	99,3	100,0	100,0							
Кварц, %					100,0	99,6	93,9	73,6	30,1	9,7	3,0	0,7	0,0	0,0							
Содержание компонентов с 1-го по текущий контейнер																					
Ильменит, %					0,0	0,3	3,4	10,3	23,2	36,2	45,0	49,2	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	
Кварц, %					100,0	99,7	96,6	89,7	76,8	63,8	55,0	50,8	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	
Содержание компонентов с текущего по последний контейнер																					
Ильменит, %	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	51,5	59,6	74,3	88,2	94,9	98,0	99,5	100,0	100,0							
Кварц, %	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	48,5	40,4	25,7	11,8	5,1	2,0	0,5	0,0	0,0							
Выход продукта с 1-го по текущий контейнер («ближнего»)																					
γ _{бл.} , %					3,0	16,3	34,3	49,1	62,7	77,7	90,8	98,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Выход продукта с текущего по последний контейнер («дальнего»)																					
γ _{дал.} , %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,0	83,8	65,8	51,0	37,4	22,4	9,2	1,6	0,1							
Извлечение в продукт с 1-го по текущий контейнер («ближний»)																					
Ильменит, %						0,1	2,3	10,1	29,1	56,2	81,7	96,8	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Кварц, %					6,0	32,4	66,2	88,0	96,2	99,1	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
Извлечение в продукт с текущего по последний контейнер («дальний»)																					
Ильменит, %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	97,7	89,9	70,9	43,8	18,3	3,2	0,1							
Кварц, %	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	94,0	67,6	33,8	12,0	3,8	0,9	0,1									
Критерий Ханкока-Луйкена, если концентрат – продукт с 1-го по текущий контейнер («ближний»)																					
Ильменит, %						-0,32	-0,64	-0,78	-0,67	-0,43	-0,18	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Кварц, %					0,06	0,32	0,64	0,78	0,67	0,43	0,18	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Критерий Ханкока-Луйкена, если концентрат – продукт с текущего по последний контейнер («дальний»)																					
Ильменит, %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,32	0,64	0,78	0,67	0,43	0,18	0,03	0,00							
Кварц, %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,06	-0,32	-0,64	-0,78	-0,67	-0,43	-0,18	-0,03	0,00							
Критерий Шехирева, если концентрат – продукт с 1-го по текущий контейнер («ближний»)																					
Ильменит, %						0,24	0,40	0,49	0,58	0,69	0,85	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Кварц, %					0,00	0,00	0,06	0,46	0,88	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Критерий Шехирева, если концентрат – продукт с текущего по последний контейнер («дальний»)																					
Ильменит, %	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,54	0,12	0,02	0,00	0,00	0,00							
Кварц, %	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,76	0,60	0,51	0,42	0,31	0,15									
Степень концентрации, если концентрат – продукт с 1-го по текущий контейнер («ближний»)																					
Ильменит, %						0,01	0,07	0,21	0,46	0,72	0,90	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Кварц, %					2,00	1,99	1,93	1,79	1,54	1,28	1,10	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Степень концентрации, если концентрат – продукт с текущего по последний контейнер («дальний»)																					
Ильменит, %	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,03	1,19	1,49	1,76	1,90	1,96	1,99	2,00	2,00							
Кварц, %	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,81	0,51	0,24	0,10	0,04	0,01									

Таблица 2. Пример работы модуля «Серии экспериментов»: значение критерия эффективности разделения Ханкока-Луйкена при различных значениях линейной скорости газа и абсолютного статического давления рабочей среды

Table 2. An example of the operation of the Series of Experiments module: the value of the Hancock-Luiken separation efficiency criterion for various values of linear gas velocity and absolute static pressure of the working medium

Линейная скорость газа, м/с	Статическое давление рабочей среды P , мбар		
	200	600	1000
10	0,70	0,63	0,62
12	0,66	0,79	0,73
14	0,69	0,65	0,79
16	0,78	0,65	0,71
18	0,77	0,64	0,64
20	0,64	0,66	0,63

Таблица 3. Пример работы модуля «Серии экспериментов»: расчетные величины расстояния улавливания твердых частиц при различных значениях их плотности и коэффициента сферичности

Table 3. An example of the operation of the Series of experiments module: calculated values of the distance of particulate trap at different values of their density and the coefficient of sphericity

Плотность материала, кг/м ³	Коэффициент сферичности материала								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
2500	0,49	0,53	0,57	0,62	0,67	0,72	0,76	0,81	0,80
3000	0,50	0,55	0,61	0,67	0,73	0,77	0,83	0,88	0,88
3500	0,52	0,58	0,65	0,72	0,78	0,84	0,90	0,95	0,95
4000	0,53	0,61	0,69	0,76	0,83	0,90	0,96	1,01	1,02
4500	0,55	0,64	0,73	0,80	0,88	0,95	1,01	1,06	1,07
5000	0,57	0,67	0,76	0,85	0,92	1,00	1,06	1,11	1,12
5500	0,59	0,69	0,79	0,89	0,97	1,04	1,10	1,15	1,16
6000	0,61	0,73	0,83	0,92	1,01	1,08	1,13	1,18	1,18
6500	0,63	0,75	0,87	0,97	1,04	1,11	1,17	1,21	1,21
7000	0,65	0,77	0,89	1,00	1,08	1,14	1,19	1,23	1,24
7500	0,67	0,80	0,92	1,03	1,11	1,17	1,22	1,25	1,25
8000	0,69	0,83	0,95	1,06	1,13	1,19	1,24	1,27	1,28

Выводы

Разработанная физико-математическая модель газодинамической сепарации позволяет на основе входных данных о характеристиках разделяемых компонентов смеси и режимных параметрах сепарации рассчитывать и визуализировать процессы ускорения частиц в разгонном канале и их последующего свободного падения по баллистическим траекториям с улавливанием в приемные контейнеры. Модель позволяет в автоматическом режиме рассчитывать показатели обогащения и подбирать оптимальные режимы исходя из постановки задачи (работа на качество/извлечение).

Научная задача, решаемая при помощи физико-математической модели, – изучение закономерностей и особенностей каждой составляющей процесса газодинамической сепарации при различных комбинациях свойств разделяемых компонентов, режимных параметров и условий сепарации, а также поиск и формулирование правил и принципов, позволяющих определять режимные параметры для наиболее эффективной сепарации заданной смеси твердых компонентов.

Практическая задача, решение которой обеспечивается при помощи физико-математической модели, – расчет режимных параметров сепарации новой смеси твердых материалов для последующей разработки технологического регламента на проектирование участка сепарации и базового инжиниринга оборудования. В том числе, например, для проектирования газодинамического сепаратора для обогащения роголита при использовании оборотного газа низкого давления в легкой барокамере с получением металлосодержавшего концентрата.

Список источников

1. Тюкин А.П. Разработка комбинированного метода обогащения зернистых материалов с применением технологий аэродинамической и ударной сепарации: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСиС, 2013. 151 с.
2. Тюкин А.П., Юшина Т.И. Математическое моделирование процессов газодинамической сепарации // Цветные металлы. 2020. № 7. С. 9–17.
3. Тюкин А.П. Усовершенствованная детерминированная физико-математическая модель газодинамической сепарации зернистых материалов // Цветные металлы. 2023. № 5. С. 8–13.

4. Киреев В.И., Войновский А.С. Численное моделирование газодинамических течений. М.: Изд-во МАИ, 1991. 254 с.
5. Официальный сайт программного пакета SolidWorks, раздел «Моделирование потоков». <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>. (2024).
6. Steve Grace. Introducing Fluid Dynamics Engineer – The SolidWorks Blog, September 16, 2020. <https://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2020/09/introducing-fluid-dynamics-engineer.html>.
7. Официальный сайт компании Ansys, Inc., раздел «Fluent». <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>. (2024).
8. Shawn Wasserman. ANSYS Fluent 17.0 Introduces New User Interface. – Engineering.com, February 5, 2016. <https://www.engineering.com/story/ansys-fluent-170-introduces-new-user-interface>.
9. Официальный сайт программного пакета FlowVision, раздел «Области применения». <https://flowvision.ru/ru/flowvision-applications/applications-review>. (2024).
10. Коньшин В. Параллельная реализация программного комплекса FlowVision // САПР и графика. 2006. № 12. С. 6–12.
11. List of chemical process simulators. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_chemical_process_simulators. (2024).
12. Официальный сайт компании Metsim International, LLC. <https://metsim.com/products/>. 2024.
13. Официальный сайт университета Куинсленда, Австралия, раздел «Software». <https://jktech.com.au/>. (2024).
14. Соглашение № 20220146 от 25.11.2022 между Правительством РФ и Правительством КНР «О сотрудничестве в области создания Международной научной лунной станции» / Правовой департамент МИД России. https://www.mid.ru/ru/foreign_policy/international_contracts/international_contracts/2_contract/61731/
15. Тюкин А.П. Физико-математическая модель газодинамической сепарации. <https://gasflow.org>. (2024).
16. Шехирев Д.В., Думов А.М., Стрижко В.С. Феноменологический смысл эффективности разделения по Ханкоку-Луйкену и дополнительный критерий эффективности // Обогащение руд. 2010. № 2. С. 31–35.
3. Tugin A.P. An improved deterministic physical and mathematical model of gas dynamic separation of granular materials. Tsvetnie metally [Non-ferrous Metals], 2023;(5):8-13. (In Russ.)
4. Kireev V.I., Vojnovskij A.S. Chislennoe modelirovanie gazodinamicheskikh techenij [Numerical simulation of gas dynamic flows]. Moscow: MAI Publishing House, 1991, 254 p. (In Russ.)
5. Oficialnyj sayt programmnogo paketa SolidWorks, razdel “Modelirovanie potokov” [The official website of the SolidWorks software package, section “Flow modeling”]. Available at: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>. (2024).
6. Steve Grace. Introducing Fluid Dynamics Engineer – The SolidWorks Blog, September 16, 2020. <https://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2020/09/introducing-fluid-dynamics-engineer.html>.
7. Oficialnyj sayt kompanii Ansys, Inc., razdel “Fluent” [The official website of Ansys, Inc., section “Fluent”]. Available at: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>. (2024).
8. Shawn Wasserman. ANSYS Fluent 17.0 Introduces New User Interface. Engineering.com, February 5, 2016. Available at: <https://www.engineering.com/story/ansys-fluent-170-introduces-new-user-interface>.
9. Oficialnyj sayt programmnogo paketa FlowVision, razdel “Oblasti primeneniya” [The official website of the FlowVision software package, the “Application areas” section]. Available at: <https://flowvision.ru/ru/flowvision-applications/applications-review>. (2024).
10. Konshin V. Parallel implementation of the FlowVision software package. SAPR i grafika [SAPR and graphics], 2006;(12). (In Russ.)
11. List of chemical process simulators. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_chemical_process_simulators, 2024.
12. Oficialnyj sayt kompanii Metsim International, LLC [Official website of Metsim International, LLC]. Available at: <https://metsim.com/products/>. (2024).
13. Oficialnyj sayt universiteta Kuinslenda, Avstraliya, razdel “Software” [Official website of the University of Queensland, Australia, section “Software”], 2024. Available at: <https://jktech.com.au/>.
14. Soglashenie № 20220146 ot 25.11.2022 mezhdru Pravitelstvom RF i Pravitelstvom KNR “O sotrudnichestve v oblasti sozdaniya Mezhdunarodnoj nauchnoj lunnoj stancii” [Agreement No. 20220146 dated November 25, 2022 between the Government of the Russian Federation and the Government of the People's Republic of China “On cooperation in the field of creating an International scientific Lunar Station”]. Pravovoj departament MID Rossii [Legal Department of the Russian Foreign Ministry]. Available at: https://www.mid.ru/ru/foreign_policy/international_contracts/international_contracts/2_contract/61731/.
15. Tugin A.P. Fiziko-matematicheskaya model gazodinamicheskoy separacii [Physical and mathematical

References

1. Tugin A.P. Razrabotka kombinirovannogo metoda obogasheniya zernistyh materialov s primeneniev tehnologii aerodinamicheskoi i udarnoi separatsii [Development of a combined method of concentration of granular materials using aerodynamic and hit separation technologies]. Moscow: MISiS, 2013, 151 p. (In Russ.)
2. Tugin A.P., Yushina T.I. Mathematical modeling of gas dynamic separation processes. Tsvetnie metally [Non-ferrous Metals], 2020;(7):9-17. (In Russ.)

- model of gas dynamic separation]. Available at: <https://gasflow.org/>. (In Russ.) (2024).
16. Shekhirev D.V., Dumov A.M., Strizhko V.S. The phenomenological meaning of the effectiveness of the Hankok-Luiken separation and an additional criterion of effectiveness. *Obogashenie rud* [Ore concentration], 2010;(2):31-35. (In Russ.)

Поступила 22.07.2024; принята к публикации 18.09.2024; опубликована 24.12.2024

Submitted 22/07/2024; revised 18/09/2024; published 24/12/2024

Тюкин Александр Павлович – кандидат технических наук, соискатель ученой степени доктора технических наук кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, Горный институт НИТУ «МИСиС», Москва, Россия.
Email: TukinAP@yandex.ru

Alexander P. Tukin – PhD (Eng.), Candidate for the degree of Doctor of Technical Sciences, Department of Concentration and Processing of Minerals and Man-made Raw Materials, Institute of Mining of the National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia.
Email: TukinAP@yandex.ru

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ
METAL FORMING

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

УДК 671.777

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-70-80

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
РЕАЛИЗУЕМОСТИ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА
БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ ПРУТКОВ
ИЗ ОТХОДОВ СПЛАВА АД31

Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Парубок А.В., Кузин Д.И.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований процесса бесслитковой прокатки-прессования (БПП) для переработки вторичных отходов прессового производства из сплава АД31. Проведен анализ научно-технической литературы и установлено, что применение совмещенных методов обработки для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов цветных металлов позволяет повысить выход годного металла, обеспечить быстрый переход с одного типоразмера на другой при сравнительно высокой производительности. Поэтому для исследований был выбран метод бесслитковой прокатки-прессования, реализованный на установках для совмещенного литья, прокатки и прессования. На первом этапе исследований определяли реализуемость процесса с помощью аналитического метода баланса мощностей. Для определения энергосиловых параметров была разработана методика с использованием полученных авторами формул. С ее помощью проведен анализ процессов термомодеформационной обработки для получения прутков из сплава АД31 на установках совмещенной обработки СПП-200 и СПП-400 и установлены критические значения сил, действующих на валки и матрицу, моментов прокатки, а также мощности приводных двигателей валков, имеющих закрытый ящичный калибр, для различных условий обработки. Проведены экспериментальные исследования по получению опытных партий прутков диаметром 9 мм из отходов прессового производства сплава АД31 и уточнены технологические параметры процесса бесслитковой прокатки-прессования при прессовании с вытяжкой 4 и 9,7. При этом температура расплава составила $760 \pm 10^\circ\text{C}$, температура закристаллизованной заготовки 520°C , частота вращения валков 5 об/мин, степень деформации при прокатке 50%. Исследования структуры металла показали, что прутки, полученные из отходов прессового производства сплава АД31 методом бесслитковой прокатки-прессования, характеризуются волокнистым мелкозернистым строением. Такая структура позволяет получить высокий уровень пластических и прочностных свойств, которые в горячепрессованном состоянии соответствуют требованиям ГОСТ 21488-97. Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать метод бесслитковой прокатки-прессования для получения из отходов прессового производства из сплава АД31 длинномерных прутков с высоким уровнем прочностных и пластических свойств.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, вторичные отходы, бесслитковая прокатка-прессование, лигатурные прутки, энергосиловые параметры, структура, механические свойства

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда науки в рамках гранта № 24-29-20136.

© Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Парубок А.В., Кузин Д.И., 2024

Для цитирования

Экспериментально-аналитическая оценка реализуемости и энергосиловых параметров процесса бесслитковой прокатки-прессования прутков из отходов сплава АД31 / Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Парубок А.В., Кузин Д.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 70-80. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-70-80>



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

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL ASSESSMENT OF FEASIBILITY AND ENERGY-POWER PARAMETERS OF INGOTLESS ROLLING-EXTRUSION PROCESS OF RODS FROM AD31 ALLOY WASTE

Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Parubok A.V., Kuzin D.I.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The results of analytical and experimental studies of the process of ingotless rolling-extrusion for the processing of secondary waste from the press production of AD31 alloy are presented. The analysis of scientific and technical literature was carried out and it was found that the use of combined processing methods to obtain long-deformed semi-finished products from non-ferrous metal alloys allows to increase the yield of usable metal and to ensure a rapid transition from one standard size to another with relatively high productivity. Therefore, the method of ingotless rolling-extrusion, implemented in units for combined casting, rolling and pressing, was chosen for research. At the first stage of the research, the feasibility of the process was determined using the analytical method of power balance. To determine the energy-power parameters, a technique was developed using the formulas obtained by the authors. With its help, the analysis of thermal deformation treatment processes for obtaining rods from AD31 alloy at the combined processing units SPP-200 and SPP-400 was carried out and the critical values of the forces acting on the rolls and the matrix, mill torque, as well as the power of the drive motors of the rolls having a closed box groove for various processing conditions were established. Experimental studies were carried out to obtain batches of rods with a diameter of 9 mm from waste from the press production of AD31 alloy and the technological parameters of the ingotless rolling-extrusion process during pressing with an extract of 4 and 9.7 were clarified, while the melt temperature was $760 \pm 10^\circ\text{C}$; the temperature of the crystallized workpiece was 520°C ; the rotation frequency of the rolls was 5 rpm; the degree of deformation during rolling was 50%. Studies of the metal structure have shown that the rods obtained from the waste of the press production of the AD31 alloy by the method of ingotless rolling-extrusion are characterized by a fibrous fine-grained structure. This structure allows to obtain a high level of plastic and strength properties, which in the hot-pressed state meet the requirements of GOST 21488-97. Thus, the results of the conducted research allow to recommend the method of ingotless rolling-extrusion for obtaining long-length rods with a high level of strength and plastic properties from the waste of the press production of AD31 alloy.

Keywords: aluminum alloys, secondary waste, ingotless rolling-extrusion, ligature rods, energy-strength parameters, structure, mechanical properties

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and the Krasnoyarsk Regional Science Foundation within the grant No. 24-29-20136.

For citation

Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Parubok A.V., Kuzin D.I. Experimental and Analytical Assessment of Feasibility and Energy-Power Parameters of Ingotless Rolling-Extrusion Process of Rods From AD31 Alloy Waste. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 70-80. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-70-80>

Введение

Анализ научно-технической литературы и результаты проведенных ранее исследований показали, что для переработки отходов прессового производства из алюминиевых сплавов целесообразно использовать совмещенные методы термомодеформационной обработки, которые позволяют получать длинномерные полуфабрикаты с минимальной трудоемкостью и высоким выходом годного [1-12].

Один из способов переработки вторичных отходов в виде стружки предложен в работах [13, 14] для сплавов на основе меди и алюминия. Он дает возможность получать из них прутки и проволоку с помощью методов компактирования, последующей прокатки-прессования брикетированной заготовки и

волочения. Однако он предназначен для мелких фракций и неприменим для крупных отходов.

Для переработки обрезки прессованных профилей авторами предлагается использовать метод бесслитковой прокатки-прессования (БПП) [3]. Суть процесса БПП заключается в получении горячепрессованных длинномерных пресс-изделий при совмещении в одном агрегате операций непрерывного литья, прокатки и прессования. Кристаллизация металла при заливке расплава в калибр вращающихся водоохлаждаемых валков, перекрытом на выходе матрицей, дает возможность обрабатывать металл со знакопеременным нагружением при высоких скоростях и степенях деформации. Поэтому преимуществами этого метода по сравнению с традиционной схемой дискретного или полунепрерывного прессования на горизонтальных

гидравлических прессах [15, 16] (табл. 1), является сравнительно большой выход годного, непрерывность обработки металла, что приводит к увеличению производительности, и небольшая энергоёмкость производства. По сравнению с прокаткой, где возможно применение только небольших обжатий за проход, процесс БПП позволяет осуществить деформацию в одной клети с высокими степенями деформации и возможностью быстрой переналадки инструмента при переходе на другой вид изделия за счет смены матрицы [2], характерными для прессования (см. табл. 1).

Таким образом, использование совмещенных методов термометаллургической обработки позволяет получать длинномерные деформированные полуфабрикаты в виде прутков и проволоки из малопластичных металлов и сплавов с высокими технико-экономическими показателями.

Еще одним из направлений исследований можно считать изучение модифицирующей способности получаемых прутков, так как установлено [1], что при БПП реализуется высокоскоростная кристаллизация-деформация металла, при которой возможно получение ультрамелкой субзернистой структуры металла.

Целью данных исследований, таким образом, является разработка научно-технических решений по созданию технологических основ для получения длинномерных прутков из отходов прессового производства за один цикл обработки, имеющих повышенный уровень пластических характеристик металла за

счет применения высокоскоростной кристаллизации-деформации расплава.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

- установить принципиальную возможность переработки вторичных отходов из сплава за одну операцию на установках совмещенной обработки для получения прутков из сплава АД31, имеющих уровень механических свойств, соответствующий ГОСТ 21488-97;

- разработать методику и выполнить с ее помощью аналитическую оценку процесса БПП с определением количественного показателя реализуемости процесса, установлением температурных и энергосиловых параметров;

- по полученным данным выбрать оборудование для проведения экспериментальных исследований, мощность приводного двигателя которого не превышает паспортных значений;

- провести экспериментальные исследования процесса БПП с целью получения прутков из вторичных отходов прессового производства сплава АД31 и изучить их структуру и механические свойства.

Материалы, оборудование и методы исследования

В качестве материала для исследований по технологии БПП применяли сплав АД31 системы Al-Si-Mg, химический состав приведен в табл. 2.

Таблица 1. Сравнительные показатели технологий получения длинномерных полуфабрикатов из сплавов цветных металлов

Table 1. Comparative indicators of technologies for the production of long-length semi-finished products from non-ferrous metal alloys

Показатель	Технология		
	Прессование	Прокатка	БПП
Непрерывность	Обеспечивает только полунепрерывное прессование со стыковой сваркой профилей	Обеспечивает	Обеспечивает
Состав оборудования	Линия с горизонтальным гидропрессом усилием 8-12,5 МН	15-20 и более клетей	Одна клеть
Габариты оборудования по длине	До 80 м	50-100 м	15-25 м
Энергоёмкость	Индивидуальный привод гидропресса и насосно-аккумуляторной станции	Групповой привод 15-20 прокатных клетей	Индивидуальный привод 1 прокатной клети
Гибкость перехода от одного типа профиля к другому	Обеспечивается быстрой сменой прессового инструмента	Катанка круглого сечения диаметром от 9 до 15 мм	Обеспечивается быстрой сменой прессового инструмента
Выход годного	75-77%	80-85%	90-95%
Производительность	До 1 т/ч	2,5-5 т/ч	2,5-8 т/ч

Таблица 2. Химический состав экспериментального алюминиевого сплава АД31

Table 2. Chemical composition of the experimental aluminum alloy AD31

Массовая доля элемента, %										
Si	Mg	Fe	Mn	Cu	Cr	Zn	V	Ti	B	Al
0,49	0,52	0,32	0,024	0,028	0,005	0,024	0,011	0,0110	0,0005	основа

Для реализации процесса бесслитковой прокатки-прессования предлагается использовать метод бесслитковой прокатки-прессования [1] и устройство (рис. 1) по патенту [3].

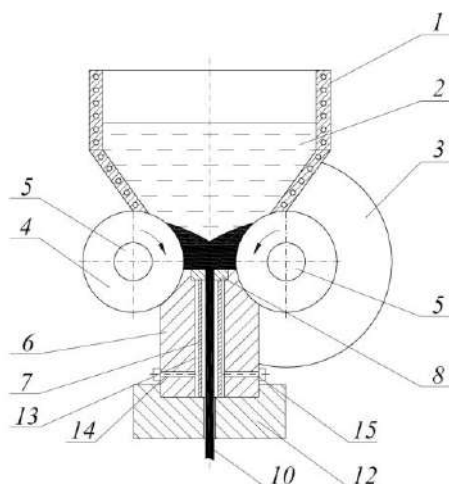


Рис. 1. Устройство для бесслитковой прокатки-прессования по патенту [3]:

1 – печь-миксер; 2 – расплав металла; 3 – валок с ручьем; 4 – валок с выступом; 5 – полости для охлаждения валков; 6 – водоохлаждаемая матрица; 7 – трубка; 8 – железуграфитовая вставка; 9 – рабочий канал матрицы; 10 – пресс-изделие; 11 – калибрующий пояс матрицы; 12 – матрицедержатель; 13 – водоохлаждаемые каналы; 14, 15 – каналы для подвода и отвода хладагента

Fig. 1. A device for ingotless rolling-extrusion according to the patent [3]: 1 is a holding furnace; 2 is a metal melt; 3 is a grooved roll; 4 is a roll with a protrusion; 5 is pots for roll cooling; 6 is a water-cooled matrix; 7 is a tube; 8 is an iron-graphite insert; 9 is a working matrix channel; 10 is press product; 11 is calibration belt of the matrix; 12 is matrix holder; 13 is water-cooled channels; 14, 15 is channels for supply and discharge of refrigerant

Устройство состоит из печи-миксера 1 с расплавом 2, валка 3 с ручьем и валка 4 с выступом, имеющих полости для охлаждения 5, которые образуют закрытый калибр, перекрытый на выходе водоохлаждаемой матрицей 6 с вставкой 8, установленной на матрицедержателе 12. Матрица и валки охлаждаются в процессе работы водой через соответствующие каналы 13-15. На базе этого устройства изготовлены установки совмещенной обработки СПП-200 и СПП-400.

Полученные результаты и их обсуждение

Для оценки реализуемости процесса совмещенной обработки использовали уравнение баланса мощностей, которое для схемы, показанной на рис. 1, можно записать следующим образом:

$$N_a \geq N_p,$$

или

$$N_{тр1} + N_{тр2} \geq N_{деф} + N_{тр3} + N_{тр4},$$

где N_a – мощность, формируемая активными силами трения, действующими на контактной поверхности вращающихся валков с деформируемой заготовкой; N_p – мощность, затрачиваемая на осуществление процесса выдавливания металла через канал матрицы; $N_{тр1}$, $N_{тр2}$ – мощности сил трения, действующих на контактных поверхностях нижнего и верхнего валков; $N_{деф}$ – мощность, затрачиваемая на деформацию металла при прокатке; $N_{тр3}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на границе упругой и пластической зон перед матрицей; $N_{тр4}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на матрице.

В качестве критерия оценки реализуемости процесса принят коэффициент K_N , рассчитываемый с запасом 10% по формуле

$$K_N = \frac{N_a}{1,1N_p}. \quad (1)$$

Расчет критерия реализуемости процесса БПП выполнен для условий обработки сплава АД31 на двух установках – СПП-200 и СПП-400. Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3. Исходные данные для расчетов
Table 3. Source data for calculations

Показатели	Величина	
	СПП-200	СПП-400
Диаметр валка с выступом, мм	214	385
Диаметр валка с канавкой, мм	164	385
Размеры заготовки, мм	14×14	20×20
Высота зеркала матрицы, мм	17	27,4
Ширина калибра, мм	15	22,5
Вытяжка при прессовании	4	9,7
Усилие гидropriжима матрицы, кН	300	350
Мощность двигателя, кВт	14	40
Частота вращения валков, об/мин	5	
Диаметр матрицы, мм	9	
Коэффициент обжатия при прокатке, %	50	
Показатель трения по закону Зибеля	0,9	
Температура расплава, °С	760±10	
Начальная температура заготовки, °С	520	
Начальная температура инструмента, °С	20	
Начальное сопротивление металла деформации (для сил, действующих на валки P_1 , P_2 , $P_{вал}$), МПа	25	
Конечное сопротивление металла деформации, МПа	40	
Среднее сопротивление металла деформации (для силы, действующей на матрицу P_m), МПа	32,5	

Приведенная выше методика более подробно приведена в статье [17], при этом разработана программа в Excel и с ее помощью выполнены расчеты реализуемости процесса совмещенной обработки для алюминиевых сплавов.

На рис. 2 представлены результаты расчета коэффициента K_N для различных значений показателей трения на валках ψ_B и матрице ψ_M , отражающих возможные условия трения на контакте деформируемого металла с инструментом.

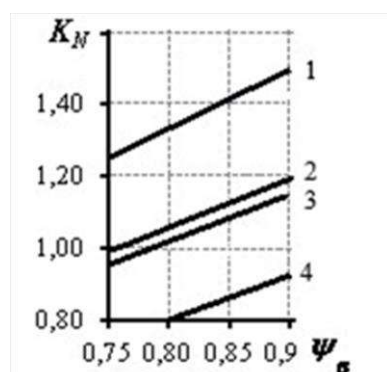


Рис. 2. Значения коэффициента запаса мощности K_N для установок СПП-200 (1, 2) и СПП-400 (3, 4) при различных условиях трения на валках и матрице для сплава АД31:

1, 3 – $\psi_M = 0,75$; 2, 4 – $\psi_M = 1,0$

Fig. 2. The values of the power reserve coefficient K_N for the SPP-200 (1, 2) and SP-400 (3, 4) installations under different friction conditions on the rolls and matrix for the AD31 alloy:

1, 3 – $\psi_M = 0,75$; 2, 4 – $\psi_M = 1,0$

Анализ полученных данных показывает, что реализуемость процесса совмещенной обработки зависит от диаметра валков и размеров калибра, причем чем они меньше (см. рис. 2, линии 1, 2), тем выше реализуемость. При этом запас при максимальных значениях показателя трения ψ_B составляет от 20 до 40%. Возможности реализации процесса БПП на установке СПП-400 (см. рис. 2, линии 3, 4) значительно ниже, причем достичь реализуемости порядка 20% удастся только при максимальных показателях трения на валках и минимальных показателях на матрице. Установлено, что при величине показателя трения на матрице $\psi_M = 1,0$ для установки СПП-400 при ширине калибра 22,5 мм и обжати при прокатке 50% процесс даже при максимальном трении на валках неосуществим во всем диапазоне показателей трения на инструменте.

Таким образом, необходимо снижать трение на калибрующем пояске матрицы (например, применяя смазку) и добиваться максимального трения на валках (например, за счет предварительного заалюминивания контактных поверхностей валков). Эти выводы подтверждены данными экспериментальных исследо-

ваний, проведенных на установках совмещенной обработки [1, 2] при заданных параметрах, и свидетельствовали об устойчивой реализации процесса БПП для обработки алюминиевых сплавов.

Для определения энергосиловых параметров процесса БПП и выбора мощности приводного электродвигателя использовали методику, изложенную в работах [1, 2]. В соответствии с ней для расчета энергосиловых параметров совмещенной прокатки-прессования принята схема обработки закристаллизовавшейся в валках заготовки (рис. 3).

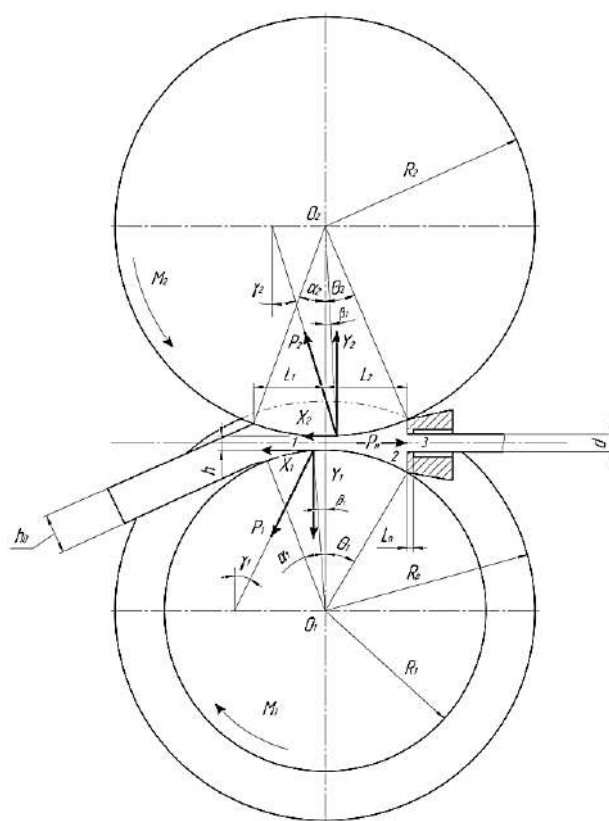


Рис. 3. Схема сил и моментов, действующих от металла на валки в процессе совмещенной обработки

Fig. 3. Diagram of forces and moments acting from the metal on the rolls during combined processing

Силу, действующую на валки, можно найти по выражению

$$P_{\text{вал}} = \tau (F_1 + F_2), \quad (2)$$

где $\tau = \psi \cdot \sigma_s$ – значение напряжения контактного трения (ψ – показатель трения по Зибелю; σ_s – сопротивление металла деформации); F_1, F_2 – площади контакта валков с металлом соответственно для нижнего валка с канавкой и верхнего валка с выступом.

$$F_1 = 0,0349 (\alpha_1 + \theta_1) R_1 (b + 2h),$$

$$F_2 = 0,0349 (\alpha_2 + \theta_2) R_2 b,$$

где b – ширина калибра; h – высота калибра в наименьшем сечении; $\alpha_1, \theta_1, \alpha_2, \theta_2$ – углы, ограничившие очаг деформации (см. **рис. 3**).

Для определения контактной площади при прокатке необходимо найти величину L_1 (см. **рис. 3**) и соответствующий ей центральный угол α (угол захвата), зная величину абсолютного обжатия $\Delta h = h_0 - h$:

$$L_1 = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2}. \quad (3)$$

Отсюда центральный угол α равен

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\Delta h}{2R}\right)^2}. \quad (4)$$

Для определения контактной площади в зоне распрессовки необходимо найти величину L_2 (см. **рис. 2**) и соответствующий ей центральный угол θ , которые характеризуют удаленность зеркала матрицы от плоскости, проходящей через оси вращения валков [2].

$$\sin \theta = \frac{L_2}{R}. \quad (5)$$

В соответствии с принятой схемой очага деформации (см. **рис. 2**) формула для расчета силы, действующей на нижний валок с канавкой радиусом R_1 , будет выглядеть следующим образом:

$$P_1 = 0,0349 \psi \sigma_s (\alpha_1 + \theta_1) R_1 (b + 2h). \quad (6)$$

Для второго валка с выступом выражение для силы, действующей на верхний валок с выступом радиусом R_2 , запишется как

$$P_2 = 0,0349 \psi \sigma_s (\alpha_2 + \theta_2) R_2 b. \quad (7)$$

При условии, что $R_1 = R_2 = R$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ и $\theta_1 = \theta_2 = \theta$, формула для определения силы, действующей на валки, упрощается и имеет следующий вид:

$$P_b = 0,07 \psi \sigma_s (\alpha + \theta) R (b + h). \quad (8)$$

Силу, действующую на матрицу, рекомендуется определять по формуле Л.Г. Степанского [18], имеющую следующий вид:

$$P_m = 2,577 \sigma_{ср} F_m \ln \mu + 3,14 \sigma_{ср} \mu r_m L_m, \quad (9)$$

где μ – коэффициент вытяжки при прессовании; F_m – площадь распрессованной заготовки; r_m – радиус калибрующего отверстия матрицы; L_m – величина рабочего пояска матрицы; $\sigma_{ср} = 0,5(\sigma_{сн} + \sigma_{ск})$ – среднее сопротивление деформации в зоне прессования, среднее сопротивление деформации, где $\sigma_{сн}$ – начальное сопротивление деформации; $\sigma_{ск}$ – конечное сопротивление деформации.

Крутящие моменты можно определить следующим образом (см. **рис. 2**):

– для валка с канавкой радиусом R_1

$$M_{p1} = P_1 R_1 \sin (\gamma_1 + \beta_1); \quad (10)$$

– для валка с выступом радиусом R_2

$$M_{p2} = P_2 R_2 \sin (\gamma_2 + \beta_2). \quad (11)$$

Момент двигателя прокатного стана $M_{дв}$ рассчитывают по формуле А.И. Целикова [19]:

$$M_{дв} = M_p / \eta_{пр}, \quad (12)$$

где M_p – расчетный момент двигателя, Н; $\eta_{пр} = 0,5-0,7$ – коэффициент полезного действия (КПД) в линии главного привода прокатной установки, учитывающий потери энергии на трение в муфтах, шпинделях, узлах их уравнивания и в редукторе.

Скорость вращения валков n_b рассчитывают по формуле

$$n_b = \frac{n_{дв}}{i}, \quad (13)$$

где $n_{дв}$ – скорость вращения ротора двигателя, об/мин; i – передаточное число редуктора.

Мощность двигателя прокатного стана $N_{дв}$, Вт, определяется как

$$N_{дв} = M_{дв} \cdot \omega_b, \quad (14)$$

где $M_{дв}$ – момент двигателя прокатной установки, Н·м; ω_b – угловая скорость вращения валков, с⁻¹.

$$\omega_b = \frac{\pi \cdot n_b}{30}. \quad (15)$$

С учетом рекомендуемого при выборе двигателей прокатных станов запаса [19, 20], составляющего 25%, мощность двигателя определяют по выражению

$$N_{дв} = 1,25 M_{дв} \omega_b = 1,25 (M_p / \eta_{пр}) \omega_b. \quad (16)$$

С использованием представленной выше методики разработана программа в Excel, и с использованием исходных данных **табл. 4** определены энергосиловые параметры процесса БПП для получения прутков из отходов алюминиевого сплава АД31 и выбрана мощность двигателя для установки.

Расчеты по приведенной выше методике были произведены для условий прокатки-прессования сплава АД31 для двух установок СПП-200 и СПП-400 (см. **табл. 3**). Результаты расчетов приведены в **табл. 4**.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что мощность двигателя для проведения экспериментальных исследований не превышает допустимых значений для выбранных установок (см. **табл. 3**). Анализ распределения сил и моментов на валках показывает различие в них для валка с канавкой и валка с выступом. При этом эти параметры вы-

ше для вала с канавкой, так как площадь контакта металла с инструментом в этом случае существенно разнится. Сила, действующая на матрицу, не превышает допустимого усилия гидроприжима (см. табл. 3), что позволяет при заданной величине вытяжки при прессовании гарантировать отсутствие «уса» и проникновение его между валами и матрицей.

На основании полученных данных аналитических расчетов спроектирован инструмент и выбраны технологические параметры для проведения экспериментальных исследований по получению прутков диаметром 9 мм из обрезки прессованных профилей сплава АД31 (рис. 4, а). В итоге получили пруток

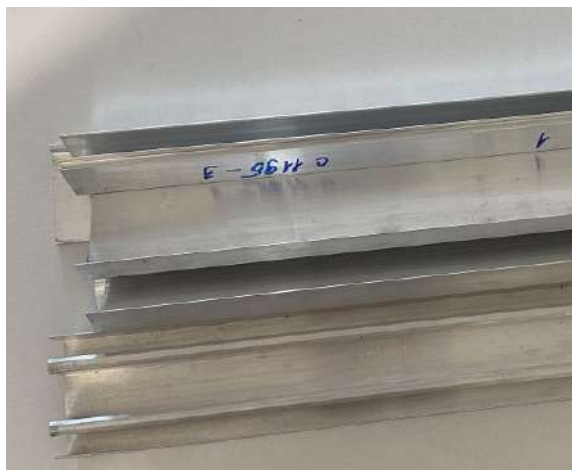
диаметром 9 мм, длиной более 30 м, который был смотан в бухту (рис. 4, б).

В соответствии с методикой проведения эксперимента из имеющихся профилей (см. рис. 4, а) готовили расплав и при температуре $760 \pm 10^\circ\text{C}$ заливали его во вращающиеся валки линии бесслитковой прокатки-прессования, один из вариантов которой показан на рис. 5. Закристаллизовавшаяся заготовка при температуре 520°C обжималась валками с обжатием 50% и после распрессовки под действием активных сил трения выдавливалась в виде прутка круглого поперечного сечения через калибрующее отверстие матрицы диаметром 9 мм.

Таблица 4. Энергосиловые параметры процесса БПП

Table 4. Energy-power parameters of the ingotless rolling-extrusion process

Показатели	Величина	
	СПП-200	СПП-400
Площадь контакта с металлом для нижнего вала F_1 , мм ²	2885,7	8814,9
Площадь контакта с металлом для верхнего вала F_2 , мм ²	1703,5	4666,7
Угол α , градусов	16,8	13,1
Угол θ , градусов	14,7	17,8
Сила, действующая на нижний валок P_1 , кН	64,9	198,3
Сила, действующая на верхний валок P_2 , кН	38,3	105,0
Сила, действующая на валки $P_{\text{вал}}$, кН	103,3	303,3
Сила, действующая на матрицу $P_{\text{м}}$, кН	35,2	130,7
Крутящий момент M_1 , кН·м	2,7	19,1
Крутящий момент M_2 , кН·м	2,1	10,1
Крутящий момент M , кН·м	4,8	29,2
Мощность двигателя для нижнего вала, кВт	2,8	18,6
Мощность двигателя для верхнего вала, кВт	2,2	9,0
Мощность двигателя, кВт	5,0	27,6



а



б

Рис. 4. Вид отходов в виде обрезки прессованных профилей (а) и бухта пресс-изделий (б) из сплава АД31, полученных бесслитковой прокаткой-прессованием

Fig. 4. The type of waste in the form of cuttings of pressed profiles (a) and a coil of press products (b) made of alloy AD31 obtained by ingotless rolling-extrusion

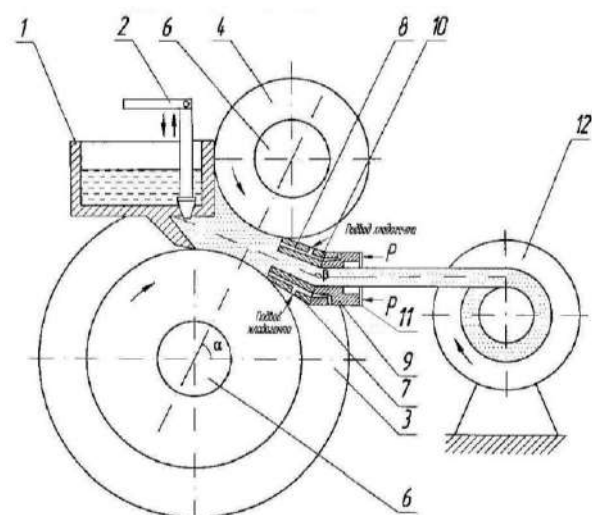


Рис. 5. Общий вид линии бесслитковой прокатки-прессования: 1 – печь-миксер; 2 – регулятор литниковой системы; 3 – валок с ручьем; 4 – валок с выступом; 5 – станина; 6 – полости для охлаждения валков; 7 – форкамера; 8 – каналы для охлаждения форкамеры; 9 – матрица; 10 – полости для охлаждения матрицы; 11 – гидравлический прижим; 12 – устройство приемки пресс-изделия, 13 – нажимное устройство; 14 – пластины; 15 – ролики

Fig. 5. General view of the ingotless rolling-extrusion line: 1 is a holding furnace; 2 is a gating system regulator; 3 is a grooved roll; 4 is a roll with a protrusion; 5 is a bed; 6 is pots for roll cooling; 7 is a pre-chamber; 8 is channels for cooling the pre-chamber; 9 is a matrix; 10 is pots for cooling the matrix; 11 is hydraulic clamp; 12 is press product acceptance device, 13 is screwdown; 14 is plates; 15 is rollers

Технологические параметры процесса БПП для установки СПП-400 были следующими:

- температура расплава $760 \pm 10^\circ\text{C}$;
- температура инструмента 20°C ;
- частота вращения валков 5 об/мин;
- степень деформации при прокатке 50%;
- вытяжка при прессовании 9,7.

В табл. 5 приведены результаты экспериментов по определению энергосиловых параметров процесса БПП для сплава АД31 в сравнении с данными, полученными аналитическим расчетом. Их анализ позволяет сделать вывод о достаточной сходимости экспериментальных и расчетных данных, а небольшое различие вызвано расхождением в данных по сопротивлению деформации металла.

Результаты исследования механических свойств прутков, полученных методом БПП, приведены в табл. 6 в сравнении с требованиями ГОСТ.

Анализ механических свойств прутков из сплава АД31, полученных по технологии БПП из отходов прессового производства, показал, что их свойства в горячепрессованном состоянии соответствуют требованиям существующего стандарта. При этом пластические свойства прутка, полученного БПП, превышают требования стандарта более чем в два раза.

Исследование микроструктуры прутка, полученного по технологии БПП из вторичных отходов сплава АД31, показало, что в структуре на фоне алюминиевого твердого раствора располагаются мелкие частицы избыточных фаз, расположенные в строчки по направлению деформации, либо образуют скопления (рис. 6, а), при этом формируется устойчивая мелкозернистая структура [1]. Исследование образцов в поляризованном свете позволило установить, что структура прутка, полученного по технологии БПП, характеризуется волокнистым строением (рис. 6, б).

Таблица 5. Энергосиловые параметры процесса БПП для сплава АД31

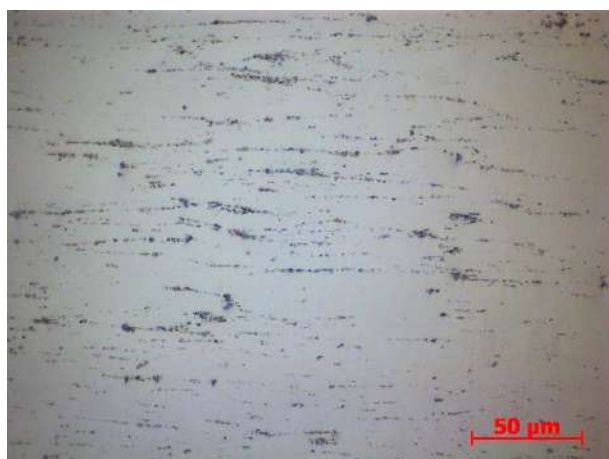
Table 5. Energy-power parameters of the ingotless rolling-extrusion process for the AD31 alloy

P_v		P_m		M_{v1}		M_{v2}	
расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
СПП-400							
303,3	285	130,7	154	19,1	17,2	10,1	9,6
СПП-200							
103,3	78,6	35,2	32,3	2,7	3,3	2,1	1,6

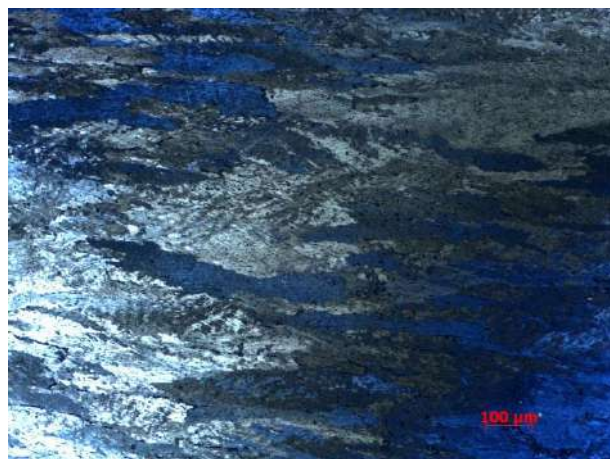
Таблица 6. Механические свойства прутков, полученных БПП и по ГОСТ 21488-97

Table 6. Mechanical properties of rods obtained by ingotless rolling-extrusion and according to the state standard GOST 21488-97

Характеристика	БПП	ГОСТ 21488-97
Условный предел текучести, МПа	86 ± 2	60
Временное сопротивление, МПа	127 ± 2	90
Относительное удлинение, %	35 ± 1	15



а



б

Рис. 6. Микроструктура прутков диаметром 9 мм из сплава АД31:

а – светлое поле, $\times 500$; б – поляризованный свет, $\times 100$

Fig. 6. Microstructure of rods with a diameter of 9 mm made of AD31 alloy

a is light field, $\times 500$; б is polarized light, $\times 100$

Заключение

Таким образом, по результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- по разработанной методике определены параметры и выбрано оборудование для проведения экспериментальных исследований, а также проверены ограничения по мощности приводного двигателя для используемых установок совмещенной обработки металла;

- установлена принципиальная возможность изготовления за один цикл обработки на установках совмещенной обработки прутков из вторичных отходов прессового производства с требуемым стандартом уровнем механических свойств;

- получены новые данные по структуре и механическим свойствам деформированных полуфабрикатов из вторичных отходов прессового производства сплава АД31 при реализации процесса БПП;

- на основании полученных результатов исследований сделан вывод о возможности получения из отходов в виде обрезки прессованных профилей из сплава АД31 качественных деформированных полуфабрикатов в виде длинномерных прутков с высоким уровнем прочностных и пластических свойств.

Список источников

1. Особенности структурообразования и свойства металла при высокоскоростной кристаллизации–деформации и модифицировании алюминиевых сплавов: монография / Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Довженко Н.Н., Дроздова Т.Н. и др. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 180 с.
2. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обра-

ботки цветных металлов и сплавов: монография. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.

3. Пат. 2724758. Российская Федерация. Устройство для бесслитковой прокатки и прессования металла / Сидельников С.Б., Старцев А.А., Гильманшина Т.Р. и др., опубл. 25.06.2020, бюл. №18.
4. Непрерывное литье–прессование цветных металлов / В.М. Сергеев, Ю.В. Горохов, В.В. Соболев и др. М.: Metallurgia, 1990.
5. Сальников А.В., Стелов А.В., Мотков М.М. Производство катанки из твердых алюминиевых сплавов методом совмещенной прокатки–прессования // Цветные металлы и минералы: сборник докладов Девятого международного конгресса. Красноярск, 11–15 сентября 2017 года. Красноярск, 2017. С. 674–681.
6. Salnikov A., Heinzel C. The Combined Method for Producing Long Products from Aluminium and Aluminium Alloys // Minerals, Metals and Materials Series. This link is disabled., 2021, vol. 6, pp. 291–298.
7. Heinzel C., Salnikov C.A., Müller S. Experimental and Numerical Examinations Regarding the Material Flow of Combined Rolling Extrusion Process // Minerals, Metals and Materials Series. This link is disabled., 2021, vol. 6, pp. 158–162.
8. Strategy tasks of the Russian metallurgical complex / Sizyakov V.M., Vlasov A.A., Bazhin V.Y. // Tsvetnye Metally. 2016, no. 1, pp. 32–37.
9. Сизяков В.М., Бажин В.Ю., Власов А.А. Состояние и перспективы развития производства алюминия // Металлург. 2010. №7. С. 2–6.
10. Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш., Николаев В.А. Совмещенные процессы литья и деформации металлов. М.: Изд-во МГОУ, 2009.
11. Shatalov R.L., Genkin A.L. Operating a sheet-rolling complex to minimize energy costs // Metallurgist. 2008, 52 (9–10), pp. 485–490.

12. Улучшение качества поверхности низколегированных цинковых полос при отливке заготовки в двухвалковую форму и прокатке на четырехвалковом стане 400 / Р.Л. Шаталов, А. М. Кац, М.В. Кудин и др. // Цветные металлы. 2002. № 10. С. 76-81.
13. Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих отходов сплавов алюминия: монография / Н.Н. Загиров, Ю.Н. Логинов, С.Б. Сидельников, Е.В. Иванов. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019.
14. Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н. Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих стружковых отходов меди и ее сплавов методами обработки давлением: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015.
15. Саха П.К. Технология прессования алюминия. М.: НП «АПРАЛ», 2015.
16. Щерба В.Н. Прессование алюминиевых сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001.
17. Расчетно-экспериментальная оценка условия реализации процесса совмещенной прокатки-прессования с использованием метода баланса мощностей / Н.Н. Загиров, Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, В.М. Беспалов // Цветная металлургия. Известия высших учебных заведений. 2016. №1. С. 19–25.
18. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1979.
19. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. М.: Металлургия, 1980.
20. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов. М.: Металлургия, 1987.
5. Salnikov A.V., Strelov A.V., Motkov M.M. Production of wire rods from hard aluminum alloys by combined rolling-pressing. *Cvetnye metally i mineraly: sbornik dokladov Devyatogo mezhdunarodnogo kongressa* [Non-ferrous metals and minerals. Proceedings of the 9th International Congress]. Krasnoyarsk, 2017;674-677. (In Russ.)
6. Salnikov A., Heinzel C. The Combined Method for Producing Long Products from Aluminium and Aluminium Alloys. *Minerals, Metals and Materials Series*. 2021;6:291-298.
7. Heinzel C., Salnikov A., Müller S. Experimental and Numerical Examinations Regarding the Material Flow of Combined Rolling Extrusion Process. *Minerals, Metals and Materials Series*. 2021;6:158-162.
8. Sizyakov V.M., Vlasov A.A., Bazhin V.Y. Strategy tasks of the Russian metallurgical complex. *Tsvetnye Metally*. 2016;(1):32-37.
9. Sizyakov V.M., Bazhin V.Yu., Vlasov A.A. The state and prospects of development of aluminum production. *Metallurg* [Metallurgist], 2010;(7):2-6.
10. Shatalov R.L., Boshamdjiev N.S., Nikolaev V.A. *Sovmeshchennye processy litya i deformacii metallov* [Combined processes of casting and deformation of metals]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 2009. (In Russ.)
11. Shatalov, R.L., Genkin, A.L. Operating a sheet-rolling complex to minimize energy costs. *Metallurgist*, 2008;52(9-10):485-490.
12. Shatalov, R.L., Kats, A.M., Kudin et al. Improvement of surface quality of low-alloy zinc strips upon billet casting into two-roll mold and rolling in four-high mill 400. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals], 2002;(10):76-81. (In Russ.)
13. Zagirov N.N., Loginov Yu.N., Sidelnikov S.B., Ivanov E.V. *Tekhnologicheskie osnovy polucheniya materialov i izdelij iz syvuchih othodov spлавov alyuminiya: monografiya* [Technological bases of obtaining materials and products from bulk waste of aluminum alloys: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian federal university, 2019. (In Russ.)
14. Zagirov N.N., Loginov Yu.N. *Tekhnologicheskie osnovy polucheniya materialov i izdelij iz syvuchih othodov spлавov alyuminiya: monografiya* [Technological bases for the production of materials and products from bulk chip waste of copper and its alloys by pressure treatment methods: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian federal university, 2015. (In Russ.)
15. Sakha P.K. *Tekhnologiya pressovaniya alyuminiya* [Aluminum pressing technology]. Moscow: NP APRAL, 2015. (In Russ.)
16. Shcherba V.N. *Pressovanie alyuminiyevykh spлавov* [Pressing of aluminum alloys]. Moscow: Internet Engineering, 2001. (In Russ.)
17. Zagirov N.N., Dovzhenko N.N., Sidelnikov S.B., Беспалов V.M. Computational and experimental assessment of the conditions for the implementation of the combined rolling-pressing process using the pow-

References

1. Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Dovzhenko N.N., Drozdova T.N. et al. *Osobennosti strukturoobrazovaniya i svoystva metalla pri vysokoskorostnoj kristallizacii-deformacii i modifizirovaniy alyuminiyevykh spлавov: monografiya* [Features of structure formation and properties of metal during high-speed crystallization-deformation and modification of aluminum alloys: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal District. Univ., 2015, 180 p. (In Russ.)
2. Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Zagirov N.N. *Kombinirovannye i sovmeshchennye metody obrabotki cvetnykh metallov i spлавov: monografiya* [Combined methods of processing non-ferrous metals and alloys: monograph]. Moscow: MAKSS Press, 2005, 344 p. (In Russ.)
3. Sidelnikov S.B., Startsev A.A., Gilmanshina T.R. et al. *Ustrojstvo dlya besslitkovoj prokatki i pressovaniya metalla* [A device for ingotless rolling-extrusion of metal]. Patent RF, no. 2724758, 2006.
4. Sergeev V.M., Gorokhov Yu.V., Sobolev V.V. et al. *Nepreryvnoe lite-pressovanie cvetnykh metallov* [Continuous casting and pressing of non-ferrous metals]. Moscow: Metallurgy, 1990. (In Russ.)

- er balance method. *Tsvetnaya metallurgiya. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij* [Non-ferrous metallurgy. Proceedings of higher educational institutions], 2016;(1):19-25. (In Russ.)
18. Stepanyuk L.G. *Raschety processov obrabotki metallov davleniem* [Calculations of metalworking processes by pressure]. Moscow: Mashinostroenie, 1979. (In Russ.)
19. Tselikov A.I., Nikitin G.S., Rokotyan S.E. *Teoriya prodolnoj prokatki* [Theory of longitudinal rolling]. Moscow: Metallurgy, 1980. (In Russ.)
20. Korolev A.A. *Mekhanicheskoe oborudovanie prokatnyh i trubnyh cekhov* [Mechanical equipment of rolling and pipe shops]. Moscow: Metallurgy, 1987. (In Russ.)

Поступила 03.06.2024; принята к публикации 01.07.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 03/06/2024; revised 01/07/2024; published 24/12/2024

Сидельников Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: sbs270359@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5611-2808

Лопатина Екатерина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: eslopatina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1604-1857,

Парубок Андрей Васильевич – аспирант,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: andrej.parubok@yandex.ru. ORCID 0009-0009-1032-4301

Кузин Дмитрий Игоревич – студент магистратуры,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: 255417@bk.ru

Sergey B. Sidelnikov – DrSc (Eng.), Professor,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: sbs270359@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5611-2808

Ekaterina S. Lopatina – PhD (Eng.), Associate Professor,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: eslopatina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1604-1857

Andrey V. Parubok – Postgraduate Student,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: andrej.parubok@yandex.ru. ORCID 0009-0009-1032-4301

Dmitry I. Kusin – Master's Student,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: 255417@bk.ru



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

УДК 66-932.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-81-88

ВЛИЯНИЕ АСИММЕТРИЧНОЙ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ПЛАСТИЧНОСТЬ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Барышникова А.М., Носов Л.В., Барышников П.М.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). При разработке новых технологических решений, направленных на улучшение качества металлопродукции, сокращение производственных затрат и повышение производительности, исследователи сталкиваются с рядом ограничений, касающихся совершенствования технологических процессов производства. Так, при обработке ленты из низкоуглеродистых сталей марок 08пс, 10, 20 и т.п. существует проблема заниженных начальных толщин горячекатаного подката, которую возможно урегулировать путём увеличения технологической пластичности проката во время холодной деформации. Это, в свою очередь, скажется на росте производительности широкополосного стана горячей прокатки. **Цель работы.** Определить рациональные параметры процесса асимметричной прокатки ленты из сталей 08пс и 20, обеспечивающие увеличение технологической пластичности материала во время холодной прокатки. **Используемые методы.** Экспериментальные исследования асимметричной прокатки лент из сталей марок 08пс и 20 проводили на уникальной научной установке – промышленно-лабораторном стане асимметричной прокатки 400. Отношение скоростей рабочих валков V_1/V_2 устанавливали равным 1,25 и 5. **Результат.** Показано, что при асимметричной прокатке ленты из стали 08пс конечной толщины 1 мм при $V_1/V_2 = 1,25$ возможно увеличить толщину подката в 1,7 раза. При производстве ленты из стали 20 конечной толщины 2 мм возможно увеличить толщину подката в 1,5 раза. При увеличении отношения скоростей валков до 5 наблюдается одновременное снижение усилия прокатки в 2,58 раза и увеличение относительного обжатия с 62 до 80%. **Практическая значимость.** Результаты исследований могут использоваться для создания новых технологических схем производства лент из низкоуглеродистых сталей (08пс, 10, 20) на станах холодной прокатки, имеющих в своем составе клетки с индивидуальным приводом рабочих валков.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, горячекатаный подкат, асимметричная холодная прокатка, усилие прокатки, волокнистая структура

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, соглашение № 24-19-20026 от 12.04.2024, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>

© Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Барышникова А.М., Носов Л.В., Барышников П.М., 2024

Для цитирования

Влияние асимметричной холодной прокатки на технологическую пластичность низкоуглеродистых сталей / Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Барышникова А.М., Носов Л.В., Барышников П.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 81-88. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-81-88>



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

THE EFFECT OF ASYMMETRIC COLD ROLLING ON THE TECHNOLOGICAL PLASTICITY OF LOW-CARBON STEELS

Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Baryshnikova A.M., Nosov L.V., Baryshnikov P.M.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). During developing new technological solutions aimed at improving the quality of metal products, reducing production costs and increasing productivity, researchers face a number of limitations related to the improvement of technological production processes. Thus, when processing a strip of low-carbon steels 08ps, 10, 20, etc., there is a problem of underestimated initial thicknesses of semi-finished hot rolled products, which can be resolved by increasing the technological plasticity of the rolled product during cold deformation. This, for its part, will affect the growth of the productivity of the wide-strip hot rolling mill. **Objectives.** Defining the rational parameters of the process of asymmetric rolling of a strip of 08ps and 20 steels, ensuring an increase in the technological plasticity of the material during cold rolling is required. **Methods Applied.** Experimental studies of asymmetric rolling of strips of 08ps and 20 steels were carried out on a large-scale research facility, such as the industrial and laboratory asymmetric rolling mill 400. The rolls speed ratio V_1/V_2 was set equal to 1,25 and 5. **Result.** It is shown that with asymmetric rolling of a strip of 08ps steel of 1 mm final thickness at $V_1/V_2 = 1,25$, it is possible to increase the thickness of the semi-finished hot rolled products by 1,7 times. When producing a strip of steel 20 of 2 mm final thickness, it is possible to increase the semi-finished hot rolled products thickness by 1,5 times. With an increase in the rolls speed ratio to 5, a simultaneous decrease in the rolling force by 2,58 times and an increase in the relative reduction from 62% to 80% are observed. **Practical Relevance.** The research results can be used to create new technological schemes for the production of strips from low-carbon steels (08ps, 10, 20) on cold rolling mills that include stands with individual drives for the working rolls.

Keywords: low-carbon steel, semi-finished hot rolled products, asymmetric cold rolling, rolling force, fibrous structure

The research was carried out with the support of Russian Science Foundation (agreement No. 24-19-20026 dated December 04, 2024). Available at: <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>

For citation

Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Baryshnikova A.M., Nosov L.V., Baryshnikov P.M. The Effect of Asymmetric Cold Rolling on the Technological Plasticity of Low-Carbon Steels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 81-88. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-81-88>

Введение

На сегодняшний день все технологические решения в области прокатного производства направлены в первую очередь на сокращение производственных затрат, повышение производительности и улучшение качества продукции. Однако при разработке таких предложений инженеры и учёные зачастую сталкиваются с рядом ограничений. Так, например, осуществление нескольких (3–4) технологических циклов «прокатка-отжиг» при выпуске ленты из высокоуглеродистых сталей марок 65Г, 70, 80 и т.п. на станах холодной прокатки приводит к существенному увеличению затрат, которые возможно значительно снизить [1]. Ещё одна проблема связана с производством металлопроката из низкоуглеродистых сталей марок 08пс, 10, 20 и т.п. Выявлено, что при повышении технологической пластичности данных стальных сплавов во время холодной прокатки достижимо уменьшить входную толщину горячекатаного подката. Это, в свою очередь, позволит повысить производительность широкополосного стана горячей прокат-

ки. Коллективом лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» была разработана и опробована на стане холодной прокатки технологическая схема производства высокоуглеродистой ленты, предусматривающая сокращение от одного до двух технологических циклов «прокатка-отжиг», что существенно снизило остроту первой проблемы и сделало решение второй проблемы особенно актуальным и научно значимым.

Стоит отметить, что одним из наиболее перспективных способов повышения технологической пластичности является процесс асимметричной прокатки. 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 [2, 3], кинематический [4], поверхностный, физико-механический, контактный, температурный.

Первое упоминание об асимметричной прокатке было сделано Д.С. Разуваевым в СССР в 1940 году [5]. Он предложил способ прокатки металлов с использованием скоростной асимметрии при определённых соотношениях окружных скоростей рабочих валков. До сих пор наиболее технологичным и управляемым видом асимметрии считается именно кинематическая. Первое теоретическое описание процесса асимметричной обработки было сделано Е. Зибелем, Г. Заксом и Л. Клиггером, Е. Гофманом. Среди отечественных авторов, развивающих процессы асимметричной прокатки, можно выделить А.И. Целикова, А.А. Королева, А.И. Гришкова.

В 50–60-х годах прошлого столетия были проведены первые лабораторные и промышленные эксперименты по использованию асимметричной деформации. В 70–90-е годы XX века исследование процессов асимметричной прокатки было в основном направлено на улучшение геометрии листа и снижение силы деформирования при холодной и горячей прокатке. С 1990-х годов получил развитие новый подход в исследовании процессов асимметричной прокатки, уделяющий внимание структуре и механическим свойствам металлов и сплавов [6, 7].

Очевидно, что при наличии индивидуального привода рабочих валков промышленного прокатного стана появляется возможность использования технологий асимметричной прокатки при различных скоростях рабочих валков одинакового диаметра (в данном случае оба валка будут приводными) [8, 9]. Показано, что для процесса, представленного в данной работе, степень асимметрии определялась отношением окружных скоростей рабочих валков (V_1 и V_2). Рассмотрено производство ленты из низкоуглеродистых марок сталей, которое включает в себя следующие технологические операции: производство горячекатаного подката толщиной 2–7 мм, укрупнение и продольная резка горячекатаных рулонов, травление и промывка полос, холодная прокатка ленты до толщин 0,5–4,5 мм, отжиг в колпаковых печах, дрессировка и продольная резка на требуемые типоразмеры. Представлено исследование увеличения технологической пластичности ленты при холодной асимметричной прокатке для оценки возможного изменения толщин горячекатаного подката и, соответственно, производительности широкополосного стана горячей прокатки.

Таблица 1. Химический состав стали 08пс, мас. %
Table 1. The chemical composition of steel 08ps, wt. %

C	Si	Cu	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Ti	W	V
0,080	0,175	0,080	0,380	0,013	0,025	0,023	0,020	0,045	0,034	<0,001	<0,001	<0,001

Таблица 2. Химический состав стали 20, мас. %
Table 2. The chemical composition of steel 20, wt. %

C	Si	Cu	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Ti	W	V
0,210	0,175	0,080	0,430	0,013	0,025	0,023	0,020	0,039	0,034	<0,001	<0,001	<0,001

Материалы и методы исследования

В качестве материалов для исследования были использованы низкоуглеродистые стали марок 08пс и 20. Химический состав указанных сплавов приведен в соответствии с ГОСТ 1050—2013 в табл. 1 и 2.

Экспериментальные исследования возможности увеличения технологической пластичности проката из низкоуглеродистых сталей марок 08пс и 20 и, как следствие, изменения толщин горячекатаного подката для производства ленты проводились на промышленно-лабораторном стане 400 асимметричной прокатки лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Указанный стан является уникальной научной установкой (УНУ) [10]. УНУ признаются объекты научной инфраструктуры, не имеющие аналогов в России либо существенно отличающиеся по параметрам и назначению от имеющихся аналогов и востребованные со стороны научного сообщества. В соответствии с этим стан имеет индивидуальный привод рабочих валков для реализации процессов асимметричной прокатки при максимально возможном отношении скоростей рабочих валков $V_1/V_2=10/1$. Предельно допустимое усилие прокатки 2500 кН (250 тс) и крутящие моменты 2×65000 Н·м, что обеспечивает возможность получения полноразмерных опытных металлических образцов [11].

Осуществлялись симметричная и асимметричная прокатки с коэффициентом асимметрии равным 1,25 ($V_1/V_2=1,25$). Начальная толщина образцов горячекатаного подката – 4 мм (для стали марки 08пс) и 5 мм (для стали марки 20), начальная ширина всех образцов – 100 мм. Конечная толщина ленты после пяти проходов, полученная для обеих марок, составила 1 мм. Прокатка проводилась с применением смазки.

Во втором этапе исследования увеличивалось отношение скоростей валков (до $V_1/V_2=5$) и значения относительных обжатий при прокатке стали марки 08пс. Начальная толщина образцов была такой же, как в предыдущих экспериментах, – 4 мм, начальная ширина составила 25 мм. Прокатку образцов осуществляли при комнатной температуре за один проход как в симметричном, так и асимметричном режимах, без смазки.

Для исследования микроструктуры лент из низкоуглеродистых сталей марок 08пс и 20 после симметричной и асимметричной прокаток были подготовлены шлифы. Приготовление шлифа проводилось с использованием запрессовки образцов в смолу «Transoptic» на автоматическом прессе Simplimet 1000 на линии пробоподготовки фирмы Buechler. Для выявления микроструктуры поверхность шлифа подвергалась травлению в 4 %-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом.

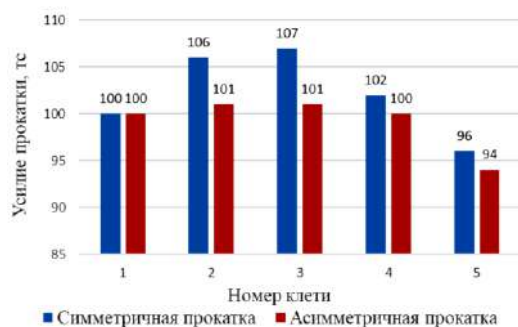
Комплекс металлографических исследований проведен с использованием оптического микроскопа Zeiss Axio Observer. Количественный анализ микроструктуры выполняли с помощью программного комплекса Thixomet PRO, для этого изображение микроструктуры с помощью цифровой видеокамеры вводили в систему Thixomet PRO и затем анализировали с применением специализированных программ в режиме ручных измерений [12].

Механические свойства образцов определяли на испытательной машине Shimadzu Servopulser U-type: произведены замеры временного сопротивления, предела текучести, а также относительного удлинения.

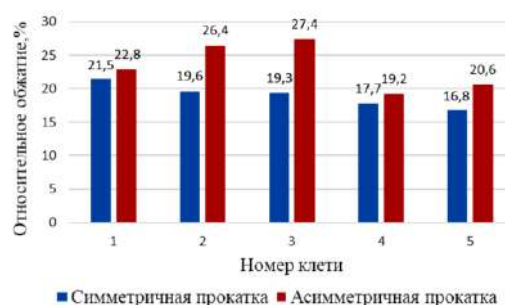
Полученные результаты и их обсуждение

Стандартный режим симметричной прокатки ленты из стали марки 08пс предполагает получение готовой продукции толщиной 1 мм из горячекатаного подката толщиной 2,8 мм. Предлагаемый режим асимметричной прокатки позволяет получать ленту толщиной 1 мм при измененной толщине горячекатаного подката равной 5 мм. Соответственно, замена существующего симметричного режима на предлагаемый асимметричный позволит использовать подкат повышенной толщины для производства ленты из низкоуглеродистых сталей. Эффект увеличения технологической пластичности на примере холодной прокатки стали марки 08пс позволяет предположить увеличение производительности широкополосного стана горячей прокатки (как поставщика горячекатаного подката) на 44%. Также из представленных на **рис. 1** гистограмм видно, что при асимметричной прокатке одновременно снижается усилие прокатки и увеличивается относительное обжатие.

На **рис. 2** представлена микроструктура стали 08пс после симметричной и асимметричной прокаток. В обоих случаях по всему сечению формируется волокнистая структура, характерная для холоднокатаной тонколистовой стали.



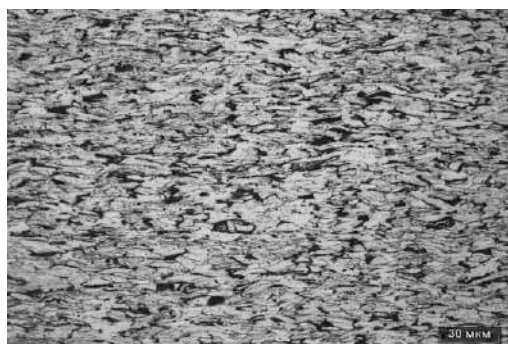
а



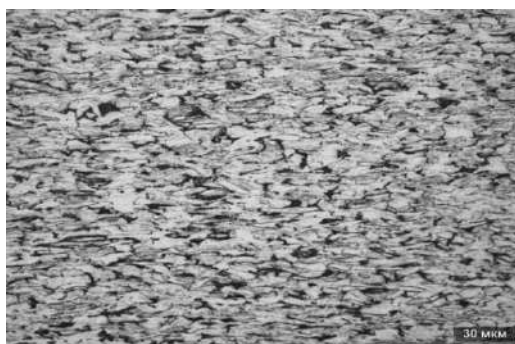
б

Рис. 1. Распределение усилия прокатки и относительных обжатий по клетям при симметричном и асимметричном режимах прокатки стали 08пс: а – распределение усилия прокатки по клетям; б – распределение относительных обжатий по клетям

Fig. 1. Distribution of rolling forces and relative reductions by stands for symmetric and asymmetric rolling modes of 08ps steel: а is distribution of rolling forces by stands; б is distribution of relative reductions by stands



а



б

Рис. 2. Микроструктуры стали 08пс после симметричной (а) и асимметричной (б) прокаток, $\times 500$

Fig. 2. Microstructures of 08ps steel after symmetric (а) and asymmetric rolling (б), $\times 500$

Проведенные испытания ленты из стали марки 08пс на растяжение после симметричной и асимметричной прокатки показали результаты, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Результаты испытаний на растяжение стали марки 08пс после симметричной и асимметричной прокатки

Table 3. The results of tensile tests of 08ps steel after symmetric and asymmetric rolling

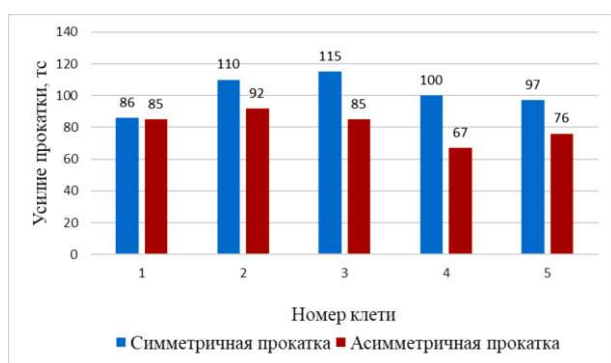
Параметр	Результат после симметричной прокатки	Результат после асимметричной прокатки
Временное сопротивление σ_b , МПа	773	884
Предел текучести σ_t , МПа	712	761
Относительное удлинение δ , %	3,5	3,3

Аналогичные исследования были проведены для стали марки 20. Стандартный режим симметричной прокатки предполагает получение ленты из указан-

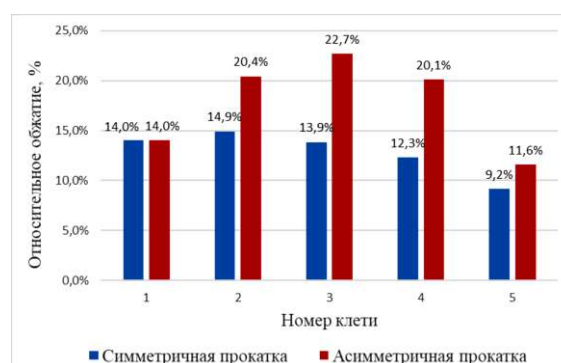
ной стали толщиной 2 мм из горячекатаного подката толщиной 4 мм. При асимметричной прокатке возможно получать ленту с такой же толщиной 2 мм, но при толщине горячекатаного подката 6 мм. В данном случае эффект увеличения технологической пластичности на примере холодной прокатки стали марки 20 позволяет предположить увеличение производительности широкополосного стана горячей прокатки (как поставщика горячекатаного подката) на 33%. Гистограммы, представленные на рис. 3, также подтверждают одновременное снижение усилия прокатки и увеличение значений относительных обжатий при асимметричной обработке.

На рис. 4 представлена структура стали 20 после симметричной и асимметричной прокатки. В обоих случаях по всему сечению формируется волокнистая структура, характерная для холоднокатаной тонколистовой стали.

Проведенные испытания ленты из стали марки 20 на растяжение после симметричной и асимметричной прокатки показали результаты, представленные в табл. 4.



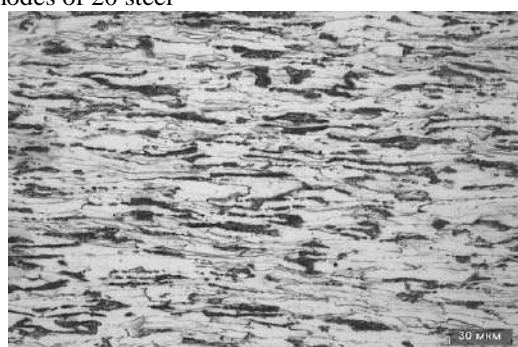
а



б

Рис. 3. Распределение усилия прокатки (а) и относительных обжатий (б) по клетям при симметричном и асимметричном режимах прокатки стали марки 20

Fig. 3. Distribution of rolling forces (а) and relative reductions (б) by stands for symmetric and asymmetric rolling modes of 20 steel



а



б

Рис. 4. Микроструктура стали 20 после симметричной (а) и асимметричной (б) прокатки, $\times 500$

Fig. 4. Microstructure of 20 steel after symmetric (а) and asymmetric (б) rolling, $\times 500$

Таблица 4. Результаты испытаний на растяжение стали марки 20 после симметричной и асимметричной прокатки

Table 4. The results of tensile tests of 20 steel after symmetric and asymmetric rolling

Параметр	Результат после симметричной прокатки	Результат после асимметричной прокатки
Временное сопротивление σ_b , МПа	703	729
Предел текучести σ_t , МПа	652	658
Относительное удлинение δ , %	4,5	4,8

Следует отметить, что приведённые микроструктуры и механические свойства нельзя оценивать так же, как свойства готовой продукции, полученной в производственных условиях, так как после холодной прокатки на предприятии лента проходит операцию рекристаллизационного отжига.

Исследование асимметричной прокатки стали марки 08пс при увеличении отношения скоростей рабочих валков ($V_1/V_2=5$) при прочих равных условиях показало одновременное повышение значений относительных обжатий с 62 до 80% и снижение усилия прокатки в 2,58 раза за один проход (по сравнению с симметричным случаем). Более того, при таком отношении скоростей рабочих валков (в асимметричном ре-

жиме) формируется ультрамелкозернистая градиентная микроструктура, представленная на рис. 5.

Заключение

Таким образом, по результатам выполненных исследований определены рациональные параметры процесса асимметричной прокатки ленты из сталей 08пс и 20, обеспечивающие увеличение технологической пластичности материала во время холодной прокатки. Это, в свою очередь, позволит повысить толщину горячекатаного подката, что в свою очередь приведет к возрастанию производительности станов горячей прокатки. Так, при асимметричной прокатке с коэффициентом отношения скоростей рабочих валков равным 1,25 ленты из стали 08пс конечной толщины 1 мм возможно увеличить толщину подката в 1,7 раза. При производстве ленты из стали 20 конечной толщины 2 мм возможно увеличить толщину подката в 1,5 раза. При этом микроструктура и механические свойства после асимметричной прокатки не изменяются значительно в сравнении с результатами симметричной прокатки.

Исследование асимметричной прокатки стали 08пс при отношении скоростей рабочих валков равным 5 наблюдается одновременное увеличение значений относительных обжатий с 62 до 80%, а также уменьшение усилия прокатки в 2,58 раза за один проход по сравнению с симметричной прокаткой. При прокатке в асимметричном режиме формируется ультрамелкозернистая структура.

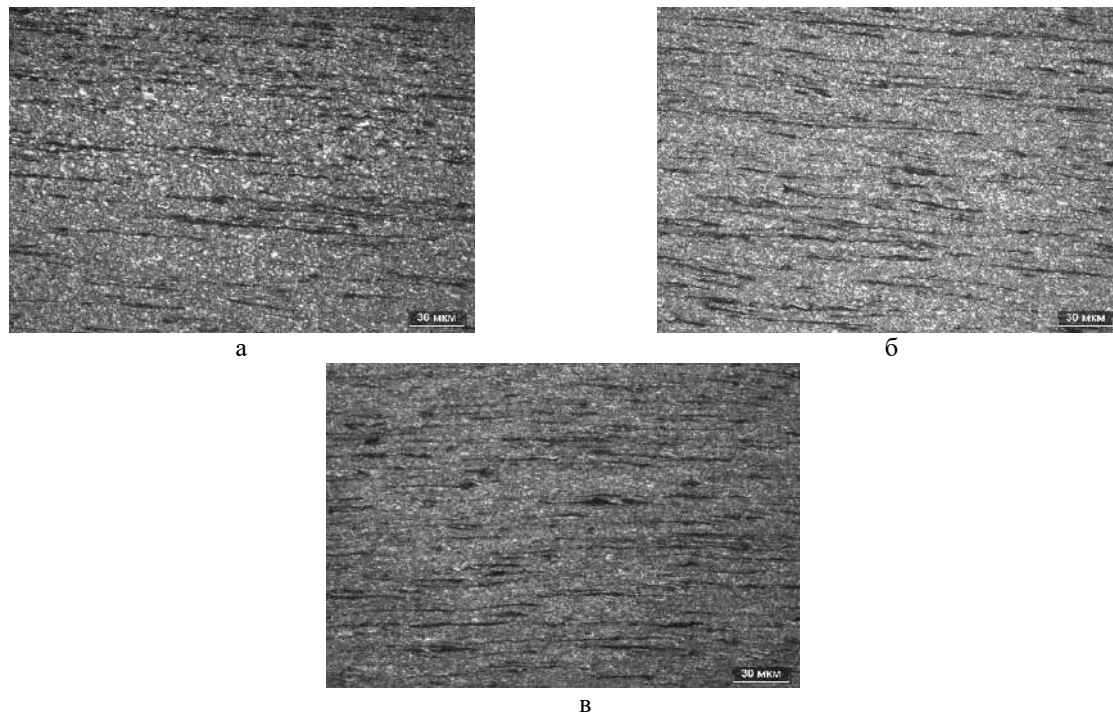


Рис. 5. Микроструктура стали 08пс после асимметричной прокатки при отношении скоростей рабочих валков равным 5: а – верхняя часть сечения, $\times 500$; б – середина сечения, $\times 500$; в – нижняя часть сечения, $\times 500$

Fig. 5. The microstructure of 08ps steel after asymmetric rolling with a coefficient of speed rolls ratio equal to 5:

a is the upper part of the section, $\times 500$; б is the middle of the section, $\times 500$; в is the lower part of the section, $\times 500$

Список источников

1. Экспериментальное опробование технологии асимметричной холодной прокатки ленты из высокоуглеродистых марок сталей для исключения операций промежуточного отжига / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, А.И. Сверчков, Г.П. Корнилов // Черные металлы. 2022. № 11. С. 28-35. DOI 10.17580/chm.2022.11.03. – EDN FWNDLG.
2. Исследование влияния скоростной асимметрии на параметры различных процессов листовой прокатки / А.М. Песин, Х. Дыя, А. Кавалек, П. Сжинский, Д.О. Пустовойтов, А.В. Сатонин, А.С. Чуруканов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 86-91.
3. Ашкеев Ж.А., Андреященко В.А., Буканов Ж.У. Исследование процесса несимметричной прокатки заготовок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 4. С. 27-35.
4. Синицын В.Г. Теоретическое обоснование снижения энергосиловых параметров при несимметричной прокатке // Известия вузов. Черная металлургия. 1974. №3. С. 69-72.
5. А.с. 63448 СССР. Способ прокатки металлов / Д.С.Разуваев. – № 30746; заявл. 19.03.1940; опубл. 30.04.1944.
6. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2020. Т. 20. № 3. С. 81-96.
7. Анализ известных публикаций по асимметричной прокатке, опубликованных в ScienceDirect за последние 20 лет / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, А.Е. Кожемякина, М.Ю. Фомин, Д.М. Потапцев // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 78-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск, 2020. С. 175.
8. Сайдахмедов Р.Х., Бахадиров К.Г. Асимметричная прокатка – перспективная технология получения листовых металлов с ультрамелкозернистой структурой // Современные инновации в науке и технике: сб. науч. тр. 8-й Всерос. науч.-техн. конф.; Юго-Западный государственный университет. Курск, 2018. С. 206-208.
9. A review of asymmetric rolling / J. Kraner, T. Smolar, D. Volšak, P. Cvahte, M. Godec, I. Paulin // Materials and technology. 2020. P. 731-743.
10. Экспериментальный реверсивный стан дуо листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков // Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации. Портал НТИРФ. Каталог ЦКП и УНУ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/3206908> (дата обращения 25.10.2024).
11. Возможности стана 400 асимметричной прокатки и роботизированного комплекса КУКА 160 / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, М.П. Барышников, О.Д. Би-

рюкова, А.Е. Кожемякина, Л.В. Носов, Д.В. Грачев // Механическое оборудование металлургических заводов. 2021. № 1 (16). С. 9-13.

12. Формирование ультрамелкозернистой структуры стали 08Ю при асимметричной прокатке с рассогласованием скоростей рабочих валков / Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Л.В. Носов, А.М. Барышников // Технологии металлургии, машиностроения и материалобработки. 2022. № 21. С. 83-92.

References

1. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Sverchkov A.I., Kornilov G.P. Experimental testing of the technology of asymmetric cold rolling of strip from high-carbon steel grades to exclude intermediate annealing operations. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2022;(11):28-35. (In Russ.) doi: 10.17580 / chm.2022.11.03. EDN FWNDLG.
2. Pesin A.M., Dyaa H., Kavalek A., Szhinsky P., Pustovoytov D.O., Satonin A.V., Churukanov A.S. Study of the influence of speed asymmetry on the parameters of various sheet rolling processes. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of the Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014;(1(45)):86-91. (In Russ.)
3. Ashkeyev Zh.A., Andreishchenko V.A., Bukanov Zh.U. Study of the process of asymmetric rolling of blanks. *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics], 2020;(4):27-35. (In Russ.)
4. Sinitsyn V.G. Theoretical substantiation of reducing the energy-power parameters during asymmetric rolling. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Bulletin of universities. Ferrous metallurgy], 1974;(3):69-72. (In Russ.)
5. Razuvaev D.S. Method of rolling metals. Author's certificate USSR, No. 63448; No. 30746. Applied: 19.03.1940. Published: 30.04.1944.
6. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Kozhemyakina A.E. Asymmetric rolling of sheets and strips: history and development prospects. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy], 2020;20(3):81-96. (In Russ.)
7. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Kozhemyakina A.E., Fomin M.Yu., Potaptsev D.M. Analysis of known publications on asymmetric rolling published in ScienceDirect over the past 20 years. *Aktualnye problem sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 78-j mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Actual problems of modern science, technology and education. Proceedings of the 78th international scientific and technical conference]. Magnitogorsk, 2020, pp. 175. (In Russ.)
8. Saidakhmedov R.Kh., Bakhadirov K.G. Asymmetric rolling – a promising technology for producing sheet metals with an ultrafine-grained structure. *Sovremennye*

- innovacii v nauke i tekhnike: sb. nauch. tr. 8-j Vseross. nauch.-tekhn. konf.* [Modern innovations in science and technology: proceedings of the 8th All-Russian scientific and technical conference]. The Southwest State University, Kursk, 2018, pp. 206-208. (In Russ.)
9. Kraner J., Smolar T., Volšak D., Cvahte P., Godec M., Paulin I. A review of asymmetric rolling. *Materials and technology*. 2020:731-743.
 10. Experimental reversible duo sheet rolling mill with individual drive of work rolls. *Nauchno-tekhnologicheskaya infrastruktura Rossijskoj Federacii* [Scientific and technological infrastructure of the Russian Federation]. Available at: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/3206908> (Accessed October 25, 2024).
 11. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Baryshnikov M.P., Biryukova O.D., Kozhemyakina A.E., Nosov L.V., Grachev D.V. Capabilities of the 400 asymmetric rolling mill and the KUKA 160 robotic complex. *Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov* [Mechanical equipment of metallurgical plants], 2021;(1(16)):9-13. (In Russ.)
 12. Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Nosov L.V., Baryshnikova A.M. Formation of an ultrafine-grained structure of 08Yu steel during asymmetric rolling with a mismatch in the speeds of the work rolls. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroeniya i materialoobrabotki* [Technologies of metallurgy, mechanical engineering and materials processing], 2022;(21):83-92. (In Russ.)

Поступила 11.11.2024; принята к публикации 15.11.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 11/11/2024; revised 15/11/2024; published 24/12/2024

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

Пустовойтов Денис Олегович – кандидат технических наук, доцент,
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 научный сотрудник,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: fimapatisonchik@inbox.ru. ORCID 0000-0002-3922-9289

Барышникова Анна Михайловна – аспирант, инженер,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: anyabar1999@mail.ru. ORCID 0000-0003-2406-4095

Носов Леонид Васильевич – аспирант, инженер,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: nosov.leopold@yandex.ru. ORCID 0009-0001-8081-2603

Барышников Павел Михайлович – студент бакалавриата,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: pavelbar26@mail.ru.

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

Denis O. Pustovoytov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: pustovoitov_den@mail.ru. ORCID 0000-0003-0496-0976

Olesya D. Biryukova – PhD (Eng.), Senior Researcher,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: fimapatisonchik@inbox.ru. ORCID 0000-0002-3922-9289

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

Leonid V. Nosov – Postgraduate Student, Engineer,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: nosov.leopold@yandex.ru. ORCID 0009-0001-8081-2603

Pavel M. Baryshnikov – Bachelor Student,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: pavelbar26@mail.ru.



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

УДК 621.77

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-89-97

СКОРОСТНАЯ АСИММЕТРИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ КРУГЛОЙ ЗАГОТОВКИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВАЛКАХ

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

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

Аннотация. Выполнен литературный обзор работ по асимметричной прокатке круглой заготовки на гладких валках в двух- и четырехвалковых калибрах. Изучен и обобщен опыт применения высокоскоростной асимметричной листовой прокатки. Обоснована целесообразность разработки процессов сортовой асимметричной прокатки. Разработана математическая конечно-элементная модель плющения в программном комплексе Deform-3d. Расчет выполнен для условия плющения круглой заготовки диаметром 12,1 мм на размер 8,0 мм с изменяемым соотношением скорости вращения валков от 1 до 5. Проведены аналитические исследования, которые показали, что с увеличением соотношения скоростей валков снижается усилие прокатки и повышается значение накопленной степени деформации по сечению заготовки. Более высокий уровень накопленной степени деформации отмечается в заготовке со стороны валка, имеющего большую скорость. Построены графики распределения накопленной степени деформации. Приведены поля напряженного состояния для рассматриваемых вариантов плющения, в которых наблюдается увеличение доли сдвиговых напряжений и снижение растягивающих напряжений при увеличении соотношения скоростей вращения валков. На стане 400 в лаборатории механики градиентных наноматериалов имени А.П. Жилиева проведены экспериментальные исследования по скоростной асимметричной прокатке круглых образцов диаметром 12,1 мм. Проведены замеры твердости и давления металла на валки. Показано, что с увеличением соотношения скоростей валков повышается твердость и снижается усилие прокатки. Причем повышенную твердость имеет поверхность образцов со стороны контакта с валком, имеющим более высокую скорость вращения. Полученные результаты использованы при разработке технического задания на проектирование четырехвалковой клетки с индивидуальным приводом валков.

Ключевые слова: скоростное асимметричное плющение, многовалковая прокатка, моделирование, напряженное состояние, деформированное состояние, твердость, давление

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

© Харитонов В.А., Усанов М.Ю., Локотунина Н.М., Песин И.А., Мелихов Е.Д., 2024

Для цитирования

Скоростная асимметрия при холодной прокатке круглой заготовки в цилиндрических валках / Харитонов В.А., Усанов М.Ю., Локотунина Н.М., Песин И.А., Мелихов Е.Д. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 89-97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-89-97>



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

SPEED ASYMMETRY DURING COLD ROLLING OF ROUND BLANKS IN CYLINDRICAL ROLLS

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

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. A literary review of papers describing asymmetric rolling of round blanks on smooth rolls in two and four-roll passes has been completed. The experience of using high-speed asymmetric sheet rolling has been studied and generalized. The feasibility of developing processes of sorted asymmetric rolling has been substantiated. A mathematical finite element model of flattening in the Deform-3d software has been developed. The calculation has been done for the conditions of flattening a round blank with a diameter of 12.1 mm to a size of 8.0 mm with a variable ratio of the rotational speed of the rolls from 1 to 5. Analytical studies have been completed, which have shown that as the ratio of roll speeds increases, the rolling force decreases, and the accumulated level of deformation along the section of the blank increases. A higher level of accumulated deformation is noted in the blank on the side of the roll having a higher speed. Distribution diagrams of the accumulated deformation have been built. Stress fields are given for the considered flattening options in which an increase in the proportion of shear stresses and a decrease in tensile stresses with an increase in the ratio of the rotational speeds of the rolls are observed. Experimental studies of high-speed asymmetric rolling of round samples with a diameter of 12.1 mm were carried out at the mill 400 in the A.P. Zhilyaev laboratory of mechanics of gradient nanomaterials. Hardness measurements and metal pressure on the rolls were recorded. It was shown that as the roll speed ratio increases, hardness rises and rolling force decreases. Moreover, the surface of the samples in contact with the faster rotating roll exhibits increased hardness. The results obtained were used in the development of technical specifications for the design of a four-roll stand with an individual roller drive.

Keywords: high-speed asymmetric flattening, multi-roll rolling, modeling, stress state, strain state, hardness, pressure

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

For citation

Kharitonov V.A., Usanov M.Yu., Lokotunina N.M., Pesin I.A., Melikhov E.D. Speed Asymmetry During Cold Rolling of Round Blanks in Cylindrical Rolls. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 89-97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-89-97>

Введение

Среди многих применяемых в настоящее время способов прокатки круглой заготовки в цилиндрических валках (на гладкой бочке) наиболее распространенными являются плющение и прокатка (протяжка) в многовалковых калибрах.

Плющение реализуется путем холодной прокатки (протяжки) круглой заготовки в цилиндрических валках (роликах). Данному способу характерна классическая [1] неравномерность деформации, обусловленная формой заготовки. Обжатия при этом максимальны по оси симметрии и уменьшаются к краям заготовки [1–4].

Прокатка круглой заготовки в многовалковых калибрах (трех- и четырехвалковых) отличается от плющения многосторонностью (объемностью) деформации, но имеет те же закономерности распределения неравномерности обжатия по ширине валка [5]. Следует отметить, что исследования по применению прокатки в многовалковых калибрах для изготовления различных видов продукции, включая проволоку различного назначения, начались в 60-е годы прошлого столетия под руководством заведующего ка-

федрой обработки металлов давлением профессора М.И. Бояршинова, 120-летие которого отмечается в этом году.

Для решения специальных технологических задач часто используют асимметричную прокатку, среди многих реализуемых схем которой выделяется скоростная асимметрия, создаваемая для регулирования процесса деформации, так как, в отличие о других видов асимметрии, его относительно просто регулировать во время деформации. Наиболее распространенным способом реализации скоростной асимметрии является изменение соотношения диаметра валков до 1,7, что позволяет уменьшить усилие прокатки на 10-20% [6].

Первые исследования по применению асимметричного плющения проведены В.М. Салгаником и А.М. Песиным [7] на экспериментальном заводе НИИметиза. Исследовали процесс прокатки ленты и заготовки диаметром 2,05 мм. Деформацию осуществляли в клети дуо с диаметром валков 116 мм. Асимметрию осуществляли путем изменения диаметра верхнего валка. Использовали валки диаметрами 105 и 111 мм. Аналитические и экспериментальные

исследования показали возможность снижения усилия плющения (до 10%) и интенсивности напряжений (на 17-25%). Это позволило существенно снизить вероятность образования трещин на кромках ленты. При этом было отмечено, что увеличение степени асимметрии путем изменения диаметров валков ограничено вероятностью разрушения валков, трещинообразование на кромке ленты интенсивно снижается путем прокатки в эджерных клетях.

Вопросы теории и практики асимметричной холодной прокатки круглой заготовки в четырехвалковом калибре изложены в работах [8–10]. Исследования проводились на специально спроектированной и изготовленной экспериментальной установке. Ее оборудование включает четырехвалковую прокатную клетку кассетного типа, автоматизированный индивидуальный электропривод рабочих валков, гидравлическую систему, грузовое устройство для создания переднего и заднего натяжений и комплект измерительной аппаратуры. Исследовалась холодная прокатка исходной заготовки диаметрами 6,0-11,0 мм (вытяжка $\mu=1,10-1,45$) из сталей 10, 35, 60 по схеме круг-квадрат при различных рассогласованиях окружных скоростей валков. При этом использовались методы планирования эксперимента. Установлено, что рассогласование окружных скоростей пар противоположных валков вызывает увеличение деформации в направлении ведомых валков по всему объему очага деформации, неравномерность при этом снижается.

На ведущих валках давление прокатки практически неизменно при росте уровня рассогласования, так как снижение давления при увеличении промежуточных зон в очаге деформации компенсируется ростом контактных сил трения при увеличении степени пробуксовки на ведомых валках, темп снижения полных давлений определяется протяженностью промежуточной зоны в очаге деформации, поэтому давление прокатки заметно падает с ростом критического угла. Это обеспечивает регулирование формы профилей при прокатке в четырехвалковом калибре путем преимущественного изменения размеров профиля по выбранному направлению.

Таким образом, процесс прокатки с различными окружными скоростями валков, образующих многовалковый калибр, обеспечивает возможность управления кинематикой и структурой очага деформации. Это показывает перспективность практического использования данного процесса как для совершенствования существующих, так и проектирования новых технологических процессов. Это подтверждают и патенты [11, 12].

Исследования влияния режимов асимметричной прокатки стальных листов на структуру, свойства и силовые условия деформации, проведенные в последнее время на уникальном стане 400 в лаборатории механики градиентных наноматериалов имени

А.П. Жилева, показали, что процесс позволяет достичь высокого уровня сдвиговых деформаций [13], обеспечивает формирование градиентной ультрамелкодисперсной структуры в том числе за счет динамической рекристаллизации в условиях разогрева полосы в процессе прокатки до 250–300°C. При этом увеличиваются обжатия с 50 до 80% и уменьшается усилие почти в 3 раза, по сравнению с симметричной прокаткой [14]. Промышленная асимметрия прокатки холоднокатаной ленты, проведенная в условиях действующего производства, позволила исключить из технологического процесса один цикл «прокатка-отжиг» и получить экономию более 108 млн руб. [15]. Все вышесказанное говорит об эффективности скоростной асимметричной прокатки и целесообразности ее использования в сортовом и метизном переделах, прежде всего при плющении и прокатке в многовалковых калибрах.

Целью данной работы является аналитическое и экспериментальное исследование процесса холодной прокатки круглой заготовки на стане асимметричной прокатки.

Материалы и методы исследования

В качестве метода исследования применен комплекс конечно-элементного моделирования Deform-3d. Диаметр валков 340 мм. Заготовка принималась как пластическое тело стали марки 80Р. Длина заготовки 100 мм, диаметр 12,1 мм. Трение принималось по закону Кулона со значением, равным 0,3. Зазор между валками во всех экспериментах постоянный и равен 8,0 мм.

В ходе моделирования изменялась скорость вращения валков и, соответственно, соотношение скоростей (табл. 1).

Таблица 1. Скорости валков и их соотношение
Table 1. Roll speeds and their ratio

Скорость верхнего валка, об/мин	Скорость нижнего валка, об/мин	Соотношение скоростей $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}}$
4	4	1
2,8	5,6	2
3	9	3
2	8	4
2	10	5

Для исследования неравномерности деформации по радиусам исходной заготовки были нанесены точки через 1 град (рис. 1). Точки наносились по радиусам 6,0, 4,5, 3,0, 1,5 и 0 мм.

Для оценки напряженного состояния в Deform-3d построены поля распределения коэффициента жесткости схемы Смирнова-Аляева [16] и поля распределения показателя Лоде-Надаи [17].

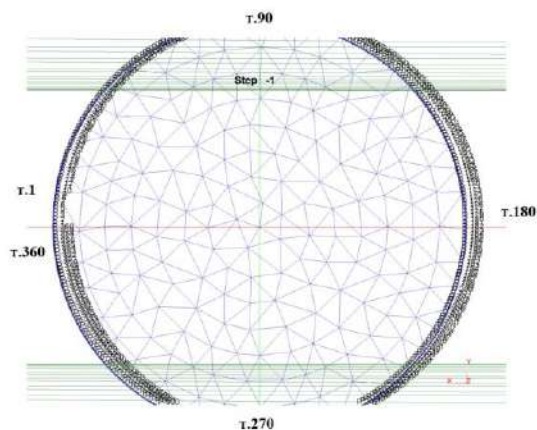


Рис. 1. Схема нанесения точек на заготовку
Fig. 1. Scheme of applying dots to the blank

Полученные результаты и их обсуждение

В результате моделирования и обработки полученных данных были построены графики распределения накопленной степени деформации (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что при симметричной прокатке накопленная деформация распределяется симметрично по сечению под валками (т. 60 и т. 120, т. 240 и т. 300) и максимальное ее значение в поверхности равно 0,52. В то же время в центре наблюдается самая большая накопленная степень деформации 0,6, что говорит о полной проработке центра заготовки.

С увеличением отношения скоростей валков от 2 до 5 значение накопленной деформации в центре заготовки уменьшается до минимальной величины, равной 0,5 при соотношении скоростей $V_{\text{ниж}} / V_{\text{верх}} = 5$ (рис. 2, д).

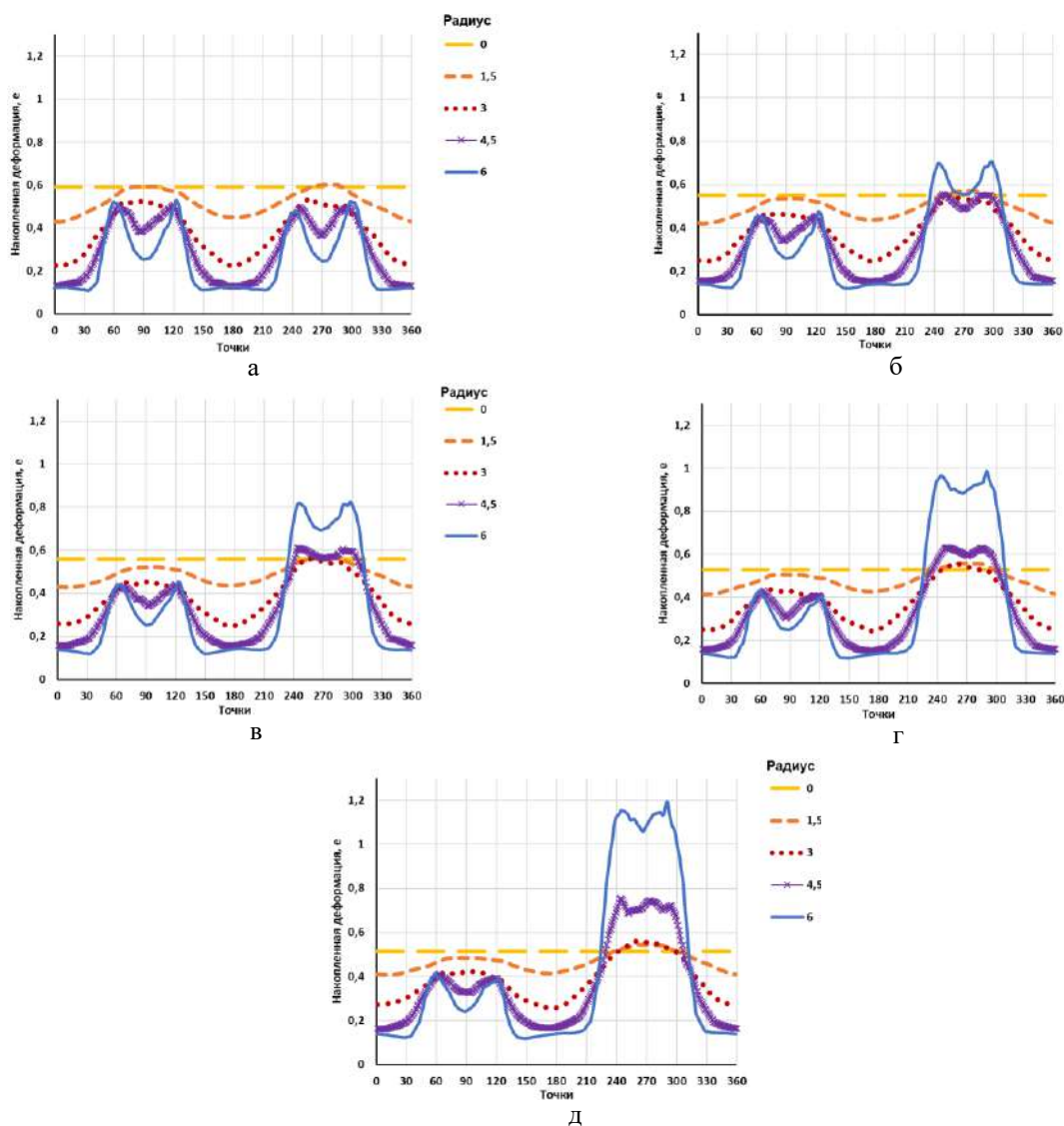


Рис. 2. Распределение накопленной степени деформации по сечению заготовки после прокатки с соотношением скоростей валков: а – $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 1$; б – $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 2$; в – $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 3$; г – $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 4$; д – $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 5$
Fig. 2. The distribution of the accumulated degree of deformation over the section of the blank after rolling with the ratio of roll speeds: а is $V_{\text{low}} / V_{\text{top}} = 1$; б is $V_{\text{low}} / V_{\text{top}} = 2$; в is $V_{\text{low}} / V_{\text{top}} = 3$; г is $V_{\text{low}} / V_{\text{top}} = 4$; д is $V_{\text{low}} / V_{\text{top}} = 5$

С увеличением отношения скоростей валков интенсивно меняется величина накопленной деформации по сечению. Рассмотрим точки т. 60 и т. 120. Они находятся под верхним валком, который вращается с меньшей скоростью. Значение накопленной степени деформации незначительно уменьшается с 0,52 до 0,43 при увеличении соотношения скоростей вращения валков от 2 до 5. В то время как в точках т. 240 и т. 300 накопленная деформация значительно увеличивается с 0,4 до величины 1,2 при соотношении скоростей 5 (рис. 2, б-д).

Минимальное значение накопленной степени деформации, равное 0,18, наблюдается на боковой поверхности заготовки во всех экспериментах вследствие свободного течения металла в ширину.

Повышенная величина деформации в месте контакта с валком, вращающегося с большей скоростью, объясняется сдвиговой деформацией (табл. 2, 3).

Анализ полей распределения коэффициента жесткости Смирнова-Аляева (см. табл. 2) показывает, что с увеличением соотношения скоростей с 1 до 5 наблюдается тенденция к снижению растягивающих напряжений как на входе в очаг деформации, так и на

выходе из него. При этом на выходе из очага деформации величина растягивающих напряжений снижается и увеличивается доля сдвиговых напряжений (белый цвет в табл. 2).

Поля распределения показателя Лодэ-Надаи приведены в табл. 3. Стоит отметить, что в плоскости выхода из очага деформации при равных скоростях на оси заготовки образуется область с растягивающими напряжениями. При увеличении скоростной асимметрии в данной области напряжения переходят в сжимающие. Область со сдвиговыми напряжениями при равных скоростях наблюдается на оси заготовки, посередине очага деформации. Увеличение скорости одного из валков приводит к «диагональному» смещению сдвиговых напряжений по очагу деформации. Со стороны плоскости входа в очаг сдвиговые напряжения сосредоточены ближе к «медленному» валку, а к плоскости выхода из очага деформации ближе к «быстрому» валку. Таким образом, увеличение скорости одного из валков приводит к снижению растягивающих напряжений в очаге деформации и увеличению доли сдвиговых напряжений.

Таблица 2. Поля распределения коэффициента жесткости Смирнова-Аляева
Table 2. Distribution fields of the Smirnov-Alyaev stiffness coefficient

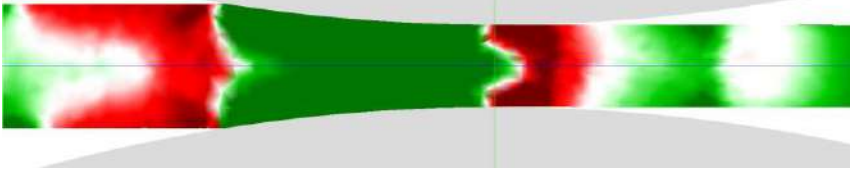



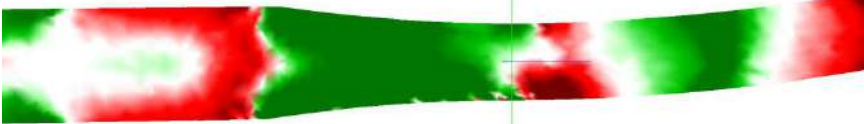

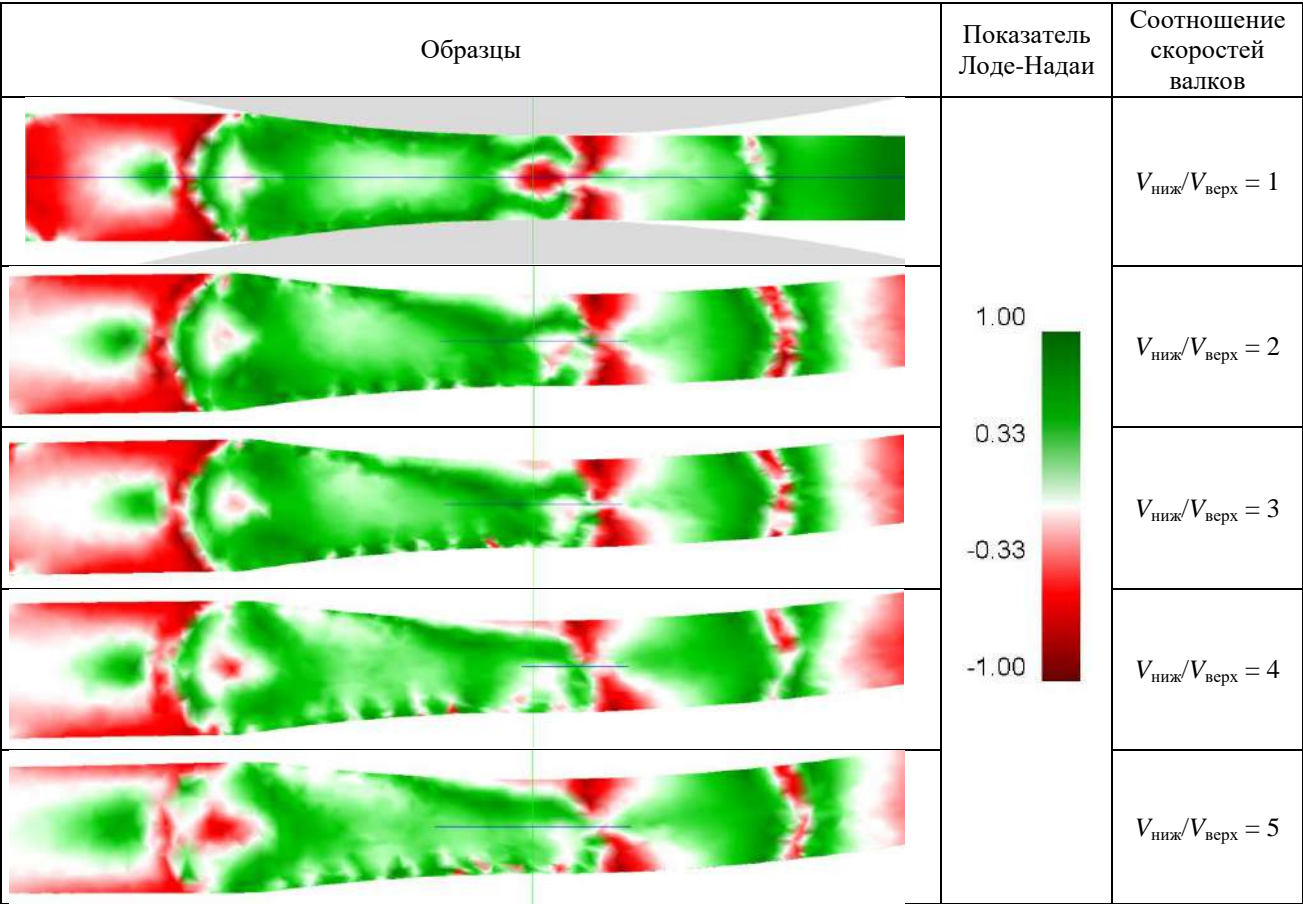
Образцы	Коэффициент жесткости Смирнова-Аляева	Соотношение скоростей валков
		$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 1$
		$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 2$
		$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 3$
		$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 4$
		$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 5$

Таблица 3. Поля распределения показателя Лоде-Надаи
Table 3. Distribution fields of the Lode-Nadai index



Экспериментальные исследования асимметричной прокатки круглой заготовки на гладкой бочке проводились на стане 400. Осуществлялась прокатка круглой заготовки диаметром 12,10 мм из стали марки 20. Исходная твердость (усредненные значения) приведена на **рис. 3**, а на образцах после прокатки – на **рис. 4**. Значения усилия прокатки приведены в **табл. 4**.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что при скоростном асимметричном плющении с увеличением соотношения скоростей валков усилие прокатки снижается. Характер распределения твердости по сечению образцов соответствует результатам, полученным при моделировании.

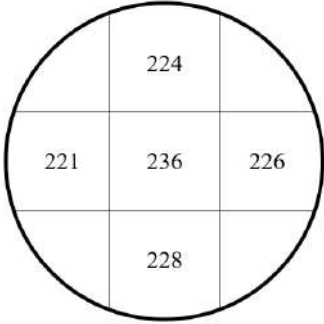


Рис. 3. Твердость исходного образца
Fig. 3. Hardness of the original sample



Рис. 4. Твердость по сечению образцов после прокатки
Fig. 4. Hardness across the cross-section of samples after rolling

Таблица 4. Усилие прокатки
Table 4. Rolling force

Соотношение скоростей валков	Усилие прокатки, т
$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 1$	24,0
$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 2$	22,5
$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 3$	22,0
$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 4$	21,0
$V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 5$	21,0

На экспериментальной установке также проводились исследования прокатки квадрата из круглой заготовки на гладкой бочке в два прохода с кантовкой на 90 град, что моделировало многостороннее обжатие, подобное обжатию круглой заготовки в четырехвалковом калибре (рис. 5).



Рис. 5. Квадратная заготовка, полученная после прокатки круга на гладкой бочке в два прохода с кантовкой

Fig. 5. A square blank obtained after rolling a round billet on smooth rolls in two passes with turning

Полученные в работе аналитические и экспериментальные данные в сочетании с литературными данными и проведением математического моделирования использованы при разработке технического задания на проектирование универсального прокатного четырехвалкового стана с индивидуальным приводом валков.

Заключение

1. На основе литературного обзора по асимметричной прокатке круглой заготовки на гладких валках в двух- и четырехвалковых калибрах, изучения и обобщения опыта применения высокоскоростной асимметричной листовой прокатки обоснована целесообразность применения высокоскоростной асимметричной прокатки круглой заготовки на гладких валках.

2. Разработана математическая модель в Deform-3d, с помощью которой получены и описаны поля

напряженного состояния, построены графики распределения накопленной степени деформации по сечению заготовки. Напряженное состояние характеризуется снижением растягивающих и преобладанием сдвиговых напряжений в очаге деформации по отношению к симметричной прокатке.

3. С целью изучения закономерной высокоскоростной асимметричной прокатки круглой заготовки на гладкой бочке проведены экспериментальные исследования на стане 400 в лаборатории механики градиентных наноматериалов имени А.П. Жилиева. Показано, что с увеличением соотношения скоростей валков происходит уменьшение усилия прокатки и растет доля сдвиговых напряжений.

Список источников

1. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургиздат, 1978. 360 с.
2. Нагорнов В.С. Пластическое течение при низкотемпературной прокатке прутков на гладкой бочке // Производство проката. 2014. № 1. С. 2–11.
3. Joong-Ki Hwang. Deformation behavior of longitudinal surface flaws in flat rolling of steel wire // ISIJ International. 2021, vol. 61, no. 6, pp. 1935–1945.
4. Joong-Ki Hwang. Strain hardening rate dependency of deformation shape, strain distribution, and contact pressure during wire flat rolling // Iron and Steel Research International. 2023, vol. 30, no. 3, pp. 475–486.
5. Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.С. Деформация металла в многовалковых калибрах. М.: Металлургия, 1979. 240 с.
6. Бровман М.Я. Применение теории пластичности в прокатке. М.: Металлургия, 1991. 254 с.
7. Песин А.М., Салганик В.М., Куранов К.Ю. Плющение стальной ленты: монография. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 157 с.
8. Ткаченко В.А. Исследование процесса прокатки при управляемом рассогласовании окружных скоростей валков в четырехвалковом калибре: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05. Магнитогорск, 1976. 24 с.
9. А. с. 610581 СССР, МКИ В21В 37/02; В21В 1/00. Способ регулирования размеров профиля при прокатке в четырехвалковом калибре / В.Л. Стеблянюк, М.Г. Поляков, В.А. Мамкин, В.А. Ткаченко. № 2108565. Заявл. 28.02.1975; опубл. 15.05.1978.
10. Исследование асимметричных случаев прокатки в четырехвалковых калибрах / В.Л. Стеблянюк, В.А. Ткаченко, В.А. Мамкин, А.М. Поляков // Обработка металлов давлением: межвузовский сборник. Вып. 5. Свердловск: Изд-во УПИ им. С.М. Кирова, 1978. С. 70–77.
11. Пат. 2528601 RU, МПК В21В 1/00. Способ асимметричной прокатки металла / А.М. Песин, А.П. Ткаченко, Д.О. Пустовойтов, Н.М. Локотунина, Н.А. Горкин, М.А. Бирюков. № 2013111897/02. Заявл. 15.03.2013; опубл. 20.09.2014.

12. Пат. 2531337 RU, МПК В21В 1/00. Способ асимметричной прокатки металла / А.М. Песин, А.П. Ткаченко, Д.О. Пустовойтов, Н.М. Локотунина, М.А. Бирюков, Н.А. Горкин. № 2013111708/02. Заявл. 15.03.2013; опублик. 20.10.2014.
13. Константинов Д.В., Песин А.М., Пустовойтов Д.О. Мультимасштабное моделирование напряженно-деформированного состояния при асимметричной прокатке стальной полосы // Технологии металлургии, машиностроения и материалов обработки. 2019. № 18. С. 27–32.
14. Исследование особенностей формирования структуры стали 08Ю при асимметричной прокатке на новом стане 400 / Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, А.М. Песин, М.В. Чукин // Черные металлы. 2022. № 10. С. 39–44.
15. Снижение количества технологических циклов «прокатка-отжиг» холоднокатаной ленты из стали марки 65Г в условиях ЛПЦ-8 ПАО «ММК» / А.И. Сверчков, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, Телгин, В.Е. и др. // Труды XIII Конгресса прокатчиков: сб. ст., Москва, 25-27 октября, 2022. М., 2023. Т.2. С. 126–129.
16. Оценка напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки при волочении в монолитной волоке на основе моделирования / Д.В. Терентьев, М.Ю. Усанов, Е.С. Шеметова, С.И. Платов, В.А. Харитонов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. № 3. С. 170–177.
17. Аркулис Г.Э., Дорогобид В.Г. Теория пластичности. М.: Металлургия, 1987. 352 с.
18. steel strip: monograph]. Magnitogorsk: MSTU, 2004, 157 p. (In Russ.)
8. Tkachenko V.A. *Issledovanie processa prokatki pri upravlyaemom rassoglasovanii okruzhnykh skorostey valkov v chetyrehvalkovom kalibre: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Research of rolling process at controlled mismatch of circumferential speeds of rolls in a four-roll caliber. Extended abstract of Ph.D dissertation]. Magnitogorsk, 1976. 24 p.
9. Steblyanko V.L., Polyakov M.G., Mamkin V.A., Tkachenko V.A. Method of regulation of profile dimensions at rolling in a four-roll calibre. Author's certificate USSR, No. 610581. Applied: 28.02.1975. Published: 15.05.1978.
10. Steblyanko V.L., Tkachenko V.A., Mamkin V.A., Polyakov A.M. Investigation of asymmetric cases of rolling in four-roll calibres. *Obrabotka metallov davleniem: mezhvuzovskiy sbornik* [Metalworking by pressure]. Sverdlovsk: S.M. Kirov UPI Publishing House. 1978;5:70-77. (In Russ.)
11. Pesin A.M., Tkachenko A.P., Pustovoirov D.O., Lokotunina N.M., Gorkin N.A., Biryukov M.A. *Sposob asimmetrichnoy prokatki metalla* [Method of asymmetric rolling of metal]. Patent RF, no. 2528601, 2014.
12. Pesin A.M., Tkachenko A.P., Pustovoirov D.O., Lokotunin N.M., Biryukov M.A., Gorkin N.A. *Sposob asimmetrichnoy prokatki metalla* [Method of asymmetric rolling of metal]. Patent RF, no. 2531337, 2014.
13. Konstantinov D.V., Pesin A.M., Pustovoirov D.O. Multiscale modelling of the stress-strain state at asymmetric rolling of a steel strip. *Tekhnologii metallurgii, mashinostroyeniya i materialoobrabotki* [Technologies of metallurgy, mechanical engineering and material processing], 2019;(18):27-32. (In Russ.)
14. Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Pesin A.M., Chukin M.V. Investigation of the peculiarities of 08Y steel structure formation during asymmetric rolling at the new mill 400. *Chernyye metally* [Ferrous Metals], 2022;(10):39-44. (In Russ.)
15. Sverchkov A.I., Pesin A.M., Pustovoirov D.O., Telgin V.E. et al. Reduction of the number of technological cycles “rolling-annealing” of cold-rolled strip from 65G steel in the conditions of Sheet Rolling Shop 8 of Magnitogorsk Iron and Steel Works. *Trudy 13 Kongressa prokatchikov* [Proceedings of the 13th Congress of rolling millers], Moscow, 25-27 October, 2022. Moscow. 2023;2:126-129. (In Russ.)
16. Terentyev D.V., Usanov M.Yu., Shemetova E.S., Platonov S.I., Kharitonov V.A. Assessing the stress and strain state of steel-copper wire based on modeling of drawing in a monolithic die. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2024;(3):170-177. (In Russ.)
17. Arkulis G.E., Dorogobid V.G. *Teoriya plastichnosti* [Theory of plasticity]. Moscow: Metallurgy, 1987, 352 p. (In Russ.)

References

1. Gromov N.P. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem* [Theory of metal processing by pressure] Moscow: Metallurgizdat, 1978, 360 p. (In Russ.)
2. Nagornov V.S. Plastic flow during low-temperature rolling of rods on a smooth barrel. *Proizvodstvo prokata* [Rolled products manufacturing], 2014;(1):2-11. (In Russ.)
3. Joong-Ki Hwang. Deformation behavior of longitudinal surface flaws in flat rolling of steel wire. *ISIJ International*. 2021;61(6):1935-1945.
4. Joong-Ki Hwang. Strain hardening rate dependency of deformation shape, strain distribution, and contact pressure during wire flat rolling. *Iron and Steel Research International*. 2023;30(3):475-486.
5. Polyakov M.G., Nikiforov B.A., Gun G.S. *Deformatsiya metalla v mnogovalkovykh kalibrakh* [Metal deformation in multi-roll calibres]. Moscow: Metallurgy, 1979, 240 p. (In Russ.)
6. Brovman M.Ya. *Primeneniye teorii plastichnosti v prokatke* [Application of the theory of plasticity in rolling]. Moscow: Metallurgy, 1991, 254 p. (In Russ.)
7. Pesin A.M., Salganik V.M., Kuranov K.Yu. *Plyushcheniye stalnoy lenty: monografiya* [Flattening of

Поступила 13.11.2024; принята к публикации 20.11.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 13/11/2024; revised 20/11/2024; published 24/12/2024

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

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

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

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

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

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

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 621.983.3

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-98-105

ПЛАСТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ КРУГЛОЙ В ПЛАНЕ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ПЕРЕМЕННОЙ КРИВИЗНЫ

Файфер И. Н.^{1,3}, Логинов Ю. Н.^{1,2}

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

³ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина», Екатеринбург, Россия

Аннотация. Целью работы является установление особенностей формоизменения плоской заготовки на переходе листовой штамповки высокопрочной стали при получении детали переменной кривизны. В ходе выполнения работы были рассчитаны компоненты тензора напряжений, рассмотрены места возможного утонения и особенности распределения степени деформации. Предварительно проводились испытания на растяжение для определения механических свойств. На заготовке были назначены референтные точки, в которых оценивалась толщина стенки детали после перехода штамповки. Напряжённо-деформированное состояние в каждой точке определялось через показатель напряжённого состояния и коэффициент Лоде. При проведении компьютерного моделирования установлена область, расположенная в зоне перегиба заготовки (точка 2), в которой происходит максимальное утонение. Степень деформации ε_p здесь равна 0,125, среднее нормальное напряжение σ равно +213 МПа. Максимумы значений локализованы близко к точке перегиба, где кривизна меняет знак, эту точку можно считать опасным сечением. При полученном в опытах относительном удлинении $\delta = 21\%$ расчётная степень деформации ε_p равна 0,190. Как видно из полученного значения, степень деформации превышает расчётное значение в опасном сечении. Однако такое сравнение не учитывает то, что в опасном сечении может не выполняться линейное напряжённое состояние, характерное для испытания образца на растяжение. В точке 2 максимальные нормальные напряжения σ_{rr} , $\sigma_{\varphi\varphi}$, σ_{zz} положительны и равны 254, 273 и 162 МПа, рассчитанный показатель напряжённого состояния k составляет 1,37, коэффициент Лоде μ_σ равен 0,62, соответственно, наблюдается трёхосное растяжение, что может привести к снижению пластичности и дальнейшей локализации степени деформации. Локализация степени деформации в одной области может иметь негативные последствия при дальнейшей эксплуатации.

Ключевые слова: вытяжка, тензор напряжений, утонение, программный модуль Qform, высокопрочная сталь

© Файфер И.Н., Логинов Ю.Н., 2024

Для цитирования

Файфер И.Н., Логинов Ю.Н. Пластический изгиб круглой в плане листовой заготовки переменной кривизны // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 98-105. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-98-105>



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

PLASTIC BENDING OF A ROUND SHEET BLANK OF VARIABLE CURVATURE

Faifer I. N.^{1,3}, Loginov Yu.N.^{1,2}

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

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

³ PJSC Machine-Building Plant named after M.I. Kalinin, Yekaterinburg, Russia

Abstract. The aim of the work is to establish the features of shaping a flat blank at the transition of high-strength steel sheet stamping when obtaining a part of variable curvature. In the course of the work, the components of the stress tensor were calculated, the places of possible thinning and the features of the distribution of the deformation degree were considered. Tensile tests were previously carried out to determine the mechanical properties. Reference points were assigned on the blank, at which the wall thickness of the part was estimated after the stamping transition. The stress-strain state at each point was determined through the stress state index and the Lode coefficient. During computer modeling, an area located in the bending zone of the blank (point 2) was established, in which maximum thinning occurs. The degree of deformation of ε_p here is 0.125, the average normal stress σ is +213 MPa. The maxima of values are localized close to the inflection point, where the curvature changes sign, this point can be considered a dangerous cross section. With the relative elongation $\delta = 21\%$ obtained in the experiments, the calculated degree of deformation ε_p is 0.190. As it can be seen from the obtained value, the degree of deformation exceeds the calculated value in the dangerous section. However, this comparison does not take into account the fact that the linear stress state characteristic of the tensile test of the sample may not be performed in the dangerous section. At point 2, the maximum normal stresses σ_{rr} , $\sigma_{\varphi\varphi}$, σ_{zz} are positive and equal to 254, 273 and 162 MPa, the calculated stress index k is 1.37, the Lode coefficient μ_σ is 0.62, respectively, triaxial stretching is observed, which can lead to a decrease in plasticity and further localization of the deformation degree. Localization of the deformation degree in one area can have negative consequences during further operation.

Keywords: extraction, stress tensor, thinning, Qform software module, high-strength steel

For citation

Faifer I.N., Loginov Yu.N. Plastic Bending of a Round Sheet Blank of Variable Curvature. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 98-105. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-98-105>

Введение

Приёмы листовой штамповки часто используются в машиностроении. Предметом исследования являются силовые параметры [1], особенности формоизменения, влияние свойств материала [2], в том числе анизотропии [3], на характер пластического течения. Часть публикаций касается изучения процесса глубокой вытяжки полусферических деталей [4, 5] и близких по форме к ним изделий [6] с использованием в качестве заготовки круглых дисков [7]. При вытяжке отдельные фрагменты листа могут претерпевать утонение, что создает разнотолщинность в готовой детали, и отдельные работы направлены на снижение вредных последствий этого явления [8, 9]. Дополнительно изучались особенности деформации уже изготовленных полусферических оболочек [10]. При недостаточной пластичности деформируемого материала предлагалось процесс листовой штамповки сделать многопереходным, при этом учитывать на заготовке наличие участков переменной кривизны и анизотропию металла [11].

Целью работы является установление особенностей перехода листовой штамповки при получении детали переменной кривизны.

Производственная ситуация

В публикации [12] был рассмотрен реальный процесс глубокой вытяжки полусферической детали из стали 30X2ГCHBM (ВЛ-1Д) при различных условиях трения. В том числе было показано, что получить готовое изделие за одну операцию не удаётся из-за слишком малой пластичности металла, поэтому процесс был разбит на четыре перехода с промежуточными отжигами для восстановления пластических свойств. В том числе первый переход предполагал создание круглой в плане детали переменной кривизны. На **рис. 1, а** показана форма поперечного сечения этой детали в системе координат $r\varphi z$, а на **рис. 1, б** показана сборка инструмента для листовой штамповки.

Листовая заготовка 1 круглого в плане вида помещена между верхним полуштампом 2 и нижним полуштампом 3, её периферийная часть зажата прижимом 4. Движением по вертикали сверху вниз верхнего полуштампа 2 достигают формоизменения металла.

Заготовка выполнена из высокопрочной стали ВЛ-1Д (32X2ГCHBM) в соответствии с ТУ 14-1-4461-88 и имеет форму диска диаметром 702 мм, толщиной 2,2 мм, температура процесса равна 20°C. Используется пресс номинальным усилием 50 МН с гидравлическим приводом, скорость перемещения инструмента 10 мм/с.

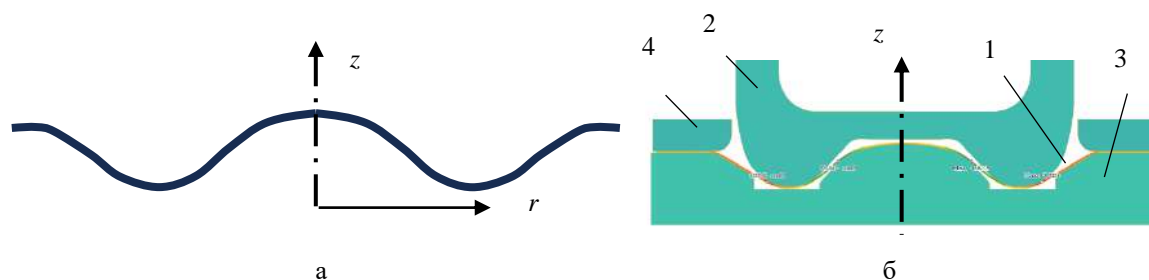


Рис. 1. Форма детали (а) и инструмент для ее штамповки (б) в цилиндрической системе координат $r\varphi z$:

1 – заготовка; 2 – верхний полуштамп; 3 – нижний полуштамп; 4 – прижим

Fig. 1. The shape of the blank (a) and the tool for stamping it (b) in the cylindrical coordinate system $r\varphi z$:

1 is a blank; 2 is an upper die; 3 is a lower die; 4 is a clamp

Предварительно в эксперименте, аналогичном описанному в [13], были выполнены испытания механических свойств стали ВЛ-1Д (32Х2ГСНМА). В качестве объекта исследования выбраны образцы для контроля механических свойств №7К тип I по ОСТ 1.90011–70. Образцы вырезаны на лазерной установке, замаркированы порядковым номером по возрастанию от 1 до 90. С 1 по 30 номер образцы нарезаны вдоль направления проката, с 31 по 60 – поперёк направления проката, с 61 по 90 — под 45° к направлению проката. В первой части эксперимента были проведены испытания на разрыв 30 образцов в состоянии поставки (по 10 образцов вдоль, поперёк и под 45° к направлению проката). Затем была проведена термообработка (высокий отжиг при $t^\circ = 720^\circ\text{C}$, выдержка 2–3 ч, охлаждение на воздухе) и испытаны ещё 30 образцов. Оставшиеся 30 образцов были испытаны через четыре недели после термообработки. По полученным данным испытаний были проведены расчёты и сделаны соответствующие выводы. В качестве факторов выбрано направление проката (под 45° , вдоль или поперёк проката), наличие или отсутствие термообработки, а также время хранения после термообработки.

Выявлено, что непосредственно после термообработки (высокий отжиг при $t = 720^\circ\text{C}$, выдержка 2–3 ч, охлаждение на воздухе) временное сопротивление составляет 824 МПа вдоль направления листовой прокатки, а относительное удлинение после разрыва 21%. Следует отметить, что режим термообработки здесь выбран такой, чтобы получить высокие пластические, а не прочностные свойства, это позволяло деформировать металл без разрушения. Однако практика работы показала, что появление трещин на отдельных стадиях обработки всё-таки возможно. В закалённом (от 940°C) и отпущенном (200°C) состоянии сталь обладает высоким временным сопротивлением 1800 МПа и относительным удлинением 7%, то есть пластические свойства заведомо ниже, чем после термообработки в режиме отжига.

По результатам эксперимента, описанного выше, было показано, что наилучшие механические свойства для штамповки показывает сталь сразу после

отжига. Поэтому дальнейшие опыты проводились со сталью в этом состоянии.

Расчётная часть

Для анализа использовали программный комплекс Qform (КванторФорм, Россия), который успешно применялся ранее для цифровизации процесса листовой штамповки деталей сложной формы [14]. Для оценки ситуации задали коэффициент трения по Кулону 0,2 (из стандартной базы смазочных материалов программного комплекса Qform выбиралась смазка медь+масло). Основанием для выбора данной смазки являются результаты анализа, описанные в [12]. Относительная толщина заготовки (отношение толщины заготовки к начальному диаметру $\frac{s}{D}$) сравнительно мала, так что возможна потеря устойчивости краевой части заготовки и образование здесь волн (гофр). Для предотвращения складкообразования необходимо использовать прижим. Прижим заготовки задавался жёстким неподвижным инструментом на расстоянии 2,2 мм от нижнего полуштампа.

Полученные в ходе испытаний кривые растяжения были перестроены в координатах «Истинное напряжение — Степень деформации». На рис. 2 приведена кривая упрочнения стали 32Х2ГСНМА (ВЛ-1Д) сразу после отжига, пригодная для загрузки в базу данных расчётного модуля.

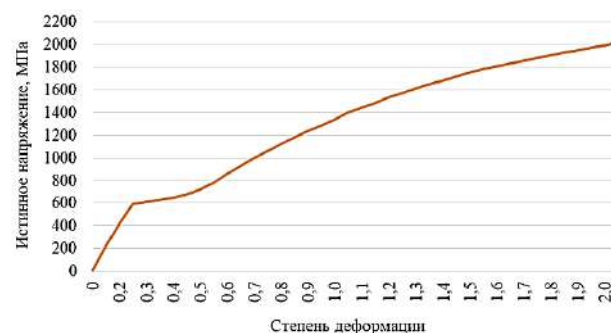


Рис. 2. Реологическая модель стали 32Х2ГСНМА (ВЛ-1Д) сразу после отжига

Fig. 2. Rheological model of steel 30X2GSNMA (VL-1D) right after heat treatment

В программном комплексе Qform предусмотрен специальный модуль Qshape для генерации конечно-элементной сетки. На заготовке была сгенерирована трёхузловая (треугольная) сетка, общий вид которой по толщине заготовки представлен на **рис. 3**.

Решали плоскую (2D) осесимметричную задачу. Решение представлено в виде инвариантных величин степени деформации ϵ (**рис. 4, а**) и среднего нормального напряжения σ (**рис. 4, б**).

Стрелками показаны максимальные значения величин. Они локализованы близко к точке перегиба, где кривизна меняет знак, эту точку можно считать опасным сечением. Эффективная пластическая деформация здесь равна 0,125, среднее нормальное напряжение равно +213 МПа. Эффективная пластическая деформация достаточно небольшая, а среднее нормальное напряжение ниже, чем временное сопротивление. Относительное удлинение до разрыва δ можно выразить через эффективную пластическую деформацию ϵ_p . Для этого обозначим длину образца до испытания как l_0 , а после разрыва как l_1 . По определению

$$\delta = 100 \cdot (l_1 - l_0) / l_0 = 100 \cdot (l_1 / l_0 - 1) = 100 \cdot \exp(\ln(l_1 / l_0) - 1) = 100 \cdot \exp(\epsilon_p - 1), \quad (1)$$

или

$$\epsilon_p = \ln(\delta / 100 + 1). \quad (2)$$

По формуле (2), при полученном в опытах $\delta = 21\%$, получим $\epsilon_p = 0,190$. Как видно из полученного значения, эффективная пластическая деформация превышает расчётное значение в опасном сечении. Однако такое сравнение не учитывает то, что в опасном сечении может не выполняться линейное напряжённое состояние, характерное для испытания образца на растяжение. Поэтому важно знать, насколько схема напряжённого состояния в опасном сечении при данном виде штамповки отличается от схемы напряжённого состояния при растяжении образца.

Для оценки ситуации в цилиндрической системе координат $r\varphi z$ рассчитаны компоненты тензора напряжений σ_{rr} , $\sigma_{\varphi\varphi}$, σ_{zz} , σ_{rz} они приведены на **рис. 5**.



Рис. 3. Распределение элементов сетки по толщине заготовки

Fig. 3. Distribution of grid elements according to the thickness of the blank

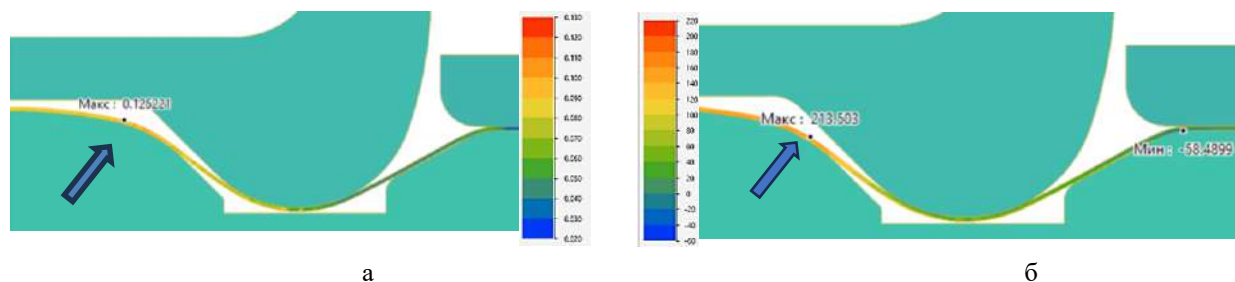


Рис. 4. Распределение эффективной пластической деформации (а) и среднего нормального напряжения (б), правая половина очага деформации (стрелками показаны максимальные значения)

Fig. 4. The distribution of the effective plastic strain (a) and the average normal stress (б), the right half of the deformation site (the arrows show the maximum values)

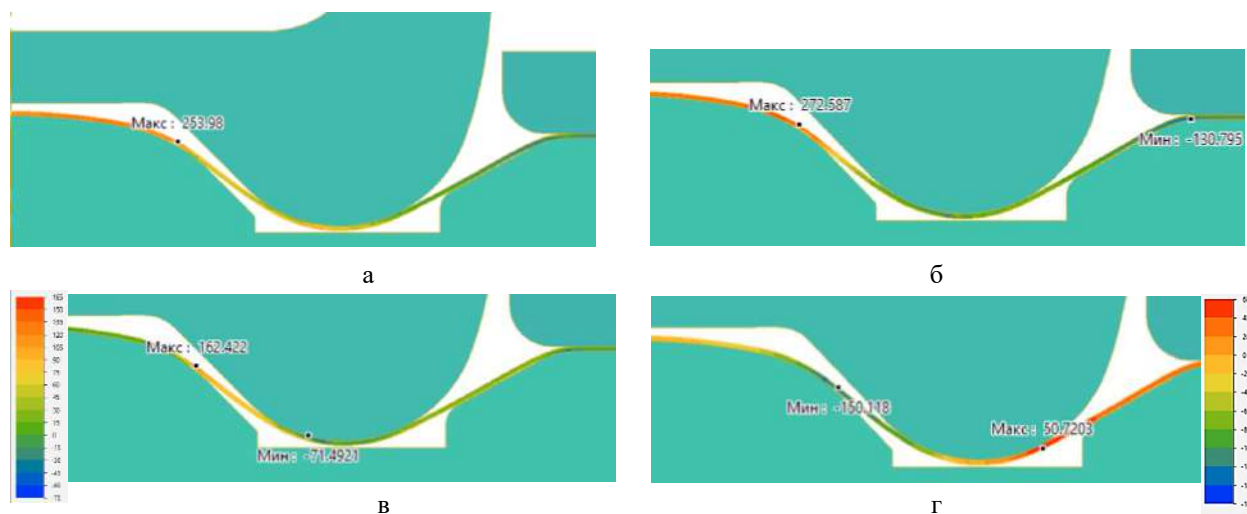


Рис. 5. Распределение компонентов тензора σ_{rr} (а), $\sigma_{\varphi\varphi}$ (б), σ_{zz} (в), σ_{rz} (г)

Fig. 5. Distribution of tensor components σ_{rr} (а), $\sigma_{\varphi\varphi}$ (б), σ_{zz} (в), σ_{rz} (г)

По рис. 5, а-в видно, что максимальные нормальные напряжения σ_{rr} , $\sigma_{\varphi\varphi}$, σ_{zz} равны соответственно 254, 273 и 162 МПа, то есть они все положительны и являются напряжениями растяжения. Напряжённое состояние характеризуется как трёхосное растяжение и этим оно существенно отличается от состояния одноосного растяжения, характерного для испытания образцов. Из теории разрушения известно, что увеличение уровня растягивающих напряжений приводит к снижению пластичности металла [15]. Но, кроме этого, увеличение направлений по координатным осям, в которых действуют напряжения растяжения, также приводит к такому же эффекту.

Среднее нормальное напряжение может быть рассчитано через компоненты тензора:

$$\sigma = \frac{\sigma_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{zz}}{3}. \quad (3)$$

После расчёта получим 230 МПа, что практически совпадает со значением, определенным в модуле Qform, небольшое расхождение может быть связано с некоторым смещением максимумов компонент тензора.

На рис. 5, г определена также компонента тензора σ_{rz} , для которой максимальное значение равно 51 МПа, а минимальное -150 МПа. Смена знака компонент связана с изменением знака кривизны: выпуклость диска меняется на вогнутость.

В настоящее время вероятность разрушения заготовки в любой момент времени оценивают в том числе по следующим двум показателям – напряжённому состоянию k и коэффициенту Лоде μ_σ .

Показатель напряжённого состояния представляет собой отношение среднего напряжения к интенсивности касательных напряжений:

$$k = \frac{\sigma}{T}, \quad (4)$$

где σ – среднее напряжение;
 T – интенсивность касательных напряжений, которую можно определить через интенсивность напряжений σ_u ,

$$T = \frac{\sigma_u}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Показатель напряжённого состояния k характеризует относительный уровень нормальных напряжений: при $k > 0$ преобладают нормальные растягивающие напряжения, при $k < 0$ – сжимающие. При увеличении этого показателя пластичность материала снижается.

Коэффициент Лоде μ_σ позволяет определить, какой вид напряжённого состояния реализуется в конкретной точке – растяжение, сжатие или сдвиг. Коэффициент Лоде рассчитывается по формуле

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1. \quad (6)$$

Значение $\mu_\sigma = +1/-1$ соответствует напряжённому состоянию осесимметричного сжатия/растяжения, при $\mu_\sigma = 0$ реализуется схема плоского напряжённого состояния [16]. Так как приведённые выше показатели безразмерные, они позволяют оценить напряжённое состояние и вероятность разрушения заготовки из материалов с разным уровнем пластических свойств.

Рассчитанные по приведённым выше формулам значения показателей напряжённого состояния для перехода штамповки приведены в табл. 1.

Программой Qform предусмотрена возможность определения толщины детали. Поскольку эта величина оказывается переменной по контуру, назначены контрольные точки, отображенные на рис. 6, а, на рис. 6, б отображён пример оценки толщины в контрольной точке.

Как видно из приведенных данных, в месте размещения прижима утонение минимально, большее утонение испытывает металл в точках 1 и 2, при этом в месте перегиба утонение наибольшее, что может иметь негативные последствия. В идеальном варианте желательно, чтобы деталь сохраняла исходную толщину, либо утонение должно происходить равномерно без локализации опасных сечений.

Таблица 1. Значения показателя напряжённого состояния k и коэффициента Лоде μ_σ

Table 1. Values of the stress state indicator k and the Lode coefficient μ_σ

Номер точки	Среднее напряжение σ	Интенсивность напряжений σ_u	Главные нормальные напряжения			Интенсивность касательных напряжений T	k	μ_σ
			σ_1	σ_2	σ_3			
1	146	232	235	232	3	134,1	1,088	0,97
2	213	269,3	321	272,6	64	155,7	1,37	0,62
3	35,5	178	151	-9	-42	102,9	0,35	-0,66
4	-58,5	134	30	-63	-131	77,5	-0,75	-0,16

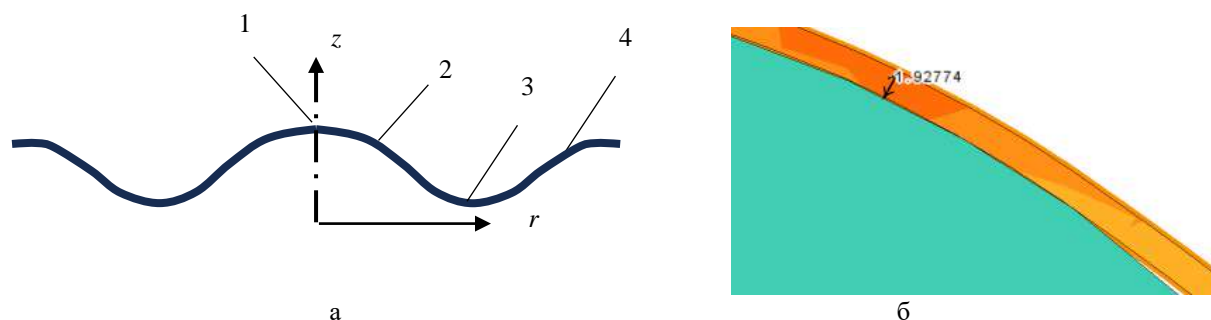


Рис. 6. Схема размещения контрольных точек (а) и пример распределения толщины заготовки в области размещения контрольной точки 2 (б)

Fig. 6. The layout of the control points (a) and an example of the distribution of the blank thickness in the area of the control point 2 (б)

Таблица 2. Рассчитанные параметры по контуру заготовки с начальной толщиной 2,2 мм

Table 2. Calculated parameters along the outline of the blank with an initial thickness of 2,2 mm

Номер точки	Толщина, мм	Абсолютное утонение, мм	Относительное утонение, %	Эффективная пластическая деформация ϵ
1	2,027	0,173	7,9	0,082
2	1,928	0,272	12,4	0,124
3	2,118	0,082	3,7	0,038
4	2,185	0,015	0,7	0,007

Полученное в приведённых выше расчётах положение опасного сечения находит подтверждение в практике работы. Наиболее часто разрушение заготовки происходит в районе точки 2 на заготовке (рис. 7).



Рис. 7. Разрушение заготовки в точке 2 на первом переходе штамповки

Fig. 7. Destruction of the blank at point 2 at the first stamping transition

В областях повышенного утонения заготовки толщина уменьшается, но из условия постоянства объёмов должен увеличиваться один или два оставшихся размера. Ими являются два размера, формирующие площадь заготовки. Действительно, если площадь проекции детали на горизонтальную по-

верхность остается одинаковой, то реальная площадь детали увеличивается за счет изгибов. В этом случае более правильно будет проводить моделирование в 3D-постановке, однако оно занимает длительное время. Для предварительного анализа процесса вытяжки подобных деталей достаточно решить задачу в 2D и, уже зная примерное положение опасного сечения, корректировать граничные условия в 3D-постановке (например, измельчить сетку в этом месте).

Продолжением работы может быть исследование напряжённого состояния на последующих переходах вытяжки и построение на основе полученных данных диаграмм предельной деформации для каждого перехода.

Выводы

При проведении компьютерного моделирования установлена область, расположенная в зоне перегиба заготовки (точка 2), в которой происходит максимальное утонение. Эффективная пластическая деформация ϵ_p здесь равна 0,125, среднее нормальное напряжение σ равно +213 МПа. Максимумы значений локализованы близко к точке перегиба, где кривизна меняет знак, эту точку можно считать опасным сечением. При полученном в опытах относительном удлинении $\delta = 21\%$ расчётная эффективная пластическая деформация ϵ_p равна 0,190.

В точке 2 максимальные нормальные напряжения σ_{rr} , $\sigma_{\phi\phi}$, σ_{zz} положительны и равны 254, 273 и 162 МПа, рассчитанный показатель напряжённого состояния k составляет 1,37, коэффициент Лодэ μ_0 равен

0,62, соответственно, наблюдается трёхосное растяжение, что может привести к снижению пластичности и дальнейшей локализации эффективной пластической деформации. Локализация деформации в одной области может иметь негативные последствия при дальнейшей эксплуатации.

Список источников

1. Грязев М.В., Ларин С.Н., Пасынков А.А. Оценка влияния анизотропии материала на силу вытяжки с прижимом через радиальную матрицу // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 2. С. 244–248.
2. Ershov A. A., Loginov Y. N. Use of the program PAM-STAMP to study the effect of the as-received condition of a material on its formability during stamping // Metallurgist. 2014, vol. 58, Iss. 3-4, pp. 162-166.
3. Hyung-Rim Lee, Myoung-Gyu Lee, Namsu Park. Effect of evolutionary anisotropic hardening on the prediction of deformation and forming load in incremental sheet forming simulation // Thin-Walled Structures. 2023, vol. 193, 111231. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111231.
4. Разработка способа получения тонкостенных деталей сферической формы из алюминиевого сплава 1580 / Сидельников С.Б., Бер В.И., Лопатина Е.С. и др. // Цветные металлы. 2023. № 7. С. 83–89. DOI: 10.17580/tsm.2023.07.11.
5. Thomas W., Oenoki T., Altan T. Process simulation in stamping - Recent applications for product and process design // Journal of Materials Processing Technology. 2000, vol. 98, no. 2, pp. 232-243. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00204-6.
6. Логинов Ю.Н., Котов В.В., Замаева Ю.В. Последовательность формоизменения металла в операции глубокой вытяжки тонкостенной заготовки с отверстием // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2018. № 7. С. 35–38.
7. Логинов Ю. Н., Каменецкий Б. И., Студенок Г. И. Моделирование деформированного состояния круглой пластины при вытяжке // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2006. № 3. С. 26–28.
8. Effects of independent radial pressure loading paths on cup thickness distribution / Liu X.-J., Cong Y.-L., Li F., Xu Y.-C., Yuan S.-J. // Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). 2010, vol. 41, Iss. 3, pp. 917-922.
9. Liu W., Chen Y. Z., Yuan S. J. Mechanism analysis on thickness distribution of aluminum alloy hemispherical shells in double-sided sheet hydroforming // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017, vol. 89, Iss. 5, pp. 2011-2020.
10. Особенности численного моделирования упругопластического выпучивания полусферических оболочек при нагружении жестким индентором / Баженов В.Г., Демарева А.В., Жестков М.Н. и др. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 2. С. 22–33.
11. Разработка баз данных материалов САПР бездефектных технологий листовой штамповки / Елисеев В.В., Гольцев А.М., Хливненко Л.В. и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т.13. №3. С.102-106.
12. Файфер И.Н., Логинов Ю.Н. Цифровое моделирование многопереходной глубокой вытяжки полусферической детали при различных условиях трения // Заготовительные производства в машиностроении. 2023. Т. 21. № 10. С. 448–453.
13. Файфер И.Н., Салиханов Д.Р. Влияние термической обработки и времени хранения на анизотропию механических свойств высокопрочной стали 42Х2ГСНМА (ВКС-1) // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: труды XII общероссийской научно-практической конференции. Сер. «Библиотека журнала "Военмех. Вестник БГТУ"». СПб., 2020. Т. 1. С. 225-231.
14. Implementation of the bai and Wierzbicki fracture criterion in QFORM and its application for cold metal forming and deep drawing technology / Gladkov Y., Peshekhodov I., Vucetic M., Bouguecha A., Behrens B.-A. // MATEC Web of Conferences. "4th International Conference on New Forming Technology, ICNFT 2015". 2015. No. 12009. DOI: 10.1051/mateconf/20152112009.
15. Shveikin V.P., Smirnov S.V. Strain hardening and plasticity of low-carbon steels with a heterophase structure: II. Effect of the state of stress on the plasticity // Russian Metallurgy (Metally). 2010, vol. 2010, no. 3, pp. 193-196. DOI: 10.1134/S0036029510030080.
16. Смирнов С.В., Вичужанин Д.И., Нестеренко А.В. Комплекс испытаний для исследования влияния напряженного состояния на предельную пластичность металла при повышенной температуре // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. №3. С. 146–164.

References

1. Gryazev M.V., Larin S.N., Pasinkov A.A. Assessment of the effect of anisotropy of the material on the force of drawing with clamping through a radial matrix. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences], 2018; (2):244-248. (In Russ)
2. Ershov A. A., Loginov Y. N. Use of the program PAM-STAMP to study the effect of the as-received condition of a material on its formability during stamping. *Metal-lurg* [Metallurgist]. 2014;58(3-4):162-166. (In Russ)
3. Hyung-Rim Lee, Myoung-Gyu Lee, Namsu Park. Effect of evolutionary anisotropic hardening on the prediction of deformation and forming load in incremental sheet forming simulation. *Thin-Walled Structures*. 2023;193:111231. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111231.
4. Sidelnikov S.B., Ber V.I., Lopatina E.S., Voroshilova M.V. Development of a method for obtaining thin-walled spherical parts from aluminum alloy 1580. *Tsvet-nye Metally* [Non-ferrous metals], 2023;(7):83-89. DOI: 10.17580/tsm.2023.07.11.

5. Thomas W., Oenoki T., Altan T. Process simulation in stamping - Recent applications for product and process design. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;(98(2)):232-243. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00204-6.
6. Loginov Yu.N., Kotov V.V., Zamaraeva Yu.V. The sequence of metal shaping in the operation of deep drawing of a thin-walled blank with a hole. *Kuznechno-stampovoechnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem* [Forging and stamping production. Processing of materials by pressure], 2018;(7):35-38. (In Russ.)
7. Loginov Yu.N., Kamenetsky B.I., Studenok G.I. Modeling of the deformed state of a round plate during extrusion. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy], 2006;(3):26-28. (In Russ.)
8. Liu X.-J., Cong Y.-L., Li F., Xu Y.-C., Yuan S.-J. Effects of independent radial pressure loading paths on cup thickness distribution. *Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)*. 2010;(41(3)):917-922.
9. Liu W., Chen Y. Z., Yuan S. J. Mechanism analysis on thickness distribution of aluminum alloy hemispherical shells in double-sided sheet hydroforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;(89(5)):2011-2020.
10. Bazhenov V. G., Demareva A.V., Zhestkov M.N., Kibets A.I. Features of numerical modeling of elastic-plastic buckling of hemispherical shells under loading with a rigid indenter. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Vestnik of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics], 2016;(2):22-33. (In Russ.)
11. Eliseev V.V., Goltsev A.M., Khlivnenko L.V., Rukin Yu.B. Development of databases of CAD materials of defect-free sheet stamping technologies. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of the Voronezh State Technical University], 2017;13(3):102-106. (In Russ.)
12. Faifer I.N., Loginov Yu.N. Digital modeling of a multi-transition deep drawing of a hemispherical part under various friction conditions. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyeni* [Blanking productions in mechanical engineering], 2023;21(10):448-453. (In Russ.)
13. Fifer I.N., Salikhianov D.R. The effect of heat treatment and storage time on the anisotropy of the mechanical properties of high-strength steel 42X2GSNMA (VKS-1). *Innovacionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva special'nogo naznacheniya: trudy XII obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Ser. Biblioteka zhurnal "Voenmekh.Vestnik BGTU"* [Innovative technologies and special-purpose equipment. Proceedings of the XII All-Russian scientific and practical conference. Ser. "Library of the journal "Voenmekh. Vestnik of BSTU"]. St. Petersburg, 2020;1:225-231. (In Russ.)
14. Gladkov Y., Peshekhodov I., Vucetic M., Bouguecha A., Behrens B.-A. Implementation of the bai and Wierzbicki fracture criterion in QFORM and its application for cold metal forming and deep drawing technology. *MATEC Web of Conferences*. "4th International Conference on New Forming Technology, ICNFT 2015". 2015:12009. DOI: 10.1051/mateconf/20152112009. (In Russ.)
15. Shveikin V.P., Smirnov S.V. Strain hardening and plasticity of low-carbon steels with a heterophase structure: II. Effect of the state of stress on the plasticity. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010;(3):193-196. DOI: 10.1134/S0036029510030080. (In Russ.)
16. Smirnov S.V., Vichuzhanin D.I., Nesterenko A.V. A set of tests to study the effect of the stress state on the ultimate plasticity of metal at elevated temperature. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [Vestnik of PNRPU. Mechanics], 2015;(3):146-164. (In Russ.)

Поступила 07.05.2024; принята к публикации 03.09.2024; опубликована 24.12.2024

Submitted 07/05/2024; revised 03/09/2024; published 24/12/2024

Файфер Игорь Николаевич – аспирант,

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;
ПАО «Машиностроительный завод имени М. И. Калинина», Екатеринбург, Россия.

Email: i.n.faifer@urfu.ru. ORCID 0000-0002-0163-7420

Логинов Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор,

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия;
Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия.

Email: j.n.loginov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-7222-2521

Igor N. Faifer – Postgraduate Student,

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia;
PJSC Machine-Building Plant named after M. I. Kalinin, Yekaterinburg, Russia,

Email: i.n.faifer@urfu.ru. ORCID 0000-0002-0163-7420

Yuri N. Loginov – DrSc (Eng.), Professor,

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Yekaterinburg, Russia;
M.N. Miheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia.

Email: j.n.loginov@urfu.ru. ORCID 0000-0002-7222-2521

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.746.047:669.054.2
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-106-110



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА

Лернер М.М.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В статье рассматриваются технологии и агрегаты машины непрерывного литья и деформации заготовок (МНЛДЗ), работающие с жидким металлом. Развитие технологии и агрегатов МНЛДЗ, работающих с жидким металлом, создает условия для эффективного формирования заготовки перед ее прохождением в устройстве для деформации МНЛДЗ и определяет эффективность процесса деформации и качества получаемой в последующем непрерывнолитой заготовки. Анализ специфики прохождения жидкой стали из разливочного отверстия промежуточного ковша в кристаллизатор позволил создать рациональные параметры расположения оборудования машины. **Цель работы.** Рационализация технологий и агрегатов МНЛДЗ, используя модернизируемые конструкции кристаллизатора и результаты моделирования. **Используемые методы.** Основные законы механики движения жидкой стали – ньютоновской жидкости, находящейся в диапазоне температур, определяемых условиями разливки стали. Используется программный продукт, основанный на применении метода конечных элементов в задачах механики жидкости. **Новизна.** Впервые рассмотрены параметры движения жидкой стали в агрегатах МНЛДЗ, определяющих параметры заготовки перед деформацией в зоне вторичного охлаждения машины. Разработана математическая модель движения жидкого металла в процессе комплексного процесса разливки и деформации на МНЛДЗ. **Результат.** В статье даны рекомендации по рационализации технологий и модернизации агрегатов для обеспечения технологического процесса деформации. Определены необходимые параметры технологического процесса непрерывной разливки и процесса деформации, организованные в едином процессе получения литой заготовки. **Практическая значимость.** Представлена методика оценки совместной работы агрегатов МНЛДЗ, обеспечивающих перемещение жидкого металла. Определены рациональные параметры расположения агрегатов машины для эффективной организации процесса получения заготовки на машине.

Ключевые слова: машина непрерывного литья и деформации заготовок (МНЛДЗ), разливка стали, жидкий металл, промежуточный ковш, кристаллизатор, непрерывнолитая заготовка, математическое моделирование

© Шевелев М.М., 2024

Для цитирования

Лернер М.М. Совершенствование технологии и оборудования машин непрерывного литья и деформации металла // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 106-110. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-106-110>



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

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF CONTINUOUS CASTING AND METAL DEFORMATION MACHINES

Lerner M.M.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The article discusses the technologies and units of the continuous casting and deformation machine (CCDM) working with liquid metal. The development of technology and CCDM units working with liquid metal creates the conditions for effective formation of the blank before its going through the CCDM and determines the efficiency of the deformation process and the quality of the subsequently continuously cast blank. The analysis of the specifics of liquid steel going through from the teeming hole of the intermediate ladle into the mold made it possible to choose the rational parameters of the location of the machine equipment. **Objectives.** It is required to rationalize the technologies and units of the CCDM using the modernized mold designs and simulation results. **Methods Applied.** The basic laws of the mechanics of the liquid steel motion such as a Newtonian fluid located in the temperature range determined by the conditions of steel casting are applied. A software product based on the use of the finite element method in fluid mechanics problems is used. **Originality.** For the first time, the parameters of the liquid steel motion in CCDM units that determine the parameters of the blank before deformation in the secondary cooling zone of the machine are considered. A mathematical model of the liquid metal motion in the process of complex casting and deformation in CCDM has been developed. **Results.** The article gives recommendations for rationalizing technologies and modernizing units to ensure the technological process of deformation. The necessary parameters of the technological process of continuous casting and deformation, organized in a single process of obtaining a cast blank, are determined. **Practical Relevance.** A method for assessing the joint operation of CCDM units that ensure the liquid metal motion is presented. Rational parameters of the location of machine units for the effective organization of the process of obtaining a blank on the machine are determined.

Keywords: continuous casting and deformation machine (CCDM), steel casting, liquid metal, intermediate ladle, mold, continuously cast blank, mathematical modeling

For citation

Lerner M.M. Improvement of Technology and Equipment of Continuous Casting and Metal Deformation Machines. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 106-110. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-106-110>

Введение

В статье рассмотрены вопросы организации движения потоков стали в системе агрегатов МНЛДЗ [1]: промежуточный ковш (К) – открытая струя (С) – кристаллизатор (КР). Отмечены особенности управления потоками жидкой стали, подаваемой из промежуточного ковша в кристаллизатор МНЛДЗ [2], при этом прохождение потоков металла между широкими стенками кристаллизатора машины требует минимального смещения струи металла, поступающего из разливочного стакана промежуточного ковша в кристаллизатор.

Даны особенности МНЛДЗ, которые обеспечивают рациональное размещение металла, поступающего из промежуточного ковша для формирования корочки металла в кристаллизаторе в соответствии с требованиями устройства для деформирования МНЛДЗ [1, 3].

Материалы и методы исследования

Компоновка агрегатов МНЛДЗ представлена на рис. 1.

Она выполнена на базе установки для деформации 4 и кристаллизатора 1. Жидкий металл подается в кристаллизатор 1 из промежуточного ковша 2 [1, 4].

На рис. 2 отмечена особенность размещения открытой струи металла в кристаллизаторе МНЛДЗ между широкими стенками. Рассмотрена специфика размещения потока металла между широкими стенками кристаллизатора [5]. Определяющее требование при подаче жидкого металла в кристаллизатор – исключение возможного взаимного смещения оси 4 потока металла 2, поступающего из промежуточного ковша, относительно центральной оси кристаллизатора 3.

Для выявления характера прохождения потоков металла в системе промежуточный ковш – открытая струя – кристаллизатор, а также выявления возможного диапазона отклонений взаимного положения осей потока металла из промежуточного ковша и центральной оси кристаллизатора проведено моделирование движения потоков в рассматриваемой системе агрегатов [6].

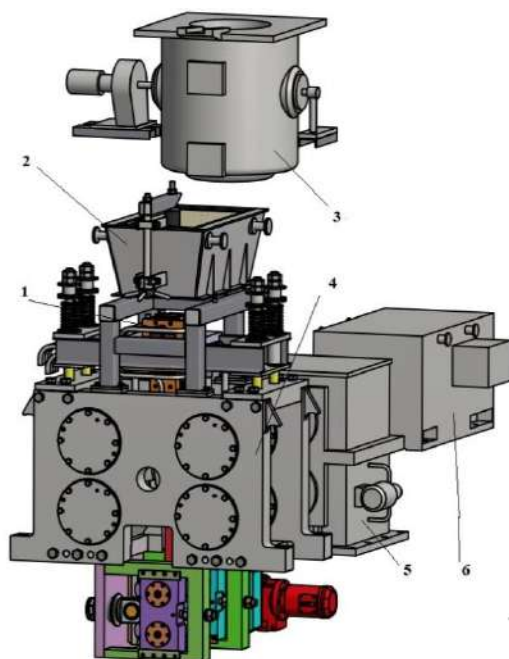


Рис. 1. Компонент МНЛДЗ: 1 – кристаллизатор; 2 – промежуточный ковш; 3 – сталеразливочный ковш; 4 – установка для деформации; 5 – привод; 6 – электродвигатель

Fig. 1. CCDM layout: 1 is a mold; 2 is a intermediate ladle; 3 is a steel-teeming ladle; 4 is a deformation unit; 5 is a drive; 6 is a electric motor

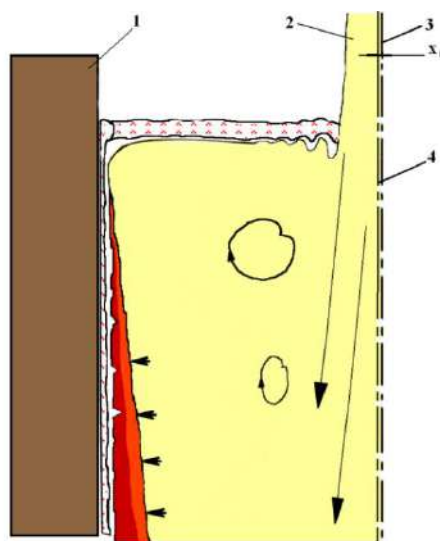


Рис. 2. Размещения открытой струи металла в кристаллизаторе МНЛДЗ: 1 – широкая стенка кристаллизатора; 2 – поток металла; 3 – центральная ось кристаллизатора; 4 – ось потока металла из ковша; x_i – отклонения осей потока и кристаллизатора между собой

Fig. 2. Placement of an open metal jet in the mold of the CCDM: 1 is a wide wall of the mold; 2 is metal flow; 3 is central axis of the mold; 4 is axis of metal flow from the ladle; x_i is deviations of the axes of the flow and the mold between each other

Полученные результаты и их обсуждение

Модель основных элементов – разливочного отверстия промежуточного ковша и кристаллизатора – представлена на рис. 3. Моделирование движения металла из ковша в кристаллизатор и дальнейшее его размещение там выполнено на базе решения дифференциальных уравнений, определяющих движение потоков стали с учетом уравнений неразрывности потока. Приняты начальные условия: температура, скорости движения потоков, вязкость стали [4, 6].

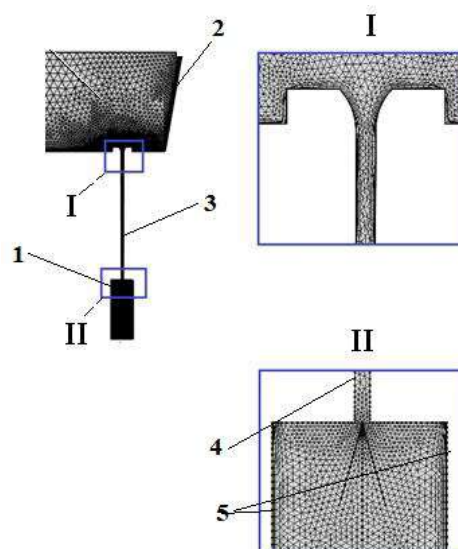


Рис. 3. Сетка модели движения металла из промежуточного ковша в кристаллизатор МНЛДЗ: I – разливочное отверстие ковша; II – сетка модели в кристаллизаторе; 1 – кристаллизатор; 2 – промежуточный ковш; 3 – поток металла из ковша в кристаллизатор; 4 – струя металла, поступающая в кристаллизатор; 5 – боковые широкие стенки кристаллизатора

Fig. 3. The model grid of the metal motion from the intermediate ladle into the mold of the CCDM: I is ladle teeming hole; II is model grid in the mold; 1 is mold; 2 is intermediate ladle; 3 is metal flow from the ladle into the mold; 4 is metal jet entering the mold; 5 is side wide walls of the mold

Уравнения представлены в виде

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \bar{u}, \\ \rho \nabla \cdot \bar{u} = 0, \end{cases}$$

где \bar{u} – вектор скорости жидкости; \bar{F} – вектор объёмных сил; p – давление жидкости; ∇p – градиент давления; ν – коэффициент кинематической вязкости; $\nabla^2 \bar{u}$ – лапласиан \bar{u} ; ρ – плотность стали.

В математической модели были сделаны следующие допущения [6, 7]:

1. Плотность металла постоянная.
2. Жидкий металл и неметаллические включения имеют одни и те же поля давлений.
3. Жидкость – сталь является ньютоновской жидкостью, имеет вязкость и несжимаема.

На **рис. 4** представлен характер размещения линий тока в кристаллизаторе при различных смещениях оси потока металла и центральной оси кристаллизатора. При отсутствии смещения ($x_i = 0$) – отклонения осей потока и кристаллизатора между собой – линии тока металла равномерно расположены в объеме кристаллизатора и омывают стенки кристаллизатора в безвихревом режиме [6, 7]. Это способствует формированию заданной толщины корочки металла на выходе заготовки из кристаллизатора, а также обеспечивает номинальные режимы работы установки для деформации. При наличии смещения – отклонения осей потока и кристаллизатора между собой – линии тока металла в кристаллизаторе смещаются в сторону широкой стенки кристаллизатора 2.

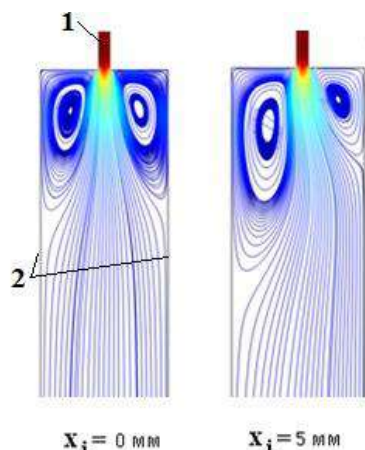


Рис. 4. Линии тока в кристаллизаторе при смещениях потока металла: 1 – поток стали; 2 – широкие стенки кристаллизатора

Fig. 4. Current lines in the mold at metal flow displacements: 1 is steel flow; 2 is wide walls of the mold

При этом возникают вихревые движения в верхней части кристаллизатора. Наличие смещений приводит к одностороннему уменьшению толщины стенки непрерывнолитой заготовки с одной стороны. Это приводит к неравномерному формированию корочки заготовки на выходе из кристаллизатора МНЛДЗ [8, 9] и исключает рациональное течение процесса деформации заготовки, что может также привести к прорыву оболочки заготовки и аварийной ситуации [10, 11].

Заключение

Таким образом, впервые изучен характер движения потоков металла в системе промежуточный ковш – открытая струя – кристаллизатор МНЛДЗ, что позволило отметить следующее:

1. Выполненное моделирование движения потоков металла в системе промежуточный ковш – открытая струя – кристаллизатор показало наличие вихревого течения жидкого металла в зонах, близких к широким стенкам кристаллизатора машины.

2. Рассмотрены особенности технологии и работа агрегатов машины непрерывного литья и деформации заготовки в период подачи жидкого металла, рациональное взаимное размещение агрегатов при отсутствии смещений осей потока металла и центральной оси кристаллизатора МНЛДЗ создают условия для безвихревого продвижения потоков металла в кристаллизаторе в зоне разливочного отверстия промежуточного ковша машины. Это исключает затягивание неметаллических включений в металл и разрыв корочки, что обеспечивает заданную форму заготовки перед деформацией и получение качественной заготовки на выходе из установки для деформации.

3. В процессе монтажа элементов промежуточного ковша – установки гнездового блока с разливочным отверстием – необходимо использовать стенд для заданной ориентации центральной оси разливочного отверстия.

4. При подготовке МНЛДЗ к работе необходимо обеспечить рациональное взаимное размещение оси разливочного отверстия промежуточного ковша и центральной оси кристаллизатора.

Список источников

1. Михалев А.В. Развитие технологии непрерывного литья и деформации заготовок с применением установки С-CAD // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 5-1. С. 71-75.
2. Гуцин В.Н., Ульянов В.А. Совершенствование технологии рафинирования стали в промежуточных ковшах МНЛЗ // Сталь. 2017. Т. 47. № 5. С. 16-20.
3. Design engineering of refractory components for use in refining continuous-cast steel / V.V. Chislavlev, S.V. Feiler, D.V. Boikov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. 2018, vol. 58, no. 6, pp. 603–607.
4. Development of structures for protection of liquid steel during continuous casting / Tochilkin V.V., Terentyev D.V., Tochilkin V.V., Filatova O.A. // Metallurgist. 2023, vol. 66, no. 9–10, pp. 1327–1330.
5. Оптимизация гидродинамических характеристик промежуточного ковша УНРС с целью удаления экзогенных неметаллических включений / А. В. Куклев, В. В. Тиняков, Ю. М. Айзин и др. // Металлург. 2004. № 4. С. 47-49.
6. Конструкции и расчет металлоприемника промежуточного ковша симметричной многоручевой МНЛЗ / Вдовин К.Н., Точилкин В.В., Добрынин С.М., Мельничук Е.А., Точилкин В.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. № 3. С. 25-30.
7. Tochilkin V.V. Improved hydraulic drive for removal and installation of coke-oven doors // Coke and Chemistry. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 377–318.

8. Гидравлический привод и средства автоматизации металлургических машин: учебник / Н.А. Чиченев, В.В. Точилкин, А.В. Нефедов, С.Н. Басков. Ново-троицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2017. 198 с.
9. Технология получения многослойных стальных полос на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации / О.С. Лехов, Б.Н. Гузанов, А.В. Михалев, М.М. Шевелев, Д.Х. Билалов // Сталь. 2019. Т. 49. № 11. С. 70-74.
10. Развитие конструкций и методов расчета оборудования разливочных камер промежуточных ковшей машин непрерывного литья заготовок / Точилкин Вик.В., Филатова О.А., Точилкин Вас.В., Камалихина З.В. // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 7. С. 88-92.
11. Опыт эксплуатации промышленной установки непрерывного литья и деформации C-CAD (continuous casting and deformation) в условиях ОАО «Уральский трубный завод» / Платов С.И., Михалев А.В., Шевелев М.М., Звягина Е.Ю. // Актуальные проблемы прочности: материалы LXVIII международной научной конференции: Витебск, 27-31 мая 2024 года / под ред. В.В. Рубаника. Минск: ИВЦ Минфина, 2024. С. 159-161.
5. Kuklev A.V., Tinyakov V.V., Aizin Yu.M. et al. Optimization of the hydrodynamic characteristics of intermediate ladle in order to remove exogenous non-metallic inclusions. *Metallurg* [Metallurgist]. 2004;(4):47-49. (In Russ.)
6. Vdovin K.N., Tochilkin Vas.V., Dobrynin S.M., Melnichuk E.A., Tochilkin V.V. Designs and calculation of the metal receiver of the intermediate ladle of a symmetrical multigroove CCDM. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019;17(3):25-30. (In Russ.)
7. Tochilkin V.V. Improved hydraulic drive for removal and installation of coke-oven doors. *Coke and Chemistry*. 2021;64(8):377-318.
8. Chichenev N.A., Tochilkin V.V., Nefedov A.V., Baskov S.N. *Gidravlicheskiy privod i sredstva avtomatizatsii metallurgicheskikh mashin: uchebnoe posobie* [Hydraulic drive and automation of metallurgical machines: textbook]. Novotroitsk: Novotroitsk branch of the National Research Technological University MISiS, 2017, 198 p. (In Russ.)
9. Lekhov O.S., Guzanov B.N., Mihalev A.V., Shevelev M.M., Bilalov D.H. Technology for producing multi-layer steel bars on the combined continuous casting and deformation unit. *Stal* [Steel], 2019;49(11):819-823. (In Russ.)
10. Tochilkin Vic.V., Filatova O.A., Tochilkin Vas.V., Kamalikhina Z.V. Development of designs and calculation methods for equipment of casting chambers of intermediate ladles of continuous casting machines. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern Science-Intensive Technologies], 2022;(7):88-92. (In Russ.)
11. Platov S.I., Mikhalev A.V., Shevelev M.M., Zvyagina E.Yu. Experience in operating an industrial unit of continuous casting and deformation C-CAD (continuous casting and deformation) in the conditions of JSC Ural Pipe Plant. *Aktualnye problemy prochnosti: materialy LXVIII mezhdunarodnoy nauchnoy konferencii* [Actual problems of strength: proceedings of the 68th International Scientific Conference]. Minsk: Information and Computing Center of the Ministry of Finance, 2024, pp. 159-161. (In Russ.)

References

Поступила 26.09.2024; принята к публикации 11.10.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 26/09/2024; revised 11/10/2024; published 24/12/2024

Лернер Максим Михайлович – кандидат технических наук, соискатель кафедры машин и технологии обработки давлением и машиностроения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: 5777799@gmail.com.

Maxim M. Lerner– PhD (Eng.), Candidate of the Department of Machines and Technology of Pressure Treatment and Mechanical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: 5777799@gmail.com



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.785.532
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-111-119

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ В ДУГОВОМ РАЗРЯДЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ КОМПЛЕКСНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Нагимов Р.Ш., Вафин Р.К.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Аннотация. В работе описано влияние температуры и продолжительности процесса ионного азотирования в дуговом разряде с использованием плазменного источника с накалимым катодом на механические характеристики поверхности, в частности на адгезионную прочность покрытия и износостойкость поверхности после комплексной ионно-плазменной обработки. Комплексная ионно-плазменная обработка состоит из ионного азотирования и последующего нанесения защитного многослойного покрытия системы (TiAl)N, проводимых в едином вакуумном цикле. В качестве используемого материала использовалась быстрорежущая сталь Р6М5. Адгезионная прочность исследовалась склерометрическим методом. Износостойкость исследовалась при помощи методики «шар по диску». Результаты показали, что поверхностная микротвердость увеличивается с течением времени в среднем в 1,5 раза с 860-870 до 1080-1520 HV в зависимости от температуры. Более того, определено, что с увеличением времени азотирования происходит увеличение адгезионной прочности до достижения глубины ~40 мкм. С увеличением продолжительности процесса азотирования увеличивается критическая нагрузка разрушения покрытия, однако результаты коэффициента упругого восстановления We показывают, что для более продолжительных режимов упругое восстановление после снятия нагрузки составляет примерно 30–40%, а для покрытия времени 30–60 мин порядка 50–60%. Адгезионные исследования показали смешанный механизм износа, который сочетает в себе адгезионное и абразивное воздействие. По совокупности исследуемых физико-механических характеристик определено, что технология с режимами обработки $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин обладает сравнительно наивысшими свойствами, а именно интенсивностью изнашивания в $11 \cdot 10^{-5}$ г, адгезионной прочностью в 19,5 Н и микротвердостью поверхности порядка 1270 HV.

Ключевые слова: ионное азотирование, вакуумно-дуговые покрытия, комплексная ионно-плазменная обработка, быстрорежущая сталь, адгезионная прочность, трибологические характеристики

© Нагимов Р.Ш., Вафин Р.К., 2024

Для цитирования

Нагимов Р.Ш., Вафин Р.К. Исследование влияния температуры и продолжительности ионного азотирования в дуговом разряде на механические характеристики поверхности после комплексной ионно-плазменной обработки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 111-119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-111-119>



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

STUDY OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND DURATION OF ION NITRIDING IN AN ARC DISCHARGE ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE AFTER COMPLEX ION-PLASMA TREATMENT

Nagimov R.Sh., Vafin R.K.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Abstract. The paper describes the effect of temperature and duration of the ion nitriding process in an arc discharge using a plasma source with a pumped cathode on the mechanical characteristics of the surface, particularly, on the adhesion strength of the coating and the wear resistance of the surface after complex ion-plasma treatment. The complex ion-plasma treatment consists of ion nitriding and subsequent application of a protective multilayer coating of the (TiAl)N system, carried out in a single vacuum cycle. The material used was high-speed steel P6M5. Adhesion strength was investigated by sclerometric method. Wear resistance was investigated using the ball-on-disk technique. The results showed that surface microhardness increases with time in average 1.5 times from 860-870 HV to 1080-1520 HV depending on temperature. Moreover, it was determined that with increasing nitriding time there is an increase in adhesion strength up to a depth of $\sim 40 \mu\text{m}$. With increasing duration of the nitriding process, the critical failure load of the coating increases, however, the results of the elastic recovery factor W_e show that for longer regimes, the elastic recovery after load removal is about 30-40%, while for 30-60 minutes coating, it is about 50-60%. Adhesion studies have shown a mixed mechanism of wear, which combines adhesive and abrasive effects. According to the totality of investigated physical and mechanical characteristics it was determined that the technology with treatment modes $T = 475^\circ\text{C}$, $t = 35 \text{ min}$ has comparatively highest properties, namely wear intensity of $11 \cdot 10^{-5} \text{ g}$, adhesion strength of 19.5 N and surface microhardness of about 1270 HV.

Keywords: ion nitriding, vacuum-arc coatings, complex ion-plasma treatment, high-speed steel, adhesion strength, tribological characteristics

For citation

Nagimov R.Sh., Vafin R.K. Study of the Influence of Temperature and Duration of Ion Nitriding in an Arc Discharge on the Mechanical Characteristics of the Surface after Complex Ion-Plasma Treatment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 111-119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-111-119>

Введение

В современном машиностроении быстрорежущая сталь активно используется в производстве инструментов благодаря ее высоким эксплуатационным характеристикам. Однако из-за сравнительно невысокой твердости в 63–66 HRC такой тип материалов обладает невысокой износостойкостью [1].

Для решения этой проблемы используются различные методы упрочнения поверхности, включая нанесение защитных покрытий [2-4] и ионное азотирование [5-8]. В последние годы было разработано множество комбинационных методов, которые позволяют совмещать несколько видов упрочнения поверхности [9-11]. Одним из наиболее эффективных методов является комплексная ионно-плазменная обработка, которая сочетает ионное азотирование с последующим нанесением покрытия. Этот метод увеличивает твердость поверхностного слоя, что способствует плавному градиенту твердости от покрытия к основе, улучшает адгезионную прочность и износостойкость [12-15]. Традиционно процесс комплексной ионно-плазменной обработки проводится в двух вакуумных циклах, что увеличивает время обработки и

требует механической подготовки поверхности. Однако использование плазменного источника с накаливаемым катодом позволяет выполнить весь процесс в одном вакуумном цикле, что сокращает время обработки и увеличивает адгезию покрытий [16-18].

Важным аспектом ионного азотирования в данном случае являются технологические режимы ионного азотирования, а именно температура детали и продолжительность цикла. Поскольку слишком высокая микротвердость может привести к охрупчиванию поверхности и снижению адгезии покрытия, необходимо получить оптимальное время и температуру процесса [19].

Таким образом, целью данной работы являлось исследование влияния температуры образца P6M5 и продолжительности процесса ионного азотирования на механические характеристики поверхностного слоя после комплексной ионно-плазменной обработки.

Материалы и методы исследования

В качестве исследуемого материала была использована быстрорежущая сталь P6M5. Образцы прошли термообработку, включающую в себя закалку при

температуре 1280°C и трехкратный отпуск при температуре 560°C.

Комплексная ионно-плазменная обработка, состоящая из ионного азотирования с использованием плазменного источника с накалимым катодом (ПИНК) и последующего нанесения защитного многослойного покрытия системы (TiAl)N, проводилась в модернизированной вакуумной установке ННВ-6.6 И1 (рис. 1). Процесс комплексной обработки осуществлялся в едином технологическом цикле, то есть процессы ионного азотирования и нанесения покрытия проводились последовательно в одной вакуумной камере.

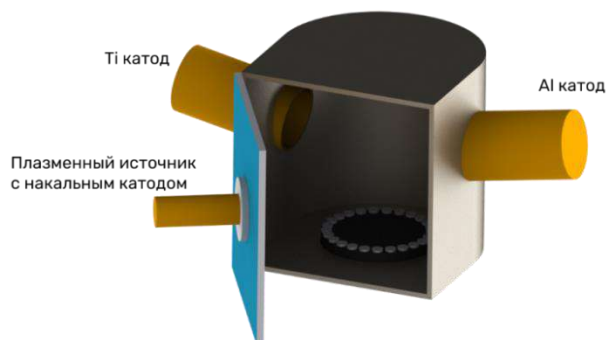


Рис. 1. Схема модернизированной установки ННВ-6.6 И1
Fig. 1. Schematic diagram of the modernized installation NNV-6.6 I1

Процесс ионного азотирования с ПИНК проводился при различных температурных режимах, которые регулировались при помощи технологических параметров, а именно отрицательного смещения потенциала на подложке, тока разряда плазменного источника и состава газа. Используемые температурные режимы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технологические режимы ионного азотирования
Table 1. Technological modes of ion nitriding

Технология	Смещение потенциала, В	Ток разряда, А	Состав газа Ar/N ₂ , %	Температура, °С
T1	400	40	50/50	315
T2	600	30	70/30	400
T3	550	50	50/50	475
T4	450	20	70/30	240

Нанесение многослойного покрытия (TiAl)N проводилось при одновременном распылении с катодом из титана и алюминия. Для создания слоев TiAl/TiAlN использовались инертный газ аргон и смесь газов аргона и азота соответственно. В процессе нанесения покрытия использовались следующие режимы: $I_{Ti} = 90$ А, $I_{Al} = 60$ А, $U_{П} = 180$ В, $P = 10^{-2}$ Па. Вращение стола, на котором закреплены образцы, составляло 1,5 об/мин.

Перед проведением комплексной ионно-плазменной обработки образцы нагревались и проходили процесс постепенной ионной очистки.

Измерение микротвердости поверхности производилось на микротвердомере EMCO DuraScan-50 с нагрузкой 50 г и определялось по методу Виккерса.

Глубина азотированного слоя измерялась методом измерения микротвердости по глубине. Значения измерялись каждые 5-10 мкм по глубине. Итоговые значения являлись средним арифметическим из пяти замеров.

Толщина покрытия определялась на установке CSM Calotest.

Определение адгезионной прочности производилось склерометрическим методом на установке CSM MicroScratch Tester. Выявление критической нагрузки, коэффициента упругого восстановления и других параметров рассчитывались при помощи программного обеспечения Scratch. В работе использовался алмазный индентор Rockwell D-027 с радиусом 200 мкм, при увеличивающейся нагрузке от 0,03 до 30 Н с длиной царапины 5 мм и скоростью 1,67 мм/мин.

Определение износостойкости образцов проводилось на установке Nanovea Tribometer с использованием стандартной методики «шар по диску».

Полученные результаты и их обсуждение

Для определения влияния продолжительности процесса ионного азотирования были проведены исследования при 15, 30, 60, 120 и 180 мин.

Результаты измерения микротвердости поверхности приведены в табл. 2.

Таблица 2. Микротвердость поверхности образцов после ионного азотирования, HV_{0.1}
Table 2. Surface microhardness of samples after ion nitriding, HV_{0.1}

Технология	Время				
	15 мин	30 мин	60 мин	120 мин	180 мин
T1	870	950	1040	1220	1250
T2	860	980	1150	1250	1430
T3	870	1010	1250	1430	1520
T4	850	855	860	960	1080

Из полученных результатов видно, что при увеличении времени азотирования поверхности ее микротвердость также увеличивается, что объясняется повышением концентрации азота в поверхностном слое. Однако следует учитывать, что чрезмерно высокая микротвердость может привести к охрупчиванию поверхности, что отрицательно сказывается на ее адгезионных свойствах. Кроме того, можно заметить, что технологии с более высокими температурами (технологии T2 и T3) имеют более высокую микротвердость.

Азотирование при времени в 15 мин не оказывает значительного влияния на микротвердость по сравне-

нию с необработанным образцом. При этом азотирование при температуре в 240°C практически не влияет на микротвердость. Исходя из этого, можно сделать вывод, что для достижения наилучшего результата целесообразно применять технологии Т2 и Т3. Однако для получения более точной зависимости технологических режимов на адгезионную прочность покрытия необходимо провести соответствующие испытания. Для указанных технологий результаты склерометрических испытаний представлены в табл. 3, 4 и на рис. 2, 3 соответственно.

Из расчетов склерометрических показателей видно, что с увеличением продолжительного азотирования увеличивается критическая нагрузка разрушения покрытия, однако результаты коэффициента упругого восстановления We показывают, что для более продолжительных режимов упругое восстановление после снятия нагрузки составляет примерно 30–40%, а для покрытия времени 30–60 мин порядка 50–60%.

Анализ влияния продолжительности ионного азотирования на физико-механические свойства поверхности показал, что с увеличением времени свойства меняются нелинейно. Поскольку более продолжительный процесс ионного азотирования оказывает существенное влияние на охрупчивание поверхности, адгезионные свойства в таком случае ухудшаются.

Таблица 3. Количественные результаты склерометрических испытаний для технологии Т2

Table 3. Quantitative sclerometric test results for T2 technology

Время, мин	L_c , Н	$F_{n_{max}}$, Н	$F_{n_{30}}$, мкМ	We , %
180	15	12,1	8	40,2
120	15,2	11,8	8,5	25
60	14,9	11,2	9,9	52
30	12,8	12,8	10,5	57
15	9,8	14,2	9,3	37

Таблица 4. Количественные результаты склерометрических испытаний для технологии Т3

Table 4. Quantitative sclerometric test results for T3 technology

Время, мин	L_c , Н	$F_{n_{max}}$, Н	$F_{n_{30}}$, мкМ	We , %
180	18,5	9,3	8,4	31,1
120	16	8,1	4,8	31,6
60	16,4	10,8	7,3	50,1
30	12,6	13,6	9,8	62
15	10,7	15,8	10,6	58,7

По результатам литературного анализа было определено, что наилучшей стойкостью обладают образцы с глубиной азотированного слоя в ~40 мкм [13].

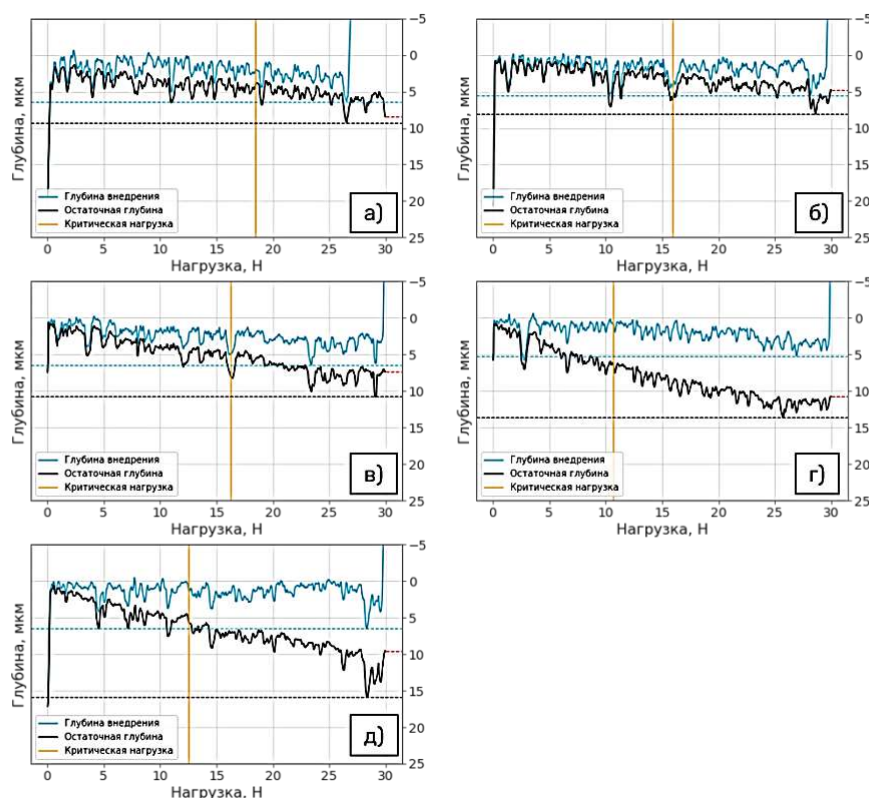


Рис. 2. Склерометрические испытания для технологии Т2 при времени азотирования: а – 180 мин; б – 120 мин; в – 60 мин; г – 30 мин; д – 15 мин

Fig. 2. Sclerometric tests for T2 technology at nitriding time: а is 180 min, б is 120 min, в is 60 min, г is 30 min, д is 15 min

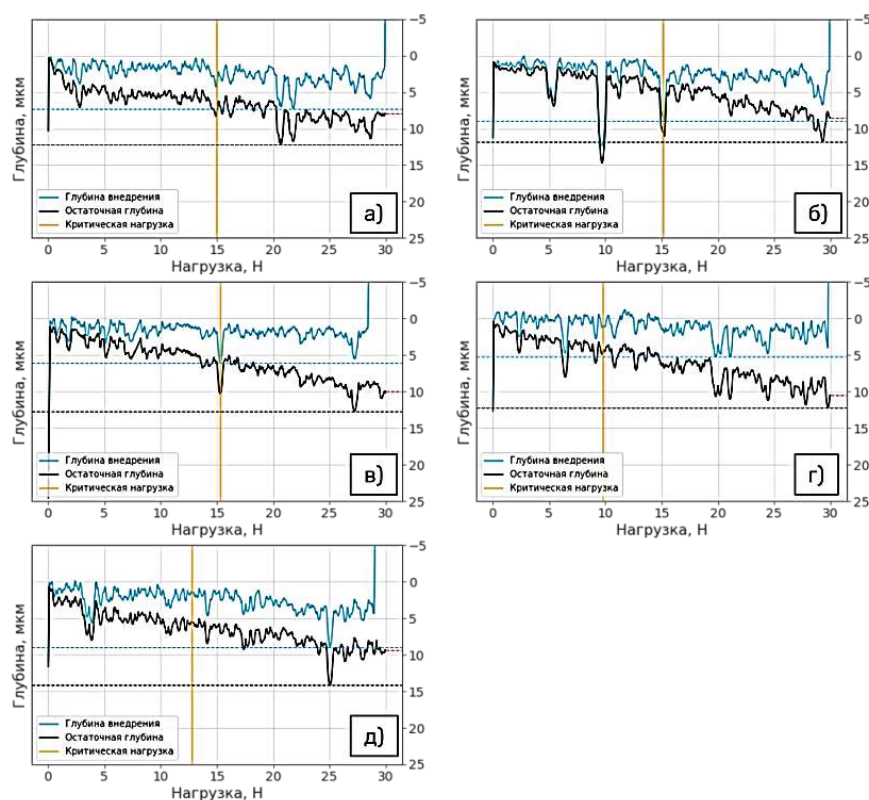


Рис. 3. Склерометрические испытания для технологии Т3 при времени азотирования: а – 180 мин; б – 120 мин; в – 60 мин; г – 30 мин; д – 15 мин

Fig. 3. Sclerometric tests for T3 technology at nitriding time: а is 180 min, б is 120 min, в is 60 min, г is 30 min, д is 15 min

Зная необходимую глубину и используя аппроксимацию глубины по времени, можно определить, что для технологии Т2 время азотирования для достижения диффузионного слоя в 40 мкм составляет 47 мин, а для технологии Т3 – 35 мин. Для верификации полученных данных были проведены измерения микротвердости по глубине (рис. 4).

Результаты показывают, что глубина азотирования для образцов, обработанных при $T = 400^\circ\text{C}$, $t = 47$ мин, составляет 45 мкм, а для образцов, обработанных при $T = 475^\circ\text{C}$, $t = 35$ мин – 43 мкм. Полученные значения отличаются от заданной глубины на 2–5%, а

значит, результаты являются достоверными. Поверхностная микротвердость для технологий 1 и 2 составила 1230 и 1272 $\text{HV}_{0.05}$ соответственно.

Результаты склерометрических испытаний представлены на рис. 5 и в табл. 5.

Результаты показали, что образец, обработанный технологией $T = 475^\circ\text{C}$, $t = 35$ мин, показал наилучшие результаты по критической нагрузке L_c , а также по максимальной глубине проникновения индентора и по глубине проникновения индентора при 30 Н.

Результаты трибологических исследований приведены на рис. 6.

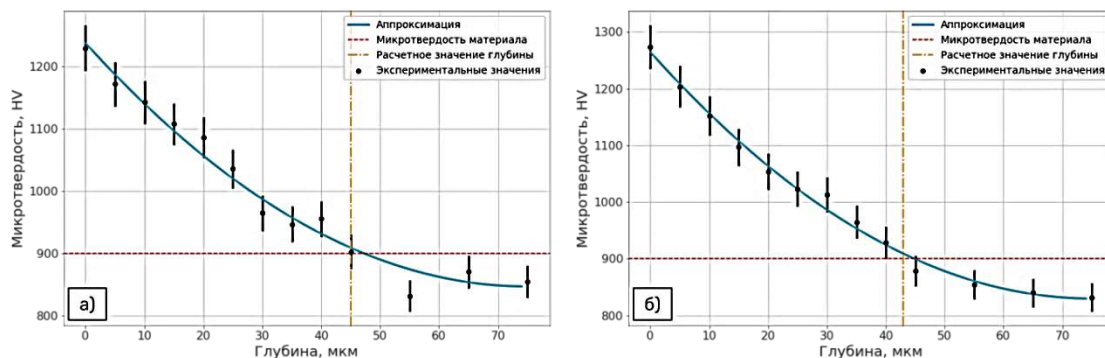


Рис. 4. Измерение микротвердости по глубине для образцов: а – $T = 400^\circ\text{C}$, $t = 47$ мин; б – $T = 475^\circ\text{C}$, $t = 35$ мин

Fig. 4. Depth microhardness measurement for samples: а is $T = 400^\circ\text{C}$, $t = 47$ min, б is $T = 475^\circ\text{C}$, $t = 35$ min

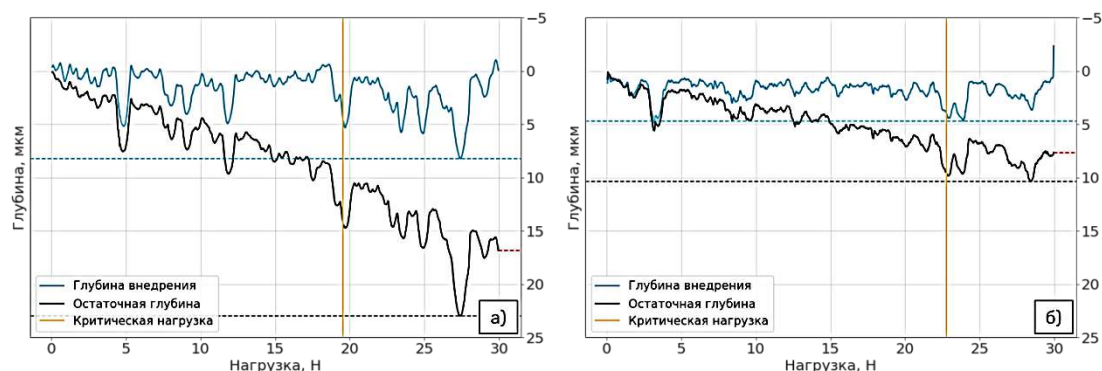


Рис. 5. Склерометрические испытания для технологий: а – $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ мин; б – $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин
Fig. 5. Sclerometric tests for: a is $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ min, б is $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ min

Таблица 5. Количественные результаты склерометрических испытаний
Table 5. Quantitative sclerometric test results

Технология	L_c , Н	$F_{n_{\max}}$, Н	$F_{n_{30}}$, мкм	We , %
$T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ мин	19,5	23	16,8	64,2
$T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин	22,8	10,4	7,7	54,6

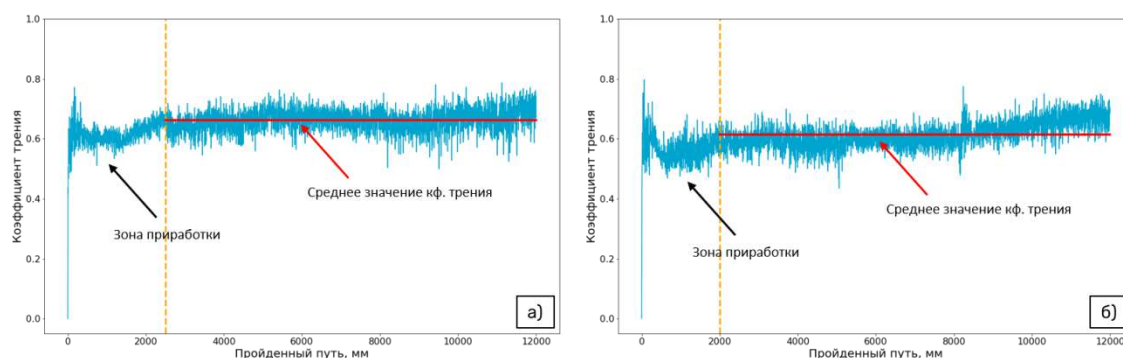


Рис. 6. Трибологические испытания для технологий: а – $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ мин; б – $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин
Fig. 6. Tribological testing for technologies: a is $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ min, б is $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ min

Анализ результатов трибологических испытаний показал, что технология 1 имеет средний коэффициент трения 0,66, а технология 2 – 0,6. Для качественной оценки необходимо измерить удельную скорость износа, которая рассчитывается по формуле

$$Wr = \frac{\Delta m}{\rho \cdot l \cdot F_N}, \quad (1)$$

где Wr – удельная скорость износа, $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$; ρ – плотность материала ($0,0083 \text{ г/мм}^3$) для быстрорежущей стали P6M5; l – общая длина пройденного пути шарика (226 м); F_N – средняя нормальная нагрузка, Н.

Разность масс определялась замерами до и после проведения испытаний и составила $14 \cdot 10^{-5}$ г для технологии 1 и $11 \cdot 10^{-5}$ г для технологии 2. Средняя нормальная нагрузка в результате испытаний составила 2,65 и 2,49 Н соответственно. В результате интенсивность изнашивания для обоих образцов отличилась

незначительно и составила для технологий $2,81 \cdot 10^{-5}$ и $2,38 \cdot 10^{-5}$ соответственно (рис. 7). Характер износа можно определить по трекам (рис. 8).

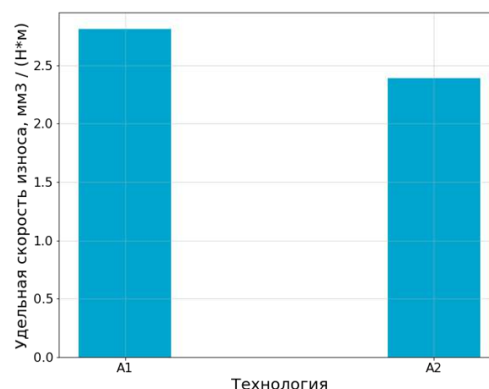


Рис. 7. Значения интенсивности изнашивания:
а – $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ мин; б – $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин
Fig. 7. Wear rate values: a is $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ min, б is $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ min

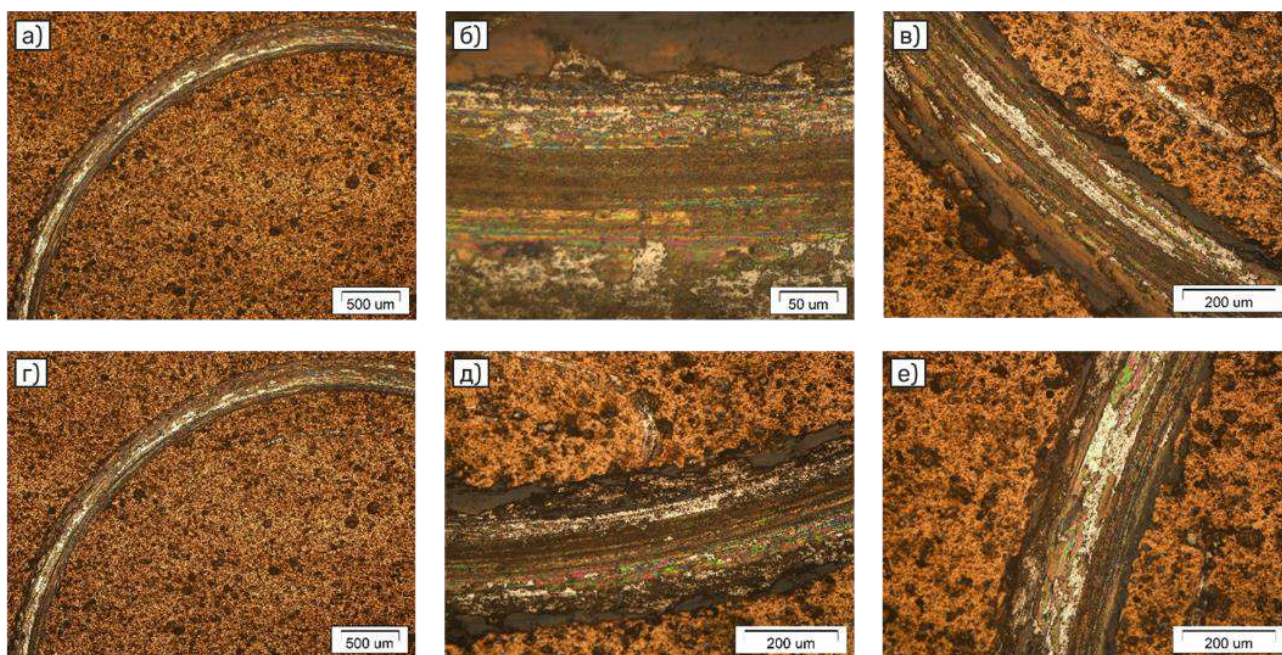


Рис. 8. Треки износа для технологий: а–в – $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ мин; г–е – $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин
 Fig. 8. Wear tracks for technologies: [а, б, в]: $T = 400^{\circ}\text{C}$, $t = 47$ min, [г, д, е] $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ min

По трекам видно, что наблюдается смешанный механизм износа, который сочетает в себе адгезионное и абразивное воздействие. Это подтверждается наличием участков сцепления и явных царапин от твердых частиц вдоль трека износа. Особенностью является характер разрушения участков адгезионного взаимодействия, который происходит без выраженного течения материала и имеет хрупкий характер из-за наличия напряжений в материале вследствие образования твердого раствора внедрения азота, что приводит к уменьшению пластичности слоев.

По совокупности исследуемых физико-механических характеристик определено, что технология с режимами обработки $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин обладает сравнительно наивысшими свойствами.

Заключение

Таким образом, впервые изучено влияние температуры детали и продолжительности процесса ионного азотирования на микротвердость, адгезионную прочность и износостойкость поверхности после комплексной ионно-плазменной обработки. Установлено, что по совокупности исследуемых физико-механических характеристик определено, что технология с режимами обработки в плазменном источнике с накатным катодом при технологических режимах $T = 475^{\circ}\text{C}$, $t = 35$ мин обладает интенсивностью изнашивания в $11 \cdot 10^{-5}$ г и адгезионной прочностью в 19,5 Н.

Список источников

1. Власов С.Н., Пикмирзин М.Ю., Власова А.С. Анализ методов упрочнения металлорежущего инструмента // Парадигма. 2019. №. 2. С. 113-119.

2. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
3. Формирование геометрии кромки режущего инструмента методом лазерной абляции и влияние лазерной обработки на стойкость пластин из Р6М5 / Федоров С.В. и др. // Илм-фан ва инновацион ривожланиш/Наука и инновационное развитие. 2020. Т. 3. №. 5. С. 80-85.
4. Мигранов М.Ш., Мухамадеев В.Р., Мигранов А.М. Исследование триботехнических характеристик материалов и покрытий для металлорежущего инструмента // Трибология – машиностроению. 2018. С. 338-341.
5. Рамазанов К.Н., Будилов В.В., Вафин Р.К. Азотирование быстрорежущей стали Р6М5 в тлеющем разряде с наложением магнитного поля // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. №. 5. С. 39-42.
6. Будилов В.В., Рамазанов К.Н., Вафин Р.К. Влияние скрещенных электрических и магнитных полей на ионное азотирование в тлеющем разряде // Физика и химия обработки материалов. 2011. №. 6. С. 10-15.
7. Золотов И.В., Рамазанов К.Н. Влияние азотирования в тлеющем разряде с полым катодом на структуру и свойства поверхности титановых сплавов ВТ6 и ВТ3-1 // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2016. Т. 20. №. 2 (72). С. 23-28.
8. Вафин Р.К. Влияние ионного азотирования в тлеющем разряде с магнитным полем на структуру и фазовый состав инструментальных сталей Р6М5 и Х12: дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / Вафин Руслан Каримович. Уфа, 2013. 142 с.

9. Gómez-Vagas O. A. et al. TiN and Boride Layers Obtained by Dehydrated Paste-Pack Boriding and PVD Treatments Formed on AISI M2 Steel // *Microscopy and Microanalysis*. 2019, vol. 25, no. S2, pp. 770-771.
10. Naeem M. et al. Wear and corrosion studies of duplex surface-treated AISI-304 steel by a combination of cathodic cage plasma nitriding and PVD-TiN coating // *Ceramics International*. 2022, vol. 48, no. 15, pp. 21473-21482.
11. Das K. et al. Effect of Pre-treatment and Duration of Pulse Plasma Nitriding on Duplex Plasma Treatment by Physical Vapor Deposition of TiN on AISI D2 Steel // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023, pp. 1-13.
12. Moreno-Bárcenas A. et al. Synergistic effect of plasma nitriding and bias voltage on the adhesion of diamond-like carbon coatings on M2 steel by PECVD // *Surface and Coatings Technology*. 2019, vol. 374, pp. 327-337.
13. Chang Y.Y., Chao L.C. Effect of substrate bias voltage on the mechanical properties of AlTiN/CrTiSiN multilayer hard coatings // *Vacuum*. 2021, vol. 190, 110241.
14. Serra P. L. C. et al. A review of duplex treatment effect on high-speed steel tools // *J Multidiscip Eng Sci Technol*. 2020, vol. 7, no. 4.
15. Quinones-Salinas M.A., Mercado-Solis R.D. Comparative study of three methods for measuring thickness of PVD hard coatings // *International Journal of Surface Science and Engineering*. 2015, vol. 9, no. 6, pp. 493-509.
16. Libório M. S. et al. Enhanced surface properties of M2 steel by plasma nitriding pre-treatment and magnetron sputtered TiN coating // *International Journal of Surface Science and Engineering*. 2020, vol. 14, no. 4, pp. 288-306.
17. Díaz-Guillén J.C. et al. Duplex plasma treatment of AISI D2 tool steel by combining plasma nitriding (with and without white layer) and post-oxidation // *Surface and Coatings Technology*. 2020, vol. 385, 125420.
18. Mercado-Solis R.D. et al. Micro-scale abrasive wear testing of CrN duplex PVD coating on pre-nitrided tool steel // *Materials Research*. 2017, vol. 20, pp. 1092-1102.
19. Григорьев С.Н., Табаков В.П., Волосова М.А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 379 с.
- resistant coatings: textbook]. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 336 p. (In Russ.)
3. Fedorov S. V. et al. Formation of cutting tool edge geometry by laser ablation and the influence of laser treatment on the durability of P6M5 inserts. *Nauka i innovacionnoe razvitie* [Science and Innovation Development], 2020;3(5):80-85.
4. Migranov M. Sh., Mukhamadeev V. V. R., Migranov A. M. Investigation of tribotechnical characteristics of materials and coatings for metal-cutting tools. *Tribologiya – mashinostroeniye* [Tribology for Mechanical Engineering], 2018;338-341. (In Russ.)
5. Ramazanov K. N., Budilov V. V., Vafin R. K. Nitriding of high-speed steel P6M5 in a glow discharge with a superimposed magnetic field. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening technologies and coatings], 2010;(5):39-42. (In Russ.)
6. Budilov V. V., Ramazanov K. N., Vafin R. K. Influence of crossed electric and magnetic fields on ion nitriding in glow discharge. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Processing], 2011;(6):10-15. (In Russ.)
7. Zolotov I. V., Ramazanov K. N. Influence of nitriding in the glow discharge with a hollow cathode on the structure and surface properties of titanium alloys BT6 and BT3-1. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Ufa State Aviation Technical University], 2016;20(2):23-28. (In Russ.)
8. Vafin R. K. Vliyanie ionnogo azotirovaniya v tleyushchem razryade s magnitnym polem na strukturu i fazovyy sostav instrumentalnykh stalej R6M5 i H12: dis. ... kand. tekhn. nauk [Influence of ion nitriding in glow discharge with magnetic field on structure and phase composition of tool steels P6M5 and X12. Ph.D. dissertation]. Ufa, 2013. 142 p. (In Russ.)
9. Gómez-Vagas O. A. et al. TiN and Boride Layers Obtained by Dehydrated Paste-Pack Boriding and PVD Treatments Formed on AISI M2 Steel. *Microscopy and Microanalysis*. 2019;25(S2):770-771.
10. Naeem M. et al. Wear and corrosion studies of duplex surface-treated AISI-304 steel by a combination of cathodic cage plasma nitriding and PVD-TiN coating. *Ceramics International*. 2022;48(15):21473-21482.
11. Das K. et al. Effect of Pre-treatment and Duration of Pulse Plasma Nitriding on Duplex Plasma Treatment by Physical Vapor Deposition of TiN on AISI D2 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023;1-13.
12. Moreno-Bárcenas A. et al. Synergistic effect of plasma nitriding and bias voltage on the adhesion of diamond-like carbon coatings on M2 steel by PECVD. *Surface and Coatings Technology*. 2019;374:327-337.
13. Chang Y.Y., Chao L.C. Effect of substrate bias voltage on the mechanical properties of AlTiN/CrTiSiN multilayer hard coatings. *Vacuum*. 2021;190:110241.

References

1. Vlasov S.N., Pikmirzin M.Yu., Vlasova A.S. Analysis of methods of metal-cutting tool hardening. *Paradigma* [Paradigm], 2019;(2):113-119. (In Russ.)
2. Vereshchaka A. S. *Rabotospособnost' rezhushchego instrumenta s iznosostojkimi pokrytiyami: ucheb. posobie* [Workability of cutting tools with wear-

14. Serra P. L. C. et al. A review of duplex treatment effect on high-speed steel tools. *J. Multidiscip Eng. Sci. Technol.* 2020;7(4).
15. Quinones-Salinas M. A., Mercado-Solis R. D. Comparative study of three methods for measuring thickness of PVD hard coatings. *International Journal of Surface Science and Engineering.* 2015;9(6):493-509.
16. Libório M. S. et al. Enhanced surface properties of M2 steel by plasma nitriding pre-treatment and magnetron sputtered TiN coating. *International Journal of Surface Science and Engineering.* 2020;14(4):288-306.
17. Díaz-Guillén J. C. et al. Duplex plasma treatment of AISI D2 tool steel by combining plasma nitriding (with and without white layer) and post-oxidation. *Surface and Coatings Technology.* 2020;385:125420.
18. Mercado-Solis R. D. et al. Micro-scale abrasive wear testing of CrN duplex PVD coating on pre-nitrided tool steel. *Materials Research.* 2017;20:1092-1102.
19. Grigoriev S. N., Tabakov V. P., Volosova M. A. *Tekhnologicheskie metody povysheniya iznosostojkosti kontaktnyh ploshchadok rezhushchego instrumenta: monografiya* [Technological methods to improve the wear resistance of contact areas of cutting tools: monograph]. Stary Oskol: TNT, 2011, 379 p. (In Russ.)

Поступила 27.04.2024; принята к публикации 29.04.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 27/04/2024; revised 29/04/2024; published 24/12/2024

Нагимов Рустем Шамилевич – аспирант, ассистент,
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: r.sh.nagimov@gmail.com. ORCID 0000-0002-5854-3396

Вафин Руслан Каримович – кандидат технических наук, доцент,
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: vafinrk@mail.ru. ORCID 0000-0003-3222-049X

Rustem Sh. Nagimov – Postgraduate Student, Assistant,
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: r.sh.nagimov@gmail.com. ORCID 0000-0002-5854-3396

Ruslan K. Vafin – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: vafinrk@mail.ru. ORCID 0000-0003-3222-049X



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.923.1
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-120-133

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ НИТИНОЛА С ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Казимиров Д.Ю., Солер Я.И.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Перспективы применения уникального металла с эффектом памяти формы в конструкциях механизмов тормозятся проблемами его механической обработки. Данное исследование предназначено для повышения обрабатываемости нитинола. **Цель работы.** Доказать возможность фазового превращения «мартенсит – аустенит» нитинола на поверхности технологическими методами, позволяющего добиться точности абразивной обработки плоскостей. **Используемые методы.** Работа представляет собой экспериментальное исследование с использованием математической статистики. **Новизна.** Определено, что в отличие от других металлов нитинол нельзя характеризовать хорошей обрабатываемостью резанием при снятии больших объемов припуска с высокой производительностью процесса. **Результат.** Впервые подтверждена возможность управления фазовыми превращениями в нитиноле параметрами режима шлифования. На основе дисперсионного и регрессионного анализов получены стохастические модели и изучены поверхности отклика - микротвердости, как одной из главных характеристик фазового состава металла, учитывающие влияние режимов шлифования и характеристик абразивного инструмента. Получены изменения точности поверхности при шлифовании поверхности с предварительным термическим упрочнением плазмой и закалкой в воде, так и без нее. В конечном счете обеспечена обрабатываемость нитинола с температурой срабатывания выше +75°C за счет изменения микротвердости в поверхностном слое деталей благодаря фазовым превращениям. **Практическая значимость.** Предложены уравнения описания показателя качества поверхности, величины и закономерности изменения погрешности формы плоскостей. Даны рекомендации для кругов, в частности по зернистости и пористости. Разработаны режимы шлифования с обильным охлаждением и параметры термического упрочнения плазмой, позволяющие гарантированно обеспечить отклонение от плоскостности до 7 мкм. Предложен маршрут обработки деталей из нитинола.

Ключевые слова: точность формы, микротвердость, шлифование, термообработка плазмой, никелид титана, фазовые превращения

© Казимиров Д.Ю., Солер Я.И., 2024

Для цитирования

Казимиров Д.Ю., Солер Я.И. Обеспечение точности поверхности при шлифовании нитинола с высокой температурой превращений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 120-133. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-120-133>



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

ACHIEVE SURFACE PRECISION WHEN GRINDING NITINOL WITH HIGH TRANSFORMATION TEMPERATURES

Kazimirov D.Yu., Soler Y.I.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The prospects for the use of a unique metal with a shape memory effect in the design of machinery are hampered by the problems of its mechanical processing. This research is designed to improve the machinability of nitinol. **Objectives.** It is required to prove the possibility of the martensite-austenite phase transformation of nitinol on the surface using technological methods, which allows achieving precision in abrasive processing of planes. **Methods Applied.** The work is an experimental study using mathematical statistics. **Originality.** It has been determined that nitinol, unlike other metals, has low cutting machinability when removing large volumes of materials with high process productivity. **Result.** For the first time, the possibility of controlling phase transformations in nitinol by grinding mode parameters has been confirmed. Based on ANOVA and regression analyses, stochastic models were obtained and microhardness response surfaces were studied, as one of the main characteristics of the phase composition of the metal, taking into account the influence of grinding modes and characteristics of the abrasive tool. Changes in surface accuracy were obtained when grinding the surface with preliminary thermal hardening by plasma and quenching in water, and without it. Ultimately, the machinability of nitinol with an operating temperature above +75°C is ensured due to changes in microhardness in the surface layer of parts because of phase transformations. **Practical Relevance.** Equations are proposed to describe the surface quality indicator, the magnitude and pattern of changes in the error of the shape of the planes, as well as recommendations for abrasive wheels, in particular regarding grain size and porosity. Grinding modes with abundant cooling and plasma thermal hardening parameters have been developed to ensure a guaranteed deviation from flatness of up to 7 microns. A technological process route for processing nitinol parts has been proposed.

Keywords: shape accuracy, microhardness, grinding, plasma heat treatment, titanium nickelide, phase transformations

For citation

Kazimirov D.Yu., Soler Y.I. Achieve Surface Precision When Grinding Nitinol With High Transformation Temperatures. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 120-133. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-120-133>

Введение

Сплавы на основе никель-титана (NiTi) обладают особыми свойствами, в том числе эффектом памяти формы, необходимым для механизмов пределом прочности, высокой термической и коррозионной стойкостью. Они применяются во многих отраслях машиностроения (аэрокосмической, робототехнической, автомобильной) в качестве актуаторов и в биомедицине.

Потребность эффекта памяти формы при высокой дороговизне никелида титана привела к созданию гибридных конструкций, совершающих механическую работу в заданных температурных условиях, а также композиционных соединений или биметаллов. Активно исследуются методы получения и физико-механические свойства сварных конструкций из нитинола с различными марками сталей, которые используются для изготовления термомеханических силовых элементов, сочетающих высокую прочность стали со сверхупругим поведением нитинола [1]. Перспективным направлением в области создания гибридных конструкций является разработка методов получения неразъемных соединений нитинола с ти-

тановыми сплавами [2, 16]. Благодаря таким соединениям обеспечивается экономия и рациональное использование нитинола.

Обрабатываемость этих сплавов затруднена из-за их высокой пластичности и химической активности, низких теплопроводности и модуля упругости. Как указано в [3], физико-механические свойства интерметаллического соединения никеля и титана сильно отличаются от титановых сплавов. Известно, что нитинол при комнатной температуре может находиться в двух разных фазовых состояниях. В фазе мартенсита (низкотемпературное состояние NiTi) его предел текучести и модуль упругости в несколько раз ниже, чем в состоянии аустенита.

Основной причиной низкой обрабатываемости резанием считается высокая прочность на разрушение, составляющая 755–960 МПа [4], при низком коэффициенте вязкости разрушения. В механике разрушения указанный параметр играет доминирующую роль. Формирование трещины требует значительных напряжений в зоне сдвига, от чего процесс заторможен, а образование стружки затруднено. Неравномерные деформации сдвига стружки локализованы в узкой полосе. Это приводит к колебаниям сил реза-

ния с возникновением вибраций, которые в сочетании с высокой температурой могут вызывать преждевременные усталостные разрушения лезвийных инструментов. При малой теплопроводности NiTi усиливаются негативные эффекты при концентрации теплоты в зоне резания. Это приводит к аккумуляции высокой температуры на границе раздела «режущая кромка – заготовка» с последующим катастрофическим ее изломом.

Для NiTi традиционные процессы обработки, как точение и фрезерование, затруднены, поскольку они могут вызывать негативные изменения твердости и размеров зерен в слоях, а также фазовые превращения [5]. Сказанное снижает эффект памяти формы деталей из никелида титана [6, 17]. В связи с чем форму деталей из заготовок, например плита или лист, получают электроэрозионной обработкой.

В то же время нитинол хорошо поддается абразивной обработке, что позволяет обеспечивать высокие показатели чистоты поверхности. Исследования, посвященные шлифованию никелида титана, направлены на повышение его обрабатываемости [7]. Дальнейшим развитием в этой области является поиск эффективного абразива для шлифования без потери функциональных свойств нитинола [8]. Однако нитинол, как и другие интерметаллиды на основе титана, имеют ряд проблем с обрабатываемостью шлифованием [9]. Шлифование может вызвать рост температур резания, что в сочетании с напряжениями в зоне обработки негативно воздействует на микроструктуру и фазовый состав мартенсита NiTi [10-12, 18]. Одновременно при шлифовании без эффективного охлаждения снижается точность формы поверхности [13], образуется псевдорегулярный макрорельеф с чередованием выступов и впадин. В то же время при шлифовании NiTi в аустенитном состоянии отсутствуют указанные проблемы и повышается эффективность процесса.

Цель работы – обеспечить повышение точности обработки никелида титана фазовым переходом «мартенсит – аустенит» за счет теплового воздействия при обработке абразивным инструментом и поверхностной закалкой плазмой, а также сохранением этой фазы до окончания шлифования.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – цилиндрические образцы с размерами $D \times H = 40 \times 35$ мм, полученные из круглого проката материала ТН-1 следующего состава: Ti – 44,31 ат. % и Ni – 55,69 ат. %, производство ООО «МАТЭК-СПФ», г. Москва, Россия. Температура конца мартенситного превращения, равная $+78^\circ\text{C}$, предполагает нахождение металла при комнатной температуре в состоянии мартенсита, а также предопределяет кратковременное появление фазы аустенита в процессе шлифования. Свойства фаз приведены в табл. 1.

Таблица 1. Свойства исследуемого материала NiTi
Table 1. Properties of the NiTi material under study

Характеристика	Фаза никелида титана	
	Мартенсит	Аустенит
Предел прочности, МПа	800–900	
Предел текучести, МПа	50–150	200–700
Теплопроводность, Вт/см·К	0,08	0,18
Коэффициент теплового расширения, $^\circ\text{C}^{-1}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$11 \cdot 10^{-6}$
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	470	
Коэффициент вязкости разрушения, $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ (ГОСТ 25.506-85)	39–53	–
Прочность на разрушение, МПа	755–960	

Примечание. Никелид титана обладает сверхэластичностью, поэтому его предел прочности дополнен сопротивлением разрушению [14].

Предварительно на всех образцах подрезались торцы «как чисто» с биением не более 0,1 мм твердосплавным резцом с покрытием TiN на режиме: $n = 125 \text{ мин}^{-1}$, $S = 0,055 \text{ мм/об}$, $t = 0,03 \text{ мм}$. Отметим, что повышение режимов приводило к неминуемому разрушению резца. Подрезка допустима только от центра к краю, иначе, приближаясь к центру, где $V \rightarrow 0$, следовал скол режущей кромки. Но даже при таких условиях стойкость режущей кромки не превышала 3–4-х проходов. На шлифовальном станке модели 3Г71М образцы закреплялись так, чтобы плоский торец цилиндрического образца был параллельный подачам. Обработка велась многопроходным шлифованием. Основные условия исследования представлены в табл. 2, остальные оставались неизменными.

Характеристики абразивного инструмента выбраны с учетом исследовательской задачи, заключающейся в создании и регулировании теплового потока в зоне шлифования. Известно, что высокая пористость способствует проникновению СОЖ за счет центробежных сил и интенсифицирует теплоотвод в зоне резания. Кроме того, на количество теплоты при резании оказывает влияние и такая характеристика, как размер зерен, поэтому предложено ее также варьировать. Силовой фактор в экспериментах рассматривался незначимым. Параметры процесса и условия правки трех различных характеристик кругов сохранялись одинаковыми.

Для протекания процесса фазового превращения в образцах из ТН-1 установлены увеличенные значения врезания и перебега, равные 100 мм. Таким образом, задавалось время выдержки.

Для проверки выдвинутой гипотезы о влиянии интенсивности нагрева при шлифовании никелида титана на его фазовые превращения был реализован полный факторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^2 с центральной точкой, позволяющей выявить нелинейность зависимой переменной, для каждого инструмента i в отдельности. Для оценки изменчивости ошибки эксперимента планы были частично реплицированы в центральной точке плана с $n = 3$. Факторы и их уровни приведены в табл. 3.

Таблица 2. Основные условия экспериментов

Table 2. Basic experimental conditions

Технологический фактор/параметр	Значение
Абразивный круг:	Форма 01
код или уровень $i = 1$, зеленый карбид кремния, зернистость $F60$ (25 ГОСТ3647-80), обычная пористость	63CF60 K6 V
код или уровень $i=2$, черный карбид кремния, зернистость 60 (25 ГОСТ3647-80), высокая пористость	Norton 37C60 K12 VP
код или уровень $i = 3$, зеленый карбид кремния, зернистость 46 (40 ГОСТ3647-80), высокая пористость	Molemab 08C046 I12 V01P2
Скорость круга, м/с	35
Глубина резания t , мм	0,01
Припуск z , мм	0,18
Количество выходящих проходов	1
Врезание, перебег, мм	100
Подача СОЖ – 5%-й водный раствор «Аквол-6», л/мин	8-10

Таблица 3. Условия проведения полного факторного эксперимента типа 2^2 Table 3. Conditions for conducting a full factorial experiment of the 2^2 type

Факторы	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
		верхний (+1,00)	основной (0,00)	нижний (-1,00)
A – продольная подача S , м/мин	2	8	6	4
B – поперечная подача S_n , мм/дв. ход	2	6	4	2

Результаты экспериментов оценивались качественными и количественными характеристиками. Для обработанной поверхности снималась топографическая картина с использованием метода красок, который удобен для индикации впадин на макрорельефах. Предварительно на образец наносится слой масляной краски «Крапак красный» по ТУ 2331-023-05751640-2007. Эта краска обладает размером помола крупинки породы до 2 мкм, которые заполняют впадины от 2 мкм и более. Ею покрывали поверхность ровным слоем с помощью резинового валика. Излишки нанесенной краски удалялись с изучаемой поверхности до прекращения переноса на скользящий эталон плоскостности – плиту гранитную поверочную 400×400, класс точности 1 ТУ 2-034-802-74. Объект изучения фотографировался аппаратом в режиме макросъемки с расстоянием фокусировки 250 мм. На основе полученной топографии определялись отклонения от плоскостности Δ между выявленными выступом и впадиной микатором 2ИПМ с ценой деления 1 мкм. В работе измерялась микротвердость поверхности HV 0,2 по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 без изменений по глубине, которую определяли на ПМТ-3 четырехгранной пирамидой при нагрузке 200 г с выдержкой 10 с. Это позволило косвенно выявить структурно-фазовые превращения, поскольку микротвердость аустенитной фазы выше, чем мартенситной. Съем припуска и шлифуемость разных фаз никелида титана оценивалась изменением веса образца, измеренного на ЕТ-2000П с ценой деления 0,01 г.

Полученные результаты и их обсуждение

Наблюдения за процессом шлифования никелида титана подтвердили правильность постановки эксперимента по влиянию режимов шлифования на явления, протекающие в процессе. Отмечено, что при шлифовании с наименьшей интенсивностью процесса наблюдалось значимое уменьшение съема металла m , сопровождающееся слабым «искрением» от шлифования. Это происходило только при рабочем ходе инструмента и в той полуплоскости, которая соответствовала выходу круга из заготовки по вектору подачи S_n . При этом съем снижался, когда была уже удалена часть припуска, то есть не на первом ходе, что связано с повышением физико-механических характеристик обрабатываемого мартенсита.

В процессе обработки при перемещении круга по вектору подачи S_n в полуплоскости, с которой началось врезание от рабочего к центру, происходит постепенное накопление тепла у поверхности детали, при этом обработка мягкого и вязкого аустенита ведется с легким удалением металла с поверхности и формированием псевдорегулярного рельефа от движений по продольной подаче. В той полуплоскости, с которой следует выход круга, накопленное тепло приводит к структурно-фазовым превращениям, а в момент быстрого охлаждения СОЖ и к повышению физико-механических характеристик. Возникающий при этом более прочный аустенит обрабатывается иначе, без температурных и упругопластических составляющих погрешности. Шлифование переходит в

процесс тонкой абразивной обработки, сопровождающийся снижением интенсивности съема и повышением точности поверхности. За время нахождения абразивного круга вне контакта с заготовкой (в то время, пока задается глубина для следующего прохода) деталь остывала и данное явление повторялось, но уже в противоположной полуплоскости.

Подтверждено то, что существует закономерность между съемом m , погрешностью формы Δ и режимом, при котором изменяется поверхностная микротвердость HV . Для возможности изучения данного явления построена корреляция в виде трехкомпонентной точечной диаграммы $m, \Delta = f(HV)$, в которой приведены результаты всех опытов и характеристики кругов. Выделены точками те опыты, которые соответствуют неинтенсивному процессу шлифования ($A = B = -1$), а эллипсом – направление корреляции (рис. 1).

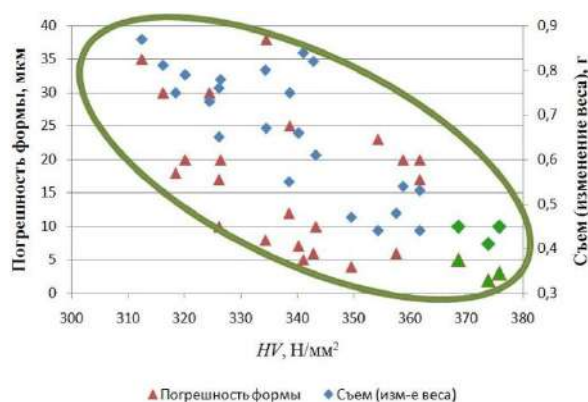


Рис. 1. Точечная диаграмма экспериментальных значений погрешности формы Δ и съема веса m от микротвердости поверхности HV для всех опытов

Fig. 1. Scatter plot of experimental values of shape error Δ and weight removal m from surface microhardness HV for all experiments

Как видно из представленной диаграммы, с увеличением поверхностной микротвердости более 350 H/mm^2 съем m заметно уменьшается, а до 340 HV он выше и характеризуется изменением веса после шлифования от 0,6 до 0,9 г. При превышении микротвердости 360 HV , являющейся характерной для аустенитной фазы никелида титана, вес изменяется не более чем на 0,45 г. Похожую, но менее выраженную картину имеет и погрешность формы, что вероятно связано с исходной погрешностью заготовки и особенностями многопроходного шлифования. Следовательно, определяющим в такой закономерности является микротвердость. При этом после шлифования происходило повышение поверхностной микротвердости по сравнению с исходной, равной 290 HV . Степень наклепа изменяется от 9–12% для $A/B = +1/+1$, до 20–29% при $A/B = -1/-1$. Меньшее значение получено для круга $i = 2$, что объяснимо в связи с меньшей

возможной из трех температуры резания благодаря малой зернистости и высокой пористости, а большее значение для инструмента $i=3$. В последнем случае возможной доминантой выступило более крупное зерно.

Для производительного режима шлифования ($A = B = +1$) съем припуска был наибольшим и устойчивым на всем протяжении шлифования и на всех рабочих ходах при выбранных характеристиках абразивного инструмента $i=1, 2, 3$ (рис. 2). Так, снижение веса образца m после шлифования в 1,6–1,9 раза больше по сравнению с противоположной точкой плана $A/B = -1/-1$.

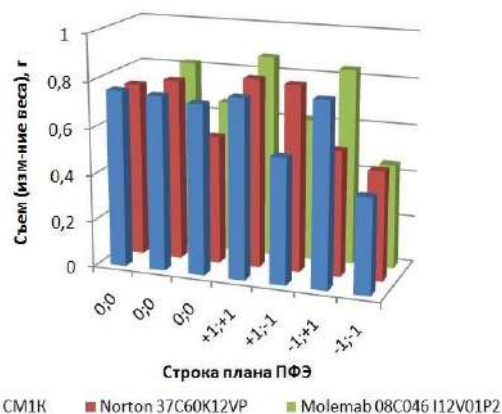


Рис. 2. Влияние характеристик кругов и режимов шлифования на съем припуска с поверхности никелида титана

Fig. 2. Influence of wheel characteristics and grinding modes on stock removal from titanium nickelide surface

В центре плана ($A = 0; B = 0$), в котором количество повторений опытов $n = 3$, прослеживалась общая тенденция стабильного, но меньшего съема, чем в точке ($A = +1; B = +1$). Такое снижение m согласуется с поверхностной микротвердостью HV и отклонением от плоскостности Δ . При этом в отличие от других титановых сплавов заметное снижение съема металла оказывает положительный, а не отрицательный, как ожидалось, эффект. В этом случае отмечается лучшая точность формы поверхности до $\Delta = 2-5$ μm без краевых дефектов. Учитывая, что в центре плана такое наблюдение отмечено только в одном из трех опытов, было решено увеличить дублирование наблюдений. Была поставлена задача определить режимы шлифования, при которых съем металла заметно ниже, а точность формы выше, чем в остальных опытах. Для установления этого план ПФЭ 2^2 был дополнен опытами со следующими сочетаниями уровней факторов: $A/B = [-1;-0,5], [-0,5;-1], [0;-1], [0;-0,5]$ для круга $i = 1$. Отмечено, что в перечисленных опытах описанная закономерность соблюдается. При этом съем повышался с увеличением обеих подач S и S_n вместе. Однако изменение величины продольной подачи S сказывалось менее заметно на съеме и точности формы, неже-

ли чем для поперечной S_{Π} . Так, при $B = -0,5$ и различных уровнях фактора A изменение веса составило $0,44-0,53$ г. При этом погрешность формы составила $\Delta = 18 \pm 2$ мкм. Тогда как для $B = -1$ погрешность не превысила 6 мкм при таком же съеме припуска.

Сказанное связано с явлением накопления тепла в детали, которое было выявлено по вектору S_{Π} от начала многопроходного рабочего хода и до выхода за поперечный габарит заготовки [15]. Можно предположить, что при увеличении количества продольных ходов возрастает количество аккумулируемой теплоты резания, что приводит к структурно-фазовым превращениям и в поверхностном слое образуется хорошо шлифуемый аустенит NiTi. За счет охлаждения поливом СОЖ прямо во время шлифования происходит поверхностная закалка, повышающая микротвердость. Отметим тот факт, что при шлифовании кругом 63CF60 K6V на режиме $A; B = [0; 0]$, $z = 0,1$ мм без охлаждения микротвердость была ниже.

Установив корреляционную связь, для дальнейшего изучения потребовалось построить регрессионную модель, что позволяет сделать ПФЭ. Автоматизация процедуры поиска статистической модели реализована на базе программы *Stat-Ease Design-Expert 11 Demo*, в которой получены регрессии дисперсионного анализа (ДА) с постоянными факторами.

При реализации однофакторных экспериментов было выявлено, что влияние характеристики абразивного инструмента на микротвердость поверхности аппроксимируется линейной зависимостью. Это подтверждено и на стадии анализа данных наблюдений в ходе текущего исследования. Для всех трех экспериментов построены диаграммы рассеяния от каждого управляемого фактора и определена корреляция. Отметим, что наиболее стабильная связь между микро-

твердостью и предикторами выявлена в эксперименте для $i=3$ с наибольшими зернистостью и пористостью. Как видно из рис. 3, наблюдается средняя сила связи и отрицательная корреляция с доминированием влияния подачи S_{Π} .

Коэффициенты корреляции для всех абразивных кругов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Коэффициент корреляции между микротвердостью и параметром обработки шлифованием

Table 4. Correlation coefficient between microhardness and grinding processing parameter

Абразивный круг	Задающая переменная	Коэффициент корреляции
63CF60 K6 V	S	-0,166
	S_{Π}	-0,417
37C60 K12 VP	S	-0,729
	S_{Π}	-0,236
08C046 I12 V01P2	S	-0,594
	S_{Π}	-0,638

Анализируя табл. 4, можно констатировать факт, что более крупное абразивное зерно шлифовального круга и высокая пористость способствуют проявлению главных эффектов на поверхностную микротвердость. В этом случае коэффициент корреляции больше, особенно для поперечной подачи, где превышение составило 1,5–2,7 раза. Невысокие значения коэффициентов корреляции для круга 63CF60 K6 V позволяют утверждать о преимуществе обычной пористости, так как область допустимых оптимальных режимов может быть расширена благодаря зависимости с меньшим изменением микротвердости HV.

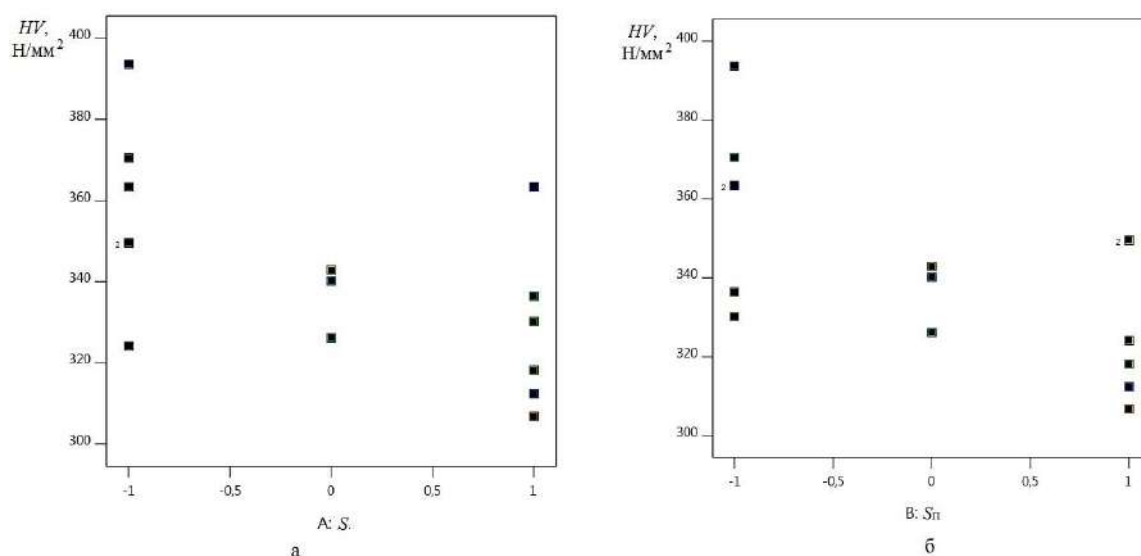


Рис. 3. Диаграмма рассеяния показателя микротвердости HV при шлифовании кругом $i = 3$ на уровнях факторов: а – для продольной подачи S ; б – для поперечной подачи S_{Π}

Fig. 3. Scatter diagram of microhardness index HV when grinding with $i = 3$ wheel at factor levels: а is for longitudinal feed S ; б is for cross feed S_{Π}

Для ПФЭ 2^2 модели представлены полиномами первого порядка, так как возможна оценка только главных эффектов (A , B) и эффекта взаимодействия AB . Для большей наглядности выполнен Парето-анализ, представленный на рис. 4, для абразивного инструмента $i = 1$ и $i = 3$, на котором указаны критические значения критерия Стьюдента.

Основные эффекты проверены на 5%-м уровне значимости по F -критерию и представлены в табл. 5. Также оценивалась значимость суммы квадратов несоответствия, являющаяся частью дисперсии остатков. На этом этапе проводилась оценка моделей, рассчитывались коэффициенты детерминации – прогнозируемый и скорректированный, с поправкой на количество членов модели. Их разница должна быть не более 0,2. Данные модели микротвердости поверхности при шлифовании никелида титана значимы и

адекватны. Их математические выражения представлены в табл. 5. Отметим невысокую величину коэффициента детерминации R^2 при круге $i = 1$, что свидетельствует о наличии отдельных наблюдений, не объяснимых предсказанной моделью.

Члены регрессионного уравнения получены на базе оценок по методу наименьших квадратов. Также вычислен показатель D_{FFITS} для каждого опыта, являющегося студентизированной разницей между прогнозируемым значением с j -м наблюдением и прогнозируемым значением без j -го наблюдения. Таким образом проверялась подгонка регрессионной модели к опытным результатам, позволяющая добиться более точного математического описания поверхности отклика. Полученные D_{FFITS} свидетельствуют о хорошем совпадении средних наблюдений с величинами, предсказанными по моделям ДА.

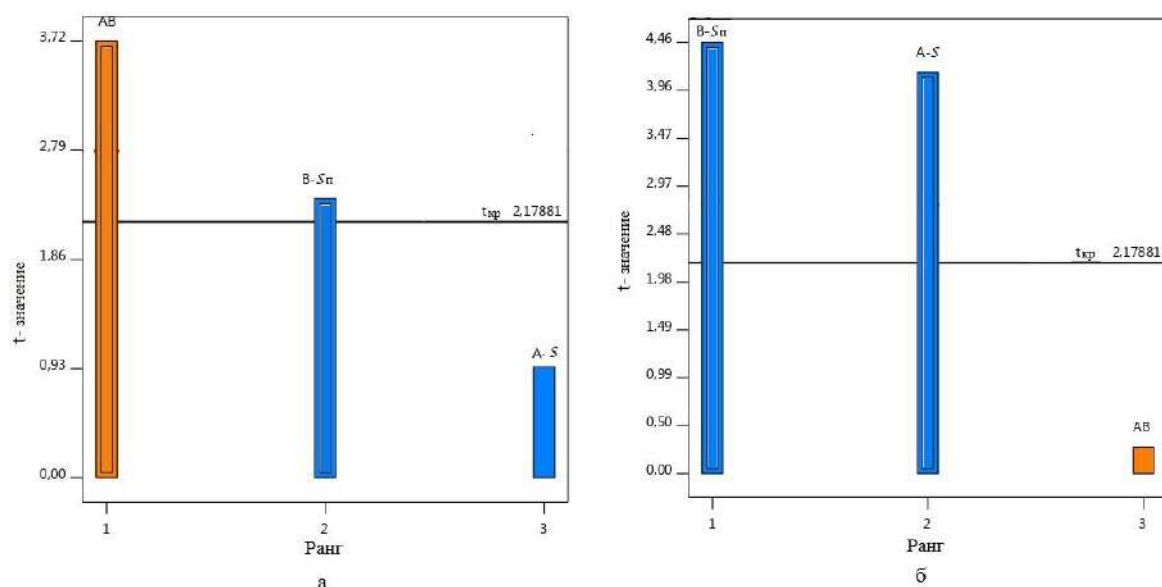


Рис. 4. Парето-анализ эффектов на поверхностную микротвердость HV при шлифовании кругами:

а – 63CF60 K6V; б – 08C046 I12 V01P2

Fig. 4. Pareto analysis of the effects on surface microhardness HV during wheel grinding:

a is 63CF60 K6V; б is 08C046 I12 V01P2

Таблица 5. Результаты ДА и регрессии для поверхностной микротвердости HV в зависимости от изучаемых характеристик абразивного инструмента

Table 5. ANOVA and regression results for surface microhardness HV depending on the studied characteristics of the abrasive tool

Параметры	Характеристика абразивного инструмента		
	63CF60 K6 V ($i=1$)	37C60 K12 VP ($i=2$)	08C046 I12 V01P2 ($i=3$)
Расчетный уровень p для ДА (значима при $p < 0,05$)			
$A: S$	0,3882	0,001	0,0012
$B: S_n$	0,0418	0,1724	0,0007
AB	0,0039	0,061	0,7983
Регрессионный анализ			
R^2	0,5318	0,5979	0,7206
Предсказанный R^2	0,3482	0,4580	0,61
Регрессионное уравнение	$HV=337,08-8,908B+13,942AB$	$HV=335,44-14,58A-7,00AB$	$HV=341,79-15,27A-16,41B$
D_{FFITS}	Не превышает допустимую		

Приведенные результаты по планам ПФЭ 2^2 для исследуемых характеристик абразивного инструмента при варьировании режимов шлифования позволили сформулировать выводы. Благодаря сравнительно сильному влиянию пористости при увеличенной зернистости на формируемый тепловой поток, только для круга $i = 3$ в модель вошли оба непосредственно воздействующих фактора A и B (см. табл. 5). Для характеристик инструментов $i = 1$ и $i = 2$ их влияние смешано с взаимодействием AB . При этом для круга $i = 2$ взаимодействие на грани допустимости включения в модель ($p = 0,06 > 0,05$). Как следствие, для круга $i = 3$ значимость основных факторов наибольшая по сравнению с другими результатами ДА. В результате предсказано более точное уравнение, о чем свидетельствует коэффициент $R^2 = 0,72$, для других характеристик инструментов $i = 1, 2$ они ниже соответственно 0,53 и 0,6. Для всех полученных регрессионных моделей разница при сопоставлении рассчитанных коэффициентов детерминации меньше 0,2, подтверждая правильность построения модели. Регрессионные модели приведены в нормированном виде, позволяя оценить вклад каждого члена уравнения в контролируемую изменчивость поверхностной микротвердости. Отметим отрицательные знаки при коэффициентах основных эффектов во всех моделях. Это влияние подтверждается теплофизикой процесса шлифования: при увеличении подач время воздействия теплового источника в зоне контакта абразивный круг-деталь на поверхность уменьшается. Так как именно повышение микротвердости спо-

собствует улучшению абразивной обработки нитинола, то в первую очередь необходимо снизить подачи при шлифовании, а также использовать повышенную из сравнимых зернистость F46, о чем свидетельствует увеличение свободного коэффициента до 341,79 HV для круга $i = 3$.

Для анализа полученных математических закономерностей предсказаны поверхности откликов (рис. 5). Наличие информации о поверхностях откликов позволяет среди возможных комбинаций технологических параметров отыскать такие, которые соответствуют целевым показателям процесса шлифования. Как видно из них, наибольшее значение микротвердости отмечается при самом непроизводительном режиме шлифования: $A = B = -1,00$, при котором гарантируется фазовое превращение в поверхностном слое и переход мартенсита NiTi в аустенит. В то же время для повышения производительности процесса можно увеличить продольную подачу до $A = -0,5$, так как при этом отмечается небольшое снижение прогнозируемого показателя HV на 8 Н/мм² (рис. 5, б). Компенсировать такое снижение можно увеличением размеров зерен круга. Повышать S_n не рекомендуется, так как возможно большее снижение микротвердости. Наибольшие различия микротвердости прогнозируются для круга $i = 1$ при $A, B = [-1; 1]$, где снижение составляет 10–13%, а для круга $i = 3$ в точке $A = B = +1$ поверхностная микротвердость HV меньше на 20 Н/мм².

Таким образом определено возможное изменение фазы NiTi за счет теплоты резания при шлифовании.

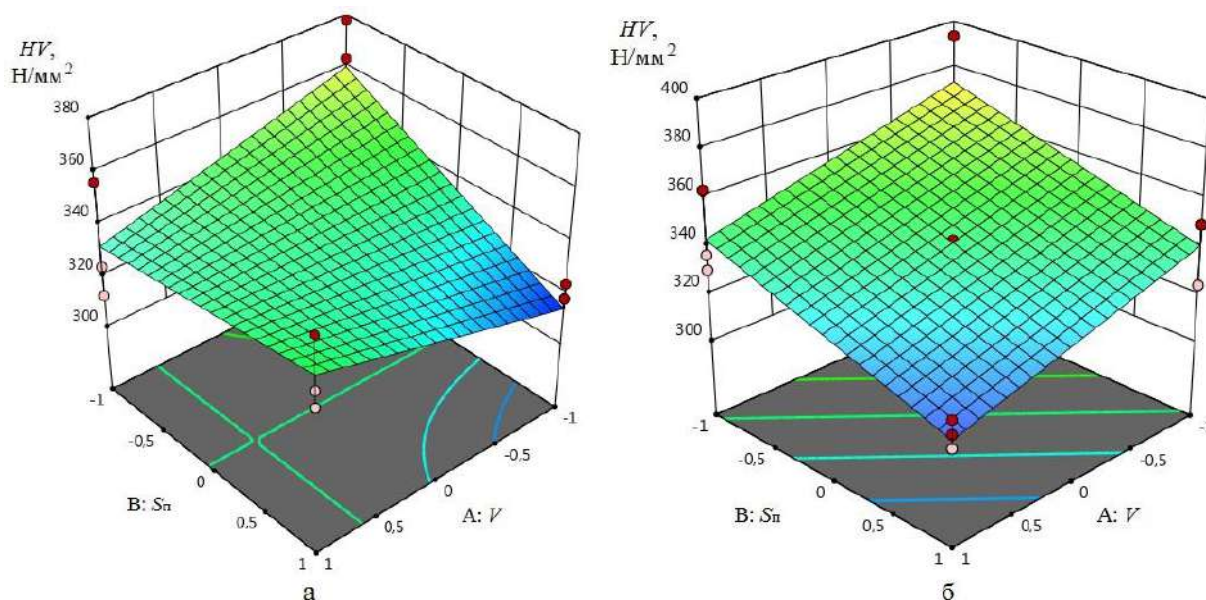


Рис. 5. Влияние продольной и поперечной подач на поверхностную микротвердость HV при шлифовании кругами материала ТН-1: а – 63CF60 K6V; б – 08C046 I12 V01P2

Fig. 5. The influence of longitudinal and cross feeds on the surface microhardness HV when grinding TN-1 material with wheels: а is 63CF60 K6V; б is 08C046 I12 V01P2

С целью проверки наличия благоприятного эффекта термического упрочнения на обрабатываемость никелида титана был проведен дополнительный эксперимент. Исследовалось влияние плазменного упрочнения и расстояния от сопла плазматрона до поверхности заготовки на качественные и количественные характеристики получаемой поверхности после шлифования. Обработку торца вели плазмой на установке *Herocut HC 3500AF* вручную со скоростью 8-10 мм/с по сетчатой траектории, размеченной с шагом 10 мм, по 3 хода в каждом ортогональном направлении (рис. 6). Время между ходами 5 с. Параметры работы плазменной установки: ток электродугового разряда – 10 А, диаметр сопла – 0,6 мм. Расстояние от сопла до детали l были 20, 16,5 и 13 мм и задавались насадками на плазматрон разной длины, будем характеризовать это длиной факела. Нагретые заготовки закаливали в воде при комнатной температуре путём погружения на 1 мин.



Рис. 6. Технологическое обеспечение обработки поверхности плазмой

Fig. 6. Technological support for plasma surface treatment

В ходе обработки отмечено, что с уменьшением расстояния от сопла до поверхности увеличиваются следы воздействия высоких температур. На поверхности, обработанной при $l = 13$ мм, заметны прижоги и следы побегов, которые соответствуют более сильному воздействию плазмы.

После закалки в воде образцы шлифовались кругом *Norton 37C46 I12 VP* высокой пористости на режиме: $S = 8$ м/мин, $S_n = 4$ мм/дв. ход, $t = 0,01$ мм, количество ходов – 10. Были определены отклонения от прямолинейности как разница между выявленной прилегающей прямой и отклонениями в пяти точках, в частности в центре 0 и по окружностям 1 и 2 (по $D/2$ и D соответственно), измеренными по 4-м сечениям, при этом $0-180^\circ$ соответствовало вектору S_n (рис. 7).

Дополнительно оценивалась плоскостность, величины отклонения которых указаны в табл. 6.

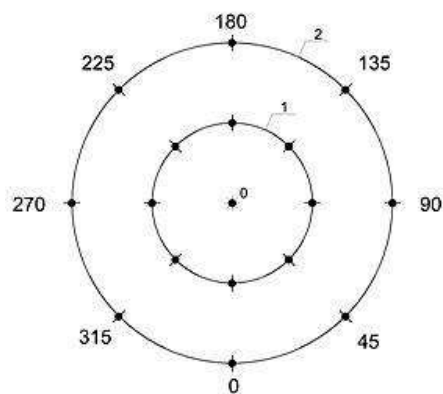


Рис. 7. Схема измерения погрешности формы на детали в полярной системе координат

Fig. 7. Scheme for measuring shape error on a part in a polar coordinate system

Таблица 6. Отклонения от прямолинейности и плоскостности образцов после шлифования поверхности никелида титана, термоупрочненного плазмой

Table 6. Deviations from straightness and flatness of samples after grinding the surface of titanium nickelide after heat-strengthened by plasma

Длина факела, мм	Отклонения формы: непрямолинейность и неплоскостность, мкм		
	Минимальное $\Delta_{min}^{пр}$	Максимальное $\Delta_{max}^{пр}$	Δ
13	6	12	11
16,5	7	14	7
20	9	22	16

Отклонения от прямолинейности изменяются от 6 до 22 мкм, причем меньшие значения характерны для поверхности, обработанной с меньшей длиной факела, и измеренные по вектору поперечной подачи S_n , а большие соответственно для максимальной длины факела по вектору продольной подачи S . Элементарные погрешности формы были как в виде выпуклости, так и вогнутости, но несравнимо меньшие по сравнению с нетермообработанными заготовками, что показано на фото образцов на рис. 8. При этом не обработанные плазмой поверхности никелида титана после шлифования имели четко выраженный псевдерегулярный макрорельеф по краям (желоб по ГОСТ Р ИСО 25178-2) от движения круга по вектору S (рис. 8, а). Доказано, что при уменьшении расстояния между шлифуемой поверхностью и соплом плазматрона увеличивается количество фазы аустенита и ее глубина после термической обработки плазмой, что повлияло на погрешность формы. Сказанное связано с возрастанием температуры плазмы, воздействующей на поверхность, глубины и температуры нагрева поверхности детали из интерметаллида ТН-1. При охлаждении в воде увод тепла в сердцевину образца затруднен из-за коэффициента теплопроводности, который у мартенсита в

два раза меньше, чем у аустенита, а следовательно, в основном только на поверхности, подвергаемой абразивной обработке, наблюдается фазовый переход мартенсит→аустенит. Но так как припуск шлифования одинаковый, а глубина поверхностного слоя с закаленной фазой разная, то это сказалось на результате шлифования. Это подтверждается различными видами элементарной погрешности плоскостей – выпуклости, характерной аустениту, и вогнутости, свойственной мартенситу [12]. При возросшей длине факела температура становится недостаточной для прогрева поверхностного слоя металла на глубине 0,1 мм выше критической точки, характерной для данного обрабатываемого состава ТН-1. В результате при закалке не удается получить устойчивой фазы аустенита в подповерхностном слое с залеганием по глубине, сопоставимой с припуском. Кроме того, выпуклость объясняется тем, что на краях детали по естественным причинам хуже отводится теплота резания, чем в сердцевине, а значит, и температурное расширение больше. Следовательно, на локальных краевых участках иная интенсивность срезания припуска. Косвенно

сказанное подтверждается различием микротвердости HV после шлифования термоупрочненных поверхностей ТН-1. Так, микротвердость в среднем составила $HV = 336 \text{ Н/мм}^2$ для поверхностей, обработанных плазмой с $l = 20 \text{ мм}$, что на 6% меньше для поверхностей, обработанных плазмой с $l = 13 \text{ мм}$ при средней величине $HV = 355 \text{ Н/мм}^2$.

Для проверки гипотезы о связи погрешности формы поверхности с величиной припуска под шлифование и фазовыми превращениями по глубине термоупрочненного слоя был выполнен эксперимент. Для этого с деталей сняли еще дополнительный припуск $z=0,1 \text{ мм}$, после чего повторно измерили погрешность формы и микротвердость. Отмечено, что при снятии дополнительного припуска микротвердость уменьшилась, что отражено в табл. 7, а значит, повышается количество мартенситной фазы в подповерхностном слое с ростом глубины. Для образца, обработанного с факелом $l = 20 \text{ мм}$, величина микротвердости снизилась до исходного значения в состоянии поставки, равной $HV 290 \text{ Н/мм}^2$.

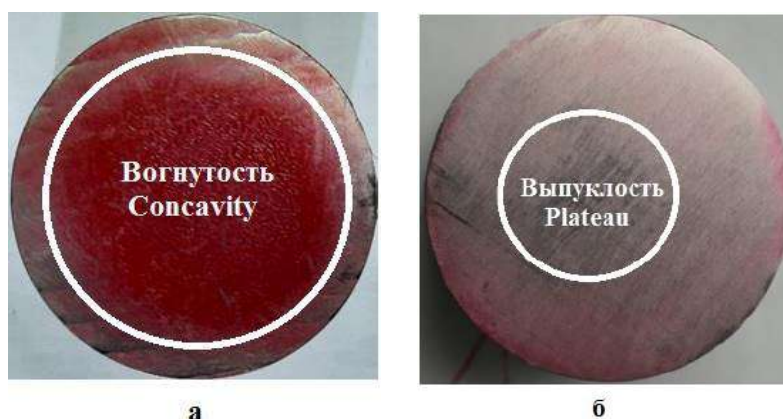


Рис. 8. Фото образцов после индикации отклонения от плоскостности методом «на краску», обработанных шлифованием: а – без плазменного упрочнения; б – с плазменным упрочнением при $l = 13 \text{ мм}$

Fig. 8. Photos of samples after indicating deviations from flatness using the surface imprint method, processed by grinding: а is without plasma hardening, б is with plasma hardening at $l=13 \text{ мм}$

Таблица 7. Результаты изменения характеристик микротвердости и точности поверхности ТН-1 при шлифовании с различными припусками

Table 7. Results of changes in the characteristics of microhardness and surface accuracy of TN-1 during grinding with different allowance

Длина факела l , мм	Точка	Основной припуск $z=0,1 \text{ мм}$		Дополнительный припуск $z=0,1 \text{ мм}$		
		HV, Н/мм ²	Средняя HV, Н/мм ²	HV, Н/мм ²	Средняя HV, Н/мм ²	Отклонение от плоскостности Δ , мкм
13	1	330	355	307	321	18
	2	386		349		
	3	349		307		
16,5	1	324	338	343	308	17
	2	363		285		
	3	328		296		
20	1	312	336	287	289	29
	2	318		276		
	3	378		306		

Сопоставляя полученные отклонения формы после шлифования (см. табл. 7), отметим, что при снятии дополнительного припуска количественные характеристики плоскостности и прямолинейности заметно ухудшаются, они возросли минимум в два раза. Так, значение погрешности $\Delta = 7$ мкм после снятого шлифованием дополнительного припуска возросло до 17 мкм, а при $\Delta = 16$ мкм – до 29 мкм. Также поменялись и отклонения от прямолинейности. На рис. 9 представлены профили прямолинейности образцов и прилегающая прямая по двум сечениям – 0–180° и 45–225°. Представленные погрешности соответствуют шлифованным поверхностям ТН-1 с предварительным упрочнением плазмой при длине факела $l = 13$ мм.

Такая же картина получена и для $l = 16,5$ мм и $l = 20$ мм в тех же сечениях, отражающих влияние поперечной подачи S_n на изменение физико-механических характеристик ТН-1 в процессе шлифования. Для других сечений картина выражена не явно. Сравнивая полученные фотографии и прямолинейность профиля после шлифования общего припуска $z = 0,2$ мм и $z = 0,1$ мм, отметим, что при снятии дополнительного припуска исходная погрешность типа выпуклость переходит в вогнутость. Это достаточно достоверно подтверждает изменение фаз по глубине никелида титана, термоупрочненного плазмой с аустенита до мартенсита. Шлифование таких поверхностей стабильно обеспечивает точность обрабатываемой поверхности.

Заключение

1. Шлифование никельтитановых сплавов в состоянии мартенсита сопряжено рядом трудностей, в частности при шлифовании достаточно сложно обеспечить точность формы и опорную способность поверхности благодаря особым свойствам металла с эффектом памяти формы. Наряду с этим данный сплав легко подвергается абразивной обработке без значительных макроотклонений в аустенитном состоянии. Поэтому предложено искусственно превращать поверхностный слой из фазы мартенсита в аустенит. При этом такого превращения решено добиваться во время его шлифования при особых условиях и режиме, а также путем предварительного плазменного упрочнения перед абразивной обработкой. Обнаружено, что обработка никелида титана обладает ранее неизвестным исключением. Так, умозаключение, что большой съем или объемная производительность резания связаны с хорошей обрабатываемостью, не свойственно этому металлу. Наоборот, для NiTi это показатель того, что он находится в состоянии плохо поддающейся абразивной обработки. Малый съем материала в единицу времени говорит о физико-механических характеристиках, благоприятных для шлифования, но не лезвийной обработке.

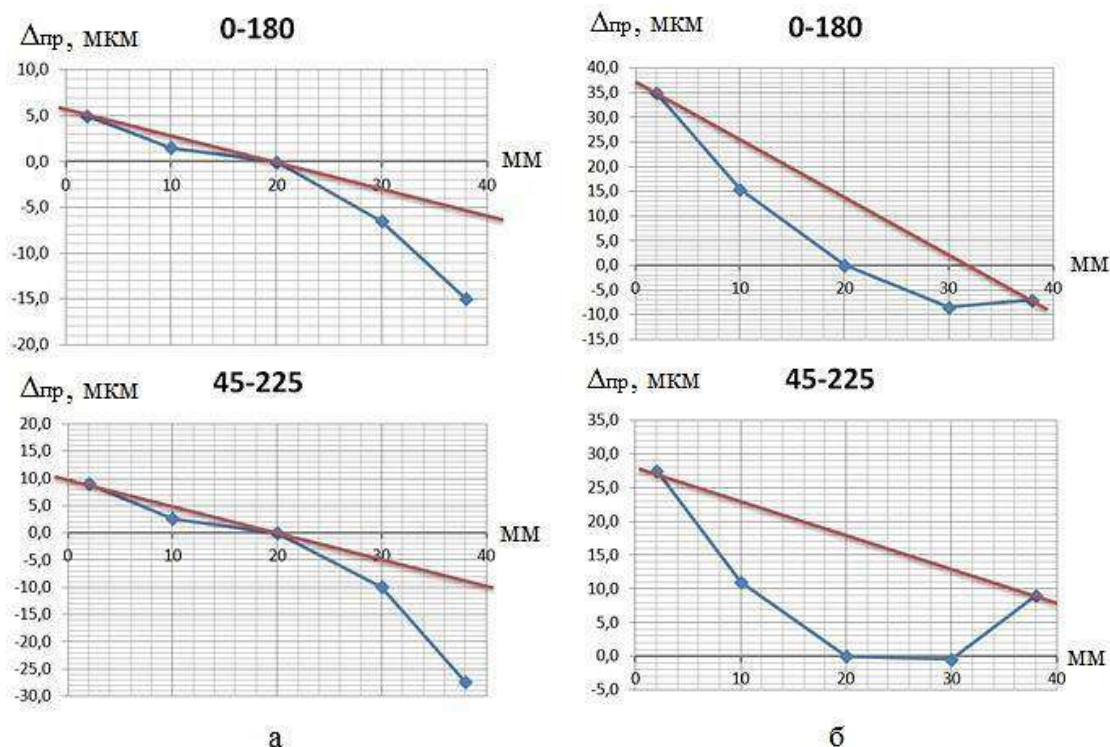


Рис. 9. Профили поверхности и отклонения от прямолинейности от прилегающей прямой для двух сечений после технологического маршрута «плазменное упрочнение – закалка – шлифование» при снятии припуска: а – $z = 0,1$ мм; б – $z = 0,2$ мм

Fig. 9. Surface profiles and deviations from straightness from the adjacent straight line for two sections after “plasma hardening - grinding” when removing the allowance: а is $z=0,1$ mm; б is $z=0,2$ mm

2. На основании выявленной связи микротвердости HV и особенностей шлифования фаз NiTi установлено, что вынужденного структурно-фазового превращения «мартенсит – аустенит» можно добиться только кругами, при обработке которыми возникают достаточные тепловыделения в зоне резания. В рамках данного исследования это продемонстрировали абразивные круги 63F60 K6 V, которые меньше других зависят от применяемых режимов шлифования. Для большего положительного эффекта рекомендовано выбирать абразивные круги из карбида кремния, по возможности большей зернистости при нормальной пористости. Кроме того, для стабилизации данных явлений в никелиде титана обработка должна вестись при обильной подаче СОЖ, что приводит к положительной вторичной закалке. Для этого необходимо выставлять достаточные для температурных превращений времена на перебеги и врезание. Стабильное фазовое превращение при шлифовании возможно только для продольной подачи S , не превышающей 5 м/мин. Поперечная подача должна принимать минимальные значения. Обусловлено это временем контакта «абразивный инструмент – деталь», возрастание которого способствует достижению определенной температуры резания и аккумуляции тепла в подповерхностном слое, необходимых для инициации фазового перехода. Применение шлифования с большими значениями ведет к нарушению этого явления из-за меньших температур резания и естественной теплоотдачи.

3. Корреляционный анализ показал зависимость между повышенной микротвердостью, свойственной фазам аустенита, со съемом припуска, обеспечивающим наивысшую точность процесса формирования плоскости. Впервые полученная трехкомпонентная диаграмма позволяет утверждать о положительном эффекте наклепа на обрабатываемость никелида титана в мартенситном состоянии. Так, наименьшая погрешность формы была получена при поверхностной микротвердости HV более 350 Н/мм² и составила в среднем 5 мкм, что в 6 раз меньше, чем при обработке при шлифовании поверхности с наклепом до HV = 340 Н/мм².

4. По результатам проведенного регрессионного анализа определено значимое влияние поперечной подачи S_{\perp} при шлифовании на поверхностную микротвердость. Уменьшение S_{\perp} способствует эффекту нагрева поверхности до накопления теплоты до фазового превращения за счет возрастающего количества проходов. Рекомендовано минимальное значение $S_{\perp} = 2$ мм/дв. ход, что, соответственно, ведет к потере производительности. В то же время для повышения производительности процесса можно увеличить продольную подачу S до 5 м/мин, так как она оказывает меньшее влияние на изученную характеристику поверхности. Полученные регрессионные модели проверены на адекватность.

5. Установлен благоприятный эффект термического упрочнения на обрабатываемость никелида титана путем реализации технологического маршрута «плазменное упрочнение – закалка в воде – шлифование поверхности». Косвенно она подтверждена наблюдениями за опорной площадью поверхности и видом погрешности формы. Обнаружено, что локальный плазменный нагрев приводит к мартенситно-аустенитному переходу, а быстрое охлаждение в воде останавливает его обратимость. Аустенитная фаза – незначительная по глубине поверхностного слоя и не превышает 0,2 мм. В зависимости от припуска шлифования и параметров предварительного термического упрочнения получены погрешности формы до 7 мкм. Это дает возможность достичь хороших показателей точности, свойственных аустениту при сохранении исходных свойств для детали, характерных мартенситу. Заметно повышается опорная способность поверхности после шлифования за счет формирования плато, переходящего в выпуклость.

6. Доказано, что при уменьшении расстояния между поверхностью и соплом плазматрона увеличивается количество фазы аустенита и ее глубина, подтверждаемые изменением микротвердости. Так, при длине факела 13 мм HV возросла на 20%. Глубина измененной микротвердости недостаточна при обработке плазмой с факелом более 20 мм.

7. В качестве рекомендаций для производства можно предложить следующие. Так как обработка плазмой – более универсальный метод по сравнению с многопроходным шлифованием, позволяющая обрабатывать большие площади поверхности разной кривизны, то подготавливать детали из никелида титана необходимо плазменным упрочнением, получая поверхностный слой из аустенита, а шлифование производить на производительных режимах, в том числе и чащеобразным кругом. Данный маршрут будет особенно востребован в серийном производстве. При этом процесс плазменной обработки еще и легко автоматизируется для многономенклатурного производства. Для единичного производства рекомендуется абразивная обработка шлифованием с подачей СОЖ и заданием режимов, способствующих устойчивому фазовому переходу на всех проходах по глубине шлифования, так как обладает меньшими себестоимостью и коротким маршрутом обработки.

Список источников

1. Влияние отжига на мартенситные превращения в биметаллическом композите «сталь – сплав TiNi», полученном сваркой взрывом / Беляев С.П., Рубаник В.В., Реснина Н.Н., Рубаник (мл.) В.В., Рубаник О.Е. // *Металловедение и термообработка металлов*. 2010. № 9. С. 30–34.
2. Сенкевич К.С. Перспективы получения и применения гибридных конструкций и композитов из титановых сплавов и нитинола: обзор // *Известия*

- вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2017. №4. С. 72-78.
3. Soler Y., Kazimirov D. A note on the change in the surface quality characteristics during flat grinding of titanium intermetallic with shape memory effect // Key Engineering Materials. 2022, vol. 910, pp. 9-16.
4. Superelastic and superplastic alloys – problem 2008 year. Open Course Ware. Available at: https://ocw.mit.edu/courses/3-22-mechanical-behavior-of-materials-spring-2008/pages/projects/superelastic_5 (Accessed January 15, 2024).
5. Surface integrity of NiTi shape memory alloy in milling with cryogenic heat treated cutting tools under different cutting conditions / Emre Altas, Meltem Altin Karatas, Hasan Gokkaya and Yuksel Akinay // Journal of Materials Engineering and Performance. 2021, vol. 30, pp. 9426-9439.
6. Zainal A. Zailani, Paul T. Mativenga. Effects of chilled air on machinability of NiTi shape memory alloy // Procedia CIRP. 2016, vol. 45 (Supplement C), pp. 207-210.
7. Yi Yi Tao, Jiu Hua Xu, Wen Feng Ding. A study on grinding performance of porous NiTi shape memory alloy. Key Engineering Materials. 2008, vols. 359-360.
8. Grinding the sharp tip in thin NiTi and stainless steel wires / Yancheng Wang, Bruce L. Tai, Mackenzie Van Loon, Albert J. Shih // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012, vol. 62, pp. 53-60.
9. Grinding of Ti2AlNb intermetallics using silicon carbide and alumina abrasive wheels / Xin Xi, Tianyu Yu, Wenfeng Ding, Jiu Hua Xu // Precision Engineering. 2018, vol. 53.
10. Characterization of mechanical properties of an alloy with shape memory – nitinol / Oliveira T. S., Procópio L. S., Martins P. H. A., de Castro U. D., et al. // COBEM. 23rd ABCM Int. Congr. of Mechanical Engineering Rio de Janeiro. 2015.
11. Soler Y. I. and Kazimirov D. Yu. Influence of abrasive wheels characteristics on phases change of nitinol in different structural conditions // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol. 15, no. 11, pp. 1218-1233.
12. Kaya E. and Kaya I. A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019, vol. 100, pp. 2045-2087.
13. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Метляев И.А. Повышение эффективности шлифования деталей из материалов с эффектом памяти формы // Вестник современных технологий. 2019. №1(13). С.12-18.
14. Гуляев А.П. Материаловедение: учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986.
15. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю. Моделирование теплотехники плоского шлифования деталей летательных аппаратов в MSC. Marc/Mentat // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. №5. С. 56-62.
16. Characterisation of microstructure and mechanical properties of linear friction welded $\alpha+\beta$ titanium alloy to nitinol / Ateekh U. Rehman, Nagumothu K. Babu, Mahesh K. Talari, Yusuf Usmani and Hisham Alkhalefah // Applied Sciences. 2021, vol. 11, 10680.
17. Temperature and strain rate dependent stress-strain behaviour of nitinol / Mahesh K. Gupta, Akash Shankhdhar, Abhinav Kumar, Anant Vermon, et al. // Materials Today Proceedings. 2021, vol. 43, pp. 395-398.
18. Adebayo A. Adeleke, Yansun Yao. High-temperature shape memory loss in nitinol: a first principles study // Physical Chemistry Chemical Physics. 2019, vol. 21(14), pp. 7508-7517.

References

1. Belyaev S.P., Rubanik V.V., Resnina N.N., Rubanik (ml.) V.V., Rubanik O.E. Effect of annealing on martensitic transformations in a bimetallic composite “steel - TiNi alloy” obtained by explosion welding. *Metallovedenie i termoo obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals], 2010;(9):30-34. (In Russ.)
2. Senkevich K.S. Prospects for the production and application of hybrid structures and composites from titanium alloys and nitinol: review. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* [News from universities. Powder metallurgy and functional coatings], 2017;(4):72-78. (In Russ.)
3. Soler Y., Kazimirov D. A note on the change in the surface quality characteristics during flat grinding of titanium intermetallic with shape memory effect. Key Engineering Materials. 2022;910:9-16.
4. Superelastic and superplastic alloys - problem 2008 year. Open Course Ware. Available at: https://ocw.mit.edu/courses/3-22-mechanical-behavior-of-materials-spring-2008/pages/projects/superelastic_5 (Accessed January 15, 2024).
5. Emre Altas, Meltem Altin Karatas, Hasan Gokkaya and Yuksel Akinay. Surface integrity of NiTi shape memory alloy in milling with cryogenic heat treated cutting tools under different cutting conditions. Journal of Materials Engineering and Performance. 2021;30:9426-9439.
6. Zainal A. Zailani, Paul T. Mativenga. Effects of chilled air on machinability of NiTi shape memory alloy. Procedia CIRP. 2016;45(C):207-210.
7. Yi Yi Tao, Jiu Hua Xu, Wen Feng Ding. A study on grinding performance of porous NiTi shape memory alloy. Key Engineering Materials. 2008;359-360.
8. Yancheng Wang, Bruce L. Tai, Mackenzie Van Loon, Albert J. Shih. Grinding the sharp tip in thin NiTi and stainless steel wires. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012;62:53-60.
9. Xin Xi, Tianyu Yu, Wenfeng Ding, Jiu Hua Xu. Grinding of Ti2AlNb intermetallics using silicon carbide

- and alumina abrasive wheels. Precision Engineering. 2018;53.
10. Oliveira T. S., Procópio L. S., Martins P. H. A., de Castro U. D., et al. Characterization of mechanical properties of an alloy with shape memory - nitinol. COBEM. 23rd ABCM Int. Congr. of Mechanical Engineering Rio de Janeiro (2015).
 11. Soler Y. I. and Kazimirov D. Yu. Influence of abrasive wheels characteristics on phases change of nitinol in different structural conditions. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020;15(11):1218-1233.
 12. Kaya E. and Kaya I. A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;100:2045-2087.
 13. Soler Ya. I., Kazimirov D. Yu., Metlyaev I. A. Increasing the efficiency of grinding parts made of shape memory materials. *Vestnik sovremennyh tekhnologij* [Bulletin of modern technologies], 2019;1(13):12-18. (In Russ.)
 14. Gulyaev A.P. *Materialovedenie: ucheb. dlya vuzov. 6-e izd. pererab. i dop.* [Materials Science: 6th edition, reprinted and added]. Moscow: Metallurgiya, 1986. (In Russ.)
 15. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu. Modeling the thermal physics of surface grinding of aircraft parts in MSC. Marc/Mentat. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability], 2005;(5):56-62. (In Russ.)
 16. Ateekh U. Rehman, Nagumothu K. Babu, Mahesh K. Talari, Yusuf Usmani and Hisham Alkhalefah. Characterisation of microstructure and mechanical properties of linear friction welded $\alpha+\beta$ titanium alloy to nitinol. Applied Sciences. 2021;11:10680.
 17. Mahesh K. Gupta, Akash Shankhdhar, Abhinav Kumar, Anant Vermon, et al. Temperature and strain rate dependent stress-strain behaviour of nitinol. Materials Today Proceedings. 2021;43:395-398.
 18. Adebayo A. Adeleke, Yansun Yao. High-temperature shape memory loss in nitinol: a first principles study. Physical Chemistry Chemical Physics. 2019;21(14):7508-7517.

Поступила 29.05.2024; принята к публикации 29.10.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 29/05/2024; revised 29/10/2024; published 24/12/2024

Казимиров Денис Юрьевич – кандидат технических наук, доцент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: kazimirdenn@gmail.com. ORCID 0000-0001-6438-1525

Солер Яков Иосифович – кандидат технических наук, профессор,
Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: solera@istu.irk.ru. ORCID 0000-0001-5109-3268

Denis Yu. Kazimirov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: kazimirdenn@gmail.com. ORCID 0000-0001-6438-1525

Yakov I. Soler – PhD (Eng.), Professor,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: solera@istu.irk.ru. ORCID 0000-0001-5109-3268

НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 549:54.055
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-134-143



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ЭЛАСТОМЕРОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МНОГОСЛОЙНЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ ПО СВЧ- И CVD-ТЕХНОЛОГИИ

Щегольков А.В.¹, Щегольков А.В.², Земцова Н.В.¹, Никулин П.Н.¹

¹ Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

² Московский политехнический университет, Москва, Россия

Аннотация. В статье представлен анализ кремнийорганических эластомеров, модифицированных многослойными углеродными нанотрубками (МУНТ) с металлизированной поверхностью, которые были синтезированы СВЧ-методом, и МУНТ, полученными по CVD-технологии. Анализировалось влияние металлизации поверхности МУНТ на электро- и теплофизические параметры. Полученные данные показали термостабильность исследуемых образцов при воздействии переменного электрического напряжения, обусловленную устойчивостью образованной структуры к электрическому току. Следует отметить, что для всех образцов характерно наличие эффекта саморегуляции температуры, выраженной в снижении мощности тепловыделения при повышении температуры до 40°C. Установлено улучшение распределения температурного поля для нагревательного элемента на основе кремнийорганического эластомера, содержащего МУНТ с модификацией поверхности. Для МУНТ без модификации поверхности при температуре окружающей среды –40°C на 50-м цикле нагревательный элемент работал на удельной электрической мощности, равной 1,1 кВт/м², а на 100-м цикле происходило ухудшение структурных свойств проводящего наполнителя и, как следствие, снижение удельной мощности до 0,3 кВт/м². В то же время металлизация МУНТ позволила повысить мощность нагревательного элемента на 27%, обусловленное увеличением электропроводности вследствие большей площади металлического контакта между отдельными МУНТ, и при этом снизить интенсивность деградации токопроводящих структур после 100-го цикла и выше. Тем самым повысив термостабильность полимерного композита, работающего на переменном электрическом напряжении. При равной концентрации МУНТ в эластомерах, для металлизированных МУНТ наблюдаются значительно лучшие электро- и теплофизические характеристики, что связано с улучшением процессов теплопереноса при одновременном улучшении электропроводности.

Ключевые слова: катализатор, многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), кремнийорганический эластомер, металлизация поверхности, температурное поле, СВЧ-синтез, CVD-метод

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00855, <https://rscf.ru/project/24-29-00855/>.

© Щегольков А.В., Щегольков А.В., Земцова Н.В., Никулин П.Н., 2024

Для цитирования

Сравнительный анализ кремнийорганических эластомеров, модифицированных многослойными углеродными нанотрубками, полученными по СВЧ- и CVD-технологии / Щегольков А.В., Щегольков А.В., Земцова Н.В., Никулин П.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 134-143. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-134-143>



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

COMPARATIVE ANALYSIS OF ORGANOSILICON ELASTOMERS MODIFIED WITH MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES PRODUCED BY MICROWAVE AND CVD-TECHNOLOGY

Shchegolkov A.V.¹, Shchegolkov A.V.², Zemtsova N.V.¹, Nikulin P.N.¹

¹ Tambov State Technical University, Tambov, Russia

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents an analysis of organosilicon elastomers modified by multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) with metallised surface, which were synthesised by microwave, and MWCNTs obtained by CVD-technology. The effect of the metallisation of the MWCNT surface on the electrical and thermophysical parameters was analysed. The obtained data showed the thermal stability of the studied samples under the influence of alternating electric voltage due to the stability of the formed structure to electric current. It should be noted that all samples are characterised by the presence of the effect of temperature self-regulation, expressed in a decrease in the power of heat release when the temperature rises to 40°C. Improvement of temperature field distribution for heating element on the basis of organosilicon elastomer containing MWCNTs with surface modification has been established. For MWCNTs without surface modification at ambient temperature -40°C at the 50th cycle the heating element worked at specific electric power equal to 1.1 kW/m², and at the 100th cycle there was deterioration of structural properties of conductive filler and, as a consequence, decrease of specific power to 0.3 kW/m². At the same time, the metallisation of MWCNTs allowed to increase the power of the heating element by 27%, caused by the increase of electrical conductivity, due to the larger area of metallic contact between separate MWCNTs, and at the same time to reduce the intensity of degradation of conductive structures after the 100th cycle and more, and thus, to increase the thermal stability of the polymer composite operating at alternating electric voltage. At equal concentration of MWCNTs in elastomers, for metallised MWCNTs much better electrical and thermophysical characteristics are observed, which is connected with improvement of heat transfer processes with simultaneous improvement of electrical conductivity.

Keywords: catalyst, multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs), organosilicon elastomer, surface metallization, temperature field, microwave synthesis, CVD method

The research was carried out with the support of RSF (No. 24-29-00855). Available at: <https://rscf.ru/project/24-29-00855/>.

For citation

Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Zemtsova N.V., Nikulin P.N. Comparative Analysis Of Organosilicon Elastomers Modified With Multi-Walled Carbon Nanotubes Produced By Microwave And Cvd-Technology. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 134-143. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-134-143>

Введение

Развитие полимерных технологий в различных сферах жизнедеятельности человека определяет спрос на функциональные, умные, гибкие, лёгкие и доступные материалы [1]. К таким материалам относят органические – полимеры, которые имеют существенные преимущества по сравнению с неорганическими (традиционными) материалами, к которым относятся металлы, керамику и их производные. Среди полимеров выделяют композиты или полимеры, полученные путем наполнения полимерной матрицы модифицирующей добавкой, которая обладает особыми физическими (механические, электрические и тепловые) свойствами, придавая тем самым полимеру новые функциональные свойства. Такие материалы имеют широкий спектр применения [1]. Полимеры обладают такими функциональными и эксплуатационными свойствами, как гибкость, низкая плотность,

высокая износостойкость, простота обработки, гидрофобность, некоторые из них огнестойкие и ударопрочные, что позволяет использовать их в машиностроении и других отраслях промышленности [2-5].

Синтез различных полимеров получил широкое распространение, а в некоторых случаях синтетические материалы способны заменить традиционные. Однако всё ещё существуют проблемы, связанные с эксплуатацией полимеров, которые обусловлены их структурными особенностями, ограничивающими их применение. Невысокие механические, термические и электрические свойства в значительной мере уменьшают их применение в различных технологических приложениях. В то же время полимерные композиты обладают улучшенными свойствами по сравнению с обычными полимерами. Наиболее востребованы электропроводящие полимерные композиты с дисперсными токопроводящими наполнителями [6]. Так называемые электропроводящие композиты имеют

большой потенциал применения [7, 8], в частности в области электронагрева с применением электроматериалов с низкими коррозионными и антистатическими свойствами [9].

Смарт-полимеры – это материалы, которые имеют одно или несколько функциональных свойств, способных изменять своё собственное состояние в результате изменения окружающих условий или режимов эксплуатации материала. Эти материалы представляют собой полимерные композиты, полученные в результате структурной модификации с помощью дисперсных наполнителей [10]. Смарт-полимеры могут содержать различные наполнители, например оптическое волокно, которое позволяет контролировать изменение структурных свойств в процессе механического воздействия [11]. В качестве проводящих наполнителей используются углеродные нанотрубки (УНТ) [12, 13]. Полимерные композиты, которые содержат комбинированные или гибридные токопроводящие наполнители имеют практическое значение, и технологии их применения открывают новые направления в развитии «умных» материалов [14].

Включение наночастиц (НЧ) железа (Fe) в структуру УНТ, используемых в качестве гибридного наполнителя CNT@Fe-C, позволяет значительно улучшить электро- и теплофизические свойства многих полимеров [15]. В [16] представлен метод конденсации инертного газа (IGC), используемый для получения магнитных нанокластеров Fe на МУНТ в качестве подложки. Для сравнения такие же кластеры были нанесены на кремниевые подложки. В работе для осаждения частиц Fe на подложки, выращенных методом IGC, была использована простая техника испарения. При этом авторами было установлено взаимодействие между нанокластерами Fe и МУНТ с кремниевыми подложками и связанные с ним изменения химического, электронного и магнитного состояний, вызванных данными нанокластерами.

Наночастицы оксида железа (Fe_3O_4) со средними размерами 6 и 10 нм были синтезированы методом химического соосаждения из растворов $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. После чего их обрабатывали ультразвуком в HNO_3 . Затем окисленные МУНТ обрабатывались в растворе (вода/этанол=1:1 по объему) для декорирования. Массовое содержание Fe_3O_4 в композитах составило 26,6 и 29,3% для частиц размером 6 и 10 нм соответственно [17]. В качестве наполнителя могут быть использованы более сложные материалы, состоящие из наночастиц оксида железа и серебра, декорированные аминомодифицированными многостенными углеродными нанотрубками (МУНТ- $\text{NH}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{AgNP}$) [18].

В [19] разработали простой, универсальный и эффективный метод функционализации УНТ другими наночастицами (полупроводниковыми, электрическими, бионаночастицами и т.д.) путем ковалентного взаимодействия. В работе была продемонстрирована общая методология ковалентного прикрепления на-

ночастиц магнетита к углеродным нанотрубкам. В [20] УНТ с инкапсулированными частицами железа (Pod-Fe) использовались в качестве четкоопределенной модели для изучения электронного взаимодействия между углеродными оболочками и частицами железа с помощью сканирующей трансмиссионной рентгеновской микроскопии (STXM).

В [21] УНТ синтезировали в один этап с использованием модифицированного метода химического осаждения из паровой фазы (CVD). Полученные углеродные нанотрубки имеют многостенную структуру, напоминающую бамбук. Они имеют средний диаметр 40 нм и внутренние полости диаметром 20 нм. Магнитные наночастицы прочно прикреплены к нанотрубкам и имеют средний диаметр 15 нм с закругленными краями. Существует также метод получения УНТ, декорированных частицами железа с помощью СВЧ-синтеза [22].

Следует отметить, что физико-химические свойства металл/углеродных нанокомпозитов отличаются от металлических НЧ и углеродных наноматериалов. В работах [23, 24] отмечена физико-химическая активность металл/углеродных нанокомпозитов для модификации материалов, что может быть связано с явлениями в надмолекулярной структуре полимеров.

Наибольшее распространение получили технологии синтеза металл/углеродных наноструктур, при которых металл располагается во внутренней полости МУНТ, что снижает эффективность таких материалов, так как не задействуются функциональные возможности НЧ металла [25, 26]. Оптимальным вариантом является использование таких технологических приемов синтеза, которые откроют возможность расположения НЧ металла на поверхности МУНТ, что позволит улучшить эффективность теплоотвода в режимах интенсивных токовых нагрузок (при более высоком электрическом напряжении) и повысить механическую прочность МУНТ, а также сформирует возможность управления распределения магнитным полем в массе композитного полимера (до полимеризации).

При этом Fe и ряд его оксидных форм обладают принципиальными преимуществами (физико-химическими характеристиками) по сравнению с другими металлами, связанными с термической устойчивостью [27] и механической прочностью. В случае использования электронагревателей на основе МУНТ ключевое значение приобретает термическая устойчивость, так как на наноуровне наблюдается существенное повышение температур, связанное с джоулевыми тепловыделениями, а также активным туннелированием электронов.

Исследования металл/углеродных и в частности железо/углеродных нанокомпозитов позволит сформировать основы для разработки интеллектуальных материалов нового поколения, что существенно повысит эффективность применяемых функциональных полимерных композитов в сфере электронагрева.

Цель работы: исследовать электрофизические свойства кремнийорганического эластомера, модифицированного углеродными нанотрубками с металлизированной и неметаллизированной поверхностью.

Задачи:

1. Получение композитов на основе кремнийорганических эластомеров, содержащих металлизированные и неметаллизированные МУНТ.
2. Исследование электротепловых зависимостей от содержания МУНТ в процессе электронагрева.
3. Исследование температурного поля полимерных композитов, модифицированных МУНТ, а также металлизированных МУНТ.
4. Проведение сравнительного анализа МУНТ с металлизированной и неметаллизированной поверхностью, используемых в качестве наполнителей для кремнийорганических эластомеров.

Материалы и методы исследования

Синтез МУНТ СВЧ-методом. СВЧ-синтез МУНТ с использованием ферроцена ($C_{10}H_{10}Fe$) и графита осуществлялся в микроволновой печи Galanz MOS-2009MW (700 Вт, Китай). Предварительно ферроцен и графит в соотношении 5:1 подвергался механической активации в аппарате вихревого слоя (АВС) в течение 20 с для получения развитой поверхности и лучшего контакта смеси. Другим видом МУНТ были синтезированные на катализаторах $Co-Mo/Al_2O_3-MgO$ по CVD-технологии [28].

Синтез МУНТ CVD-методом. Для синтеза МУНТ был использован CVD-метод (Chemical vapor deposition (химическое осаждение из газовой фазы)) [29]. Процесс синтеза МУНТ производился в реакторе периодического действия в течение 40 мин при температуре $650^\circ C$ с помощью трех разных каталитических систем: $Co-Mo/Al_2O_3-MgO$ (УНТ 4); $Fe-Co/2,1Al_2O_3$ и $Fe-0,7Co/2,1Al_2O_3$. В качестве углеродсодержащего сырья использовали пропан-бутановую смесь.

Методы исследования структуры и морфологии. Морфологию поверхности МУНТ исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) «TESCAN LYRA 3» (TESCAN, Чехия) при 5 кВ. Для измерения спектров комбинационного рассеяния света использовали спектрометр на базе конфокального микроскопа («Spectra», NT-MDT SI). Объектив $100\times$ с $NA = 0,7$, полупроводниковый лазер ($\lambda = 532$ нм, мощность возбуждения около 50 мВт).

Методика получения образца кремнийорганического эластомера с МУНТ. В качестве полимерной матрицы был использован эластомер – кремнийорганический компаунд (силикон) Silagerm 8030 (двухкомпонентный с фазой А и В, ООО «ЭЛЕМЕНТ 14», Москва, Россия). Компонент А и МУНТ перемешивали с помощью механической мешалки WiseStir HT 120DX (Корея) на скорости 300 об/мин в течение 5 мин. В получен-

ную смесь добавляли второй компонент В, инициирующий полимеризацию, с последующим перемешиванием в течение 2 мин при комнатной температуре. Затем образцы помещали в вакуумный шкаф с целью формирования нагревательного элемента в виде плоских пластин с верхним и нижним электродом из алюминиевой фольги (0,01 АД1 ГОСТ 745-79).

Ультразвуковой диспергатор UP400 St (Hielscher Ultrasonics GmbH, Берлин, Германия) был использован для распределения МУНТ в кремнийорганическом компаунде Silagerm 8030 в жидком состоянии с целью уменьшения количества агломератов и агрегатов отдельных МУНТ.

Основные этапы изготовления полимерного композита:

- перемешивание компонентов кремнийорганического компаунда А и В в соотношении $A/B=1/1$;
- массовая концентрация рассчитывалась по отношению к массе кремнийорганического компаунда (А+В);
- полимеризация кремнийорганического компаунда с МУНТ производилась при температуре $85 \pm 5^\circ C$ в вакуумной сушильной установке в течение 5 ч.

В этом случае рабочий прототип нагревательного элемента был изготовлен путем механического нанесения полимерной матрицы на поверхность фольгированного электрода. Для контроля толщины активного слоя использовались металлические ограничители. Полученный электронагревательный элемент покрывали стеклом для равномерного распределения полимерной матрицы и для лучшего контакта между фольгированными электродами. Затем к фольгированным электродам присоединяли провода (при помощи специальной пайки), а открытую поверхность алюминиевого электрода изолировали. Питание и регулирование мощности осуществлялось с помощью программируемого БП АТН 1351 (ООО «Эликс», г. Москва, Россия) с диапазоном регулирования от 0 до 300 В в режиме пульсирующего потенциала.

Бесконтактный метод измерения температуры полимерных композитов. Бесконтактный метод измерения температуры полимерных композитов осуществлялся с использованием тепловизора «Тесто-875-1» и оптической линзы $32\times 23^\circ$ (SE & Co. KGaA, Testo, Ленцкирх, Германия). Температуру полимерных композитов измеряли двухканальным термометром «Тесто 992» (SE & Co. KGaA, Testo, Lenzkirch, Германия), при этом определяли температуру поверхности, и на основании полученных данных производили сравнение с температурой, полученной тепловизором. После чего подбирали коэффициент излучения поверхности, используемый для дальнейших измерений. Для анализа и обработки тепловизионных снимков была использована программа IRSoft v 5.0 SP1 (SE & Co. KGaA, Testo, Ленцкирх, Германия).

Методика исследования электропроводности. Электрическое сопротивление композитов определялось тераомметром Е6-13А (Эстония) и мультимет-

ром UNI-T UT71E (Китай). Измеренные значения сопротивления R пересчитывали по известной зависимости электропроводности σ от геометрических размеров композита:

$$\sigma = \frac{h}{S \cdot R},$$

где h – толщина композита, м; S – площадь композита, м²; R – электрическое сопротивление, Ом.

Измерения зависимости теплопроводности эластомеров с МУНТ производились с помощью прибора ИИС НК ТФСМ (Россия, Тамбов).

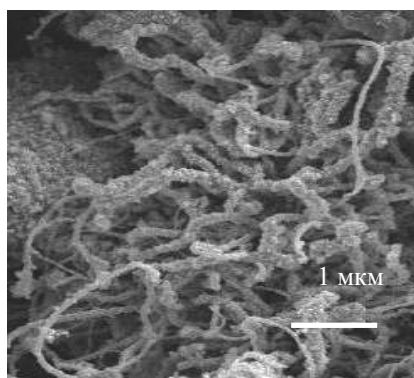
Полученные результаты и их обсуждение

Структура МУНТ и электротехнические параметры эластомеров. СЭМ-изображения синтезированных МУНТ по СВЧ- и CVD-технологии приведены на рис. 1. На рис. 1, б представлена морфология МУНТ, синтезированных на катализаторах Co-Mo/Al₂O₃-MgO. Анализ морфологии полученных МУНТ (рис. 1, а) показывает, что эти нанотрубки имеют диаметр ~ 40-60 нм и покрыты Fe. На рис. 1, б показаны МУНТ с удлинённым нитевидным образо-

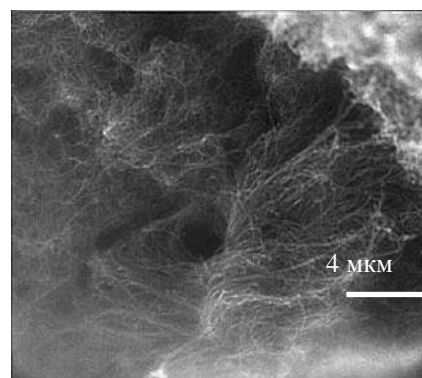
ванием диаметром 15-20 нм, длиной более 2 мкм и самопредставленной морфологией.

На рис. 2 показано распределение МУНТ по размерам без металлизации и с металлизацией. Согласно анализу данных (рис. 2, а), полученных по методу динамического рассеяния света, МУНТ в диапазоне до 22 мкм занимают частицы размером 6,2 мкм, причем наибольшую интенсивность дают частицы размером 2,5 мкм. При этом 99% интенсивности рассеянного излучения регистрируется частицами размером до 16 мкм, а 90% общей детектируемой интенсивности приходится на частицы размером до 5,7 мкм. Для металлизированных МУНТ имеет место увеличенная агломерация (см. рис. 2, а), при которой наибольшую интенсивность 99% дают частицы размером < 6964,4 нм, а частицы размером < 3815,6 нм – 25%.

Электро- и теплофизические исследования эластомеров с МУНТ. Испытание электротепловой стойкости наполнителя к электрическому напряжению 220 В проводилось в сравнении с полимерными композитами, наполненными МУНТ и МУНТ с металлизацией. На рис. 3 показана температурная зависимость мощности в диапазоне от -40 до 40°C с повторением циклов включения/выключения, равным 50 и 100 циклов соответственно.



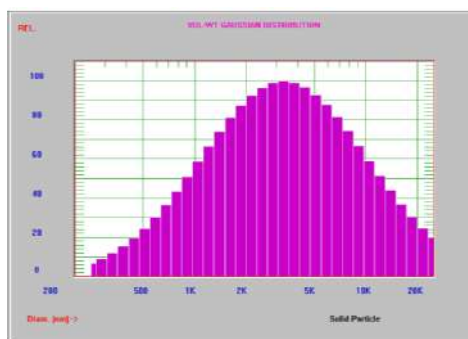
а



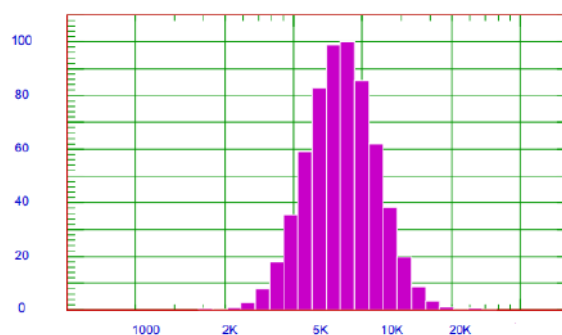
б

Рис. 1. Морфология МУНТ: а – синтезированные по СВЧ-технологии; б – синтезированные CVD-методом на катализаторах Co-Mo/Al₂O₃-MgO

Fig. 1. Morphology of MWCNTs: а is synthesised by microwave technology; б is synthesised by CVD method on Co-Mo/Al₂O₃-MgO catalysts



а



б

Рис. 2. Распределение МУНТ по размерам: а – без металлизации; б – с металлизацией

Fig. 2. Distribution of MWCNTs by size: а is MWCNTs without metallization; б is MWCNTs with metallisation

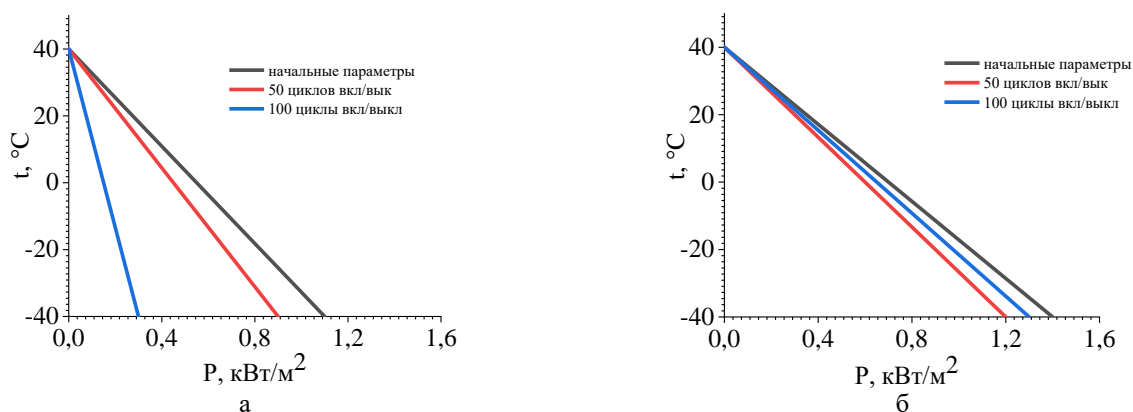


Рис. 3. Удельная тепловая мощность: а – полимерный композит с МУНТ; б – полимерный композит с металлизированными МУНТ

Fig. 3. Specific heat capacity: а is polymer composite with MWCNTs; б is polymer composite with metallised MWCNTs

Согласно **рис. 3, а**, повторное включение/выключение в течение 50 и 100 циклов приводит к ухудшению свойств полимерного композита с $1,1 \text{ кВт/м}^2$ (при -40°C) и, как следствие, снижению мощности до $0,3 \text{ кВт/м}^2$ (при -40°C) после 100 циклов включения/выключения. В то же время добавление МУНТ (**рис. 3, б**) позволяет увеличить мощность на $1,4 \text{ кВт/м}^2$ (при -40°C) и снизить интенсивность деградации токопроводящих структур после 100 циклов включения/выключения до $1,2 \text{ кВт/м}^2$. Следует отметить, что для всех образцов характерно наличие эффекта саморегуляции температуры, выраженной в снижении мощно-

сти тепловыделения при повышении температуры до $+40^\circ\text{C}$, при которой нагреватель на основе эластомера полностью отключается, что проявляется в снижении потребления электрической энергии. Исследование температурного поля полимерных композитов при напряжении 220 В представлено на **рис. 4**. При этом следует отметить, что динамика изменения температурного поля для различных интервалов времени, при которых происходило тепловыделение, соответствовала 40, 60 и 80 с для композитов с МУНТ без металлизации (**рис. 4, а-в**) и с металлизацией поверхности МУНТ (**рис. 4, г-е**).

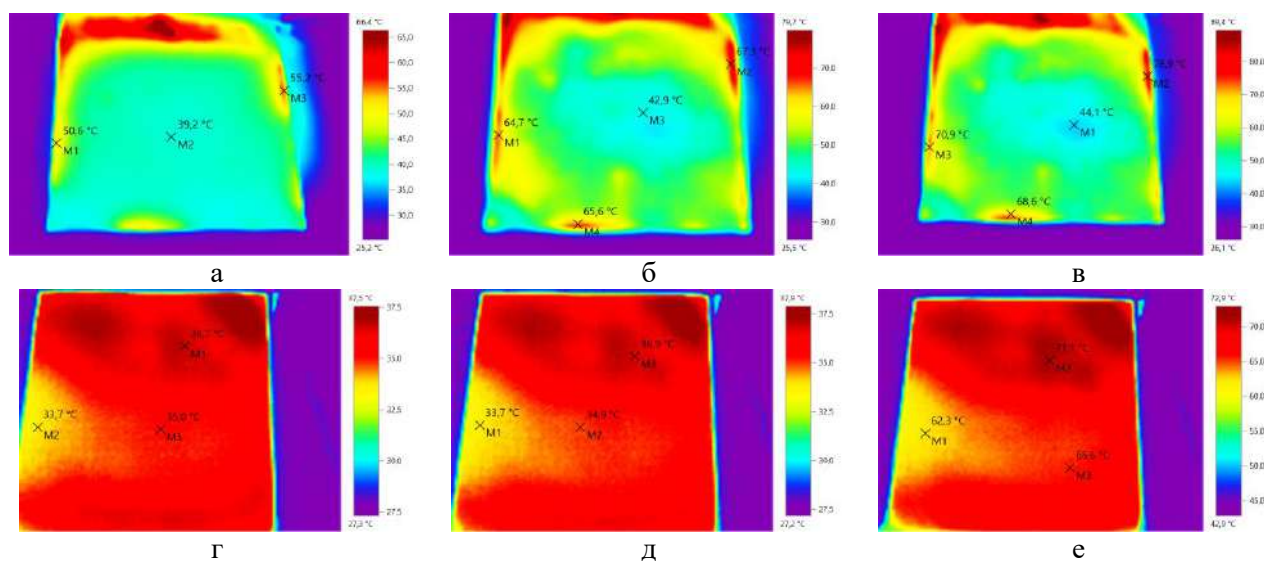


Рис. 4. Термограммы образцов: а – эластомеры с МУНТ (40 с); б – эластомер с МУНТ (60 с); в – эластомер с МУНТ (80 с); г – эластомеры с МУНТ (СВЧ) (40 с); д – эластомер с МУНТ (СВЧ) (60 с); е – эластомер с МУНТ (СВЧ) (80 с)

Fig. 4. Thermograms of samples: а is elastomers with MWCNTs (40 s); б is elastomer with MWCNTs (60 s); в is elastomer with MWCNTs (80 s); г is elastomers with MWCNTs (Microwave) (40 s); д is elastomer with MWCNTs (Microwave) (60 s); е is elastomer with MWCNTs (Microwave) (80 s)

Согласно **рис. 4, а-в**, для композита с МУНТ характерна локальная неравномерность распределения значений температурного поля, которая сопровождается изменением градиента температур по всему объёму и, соответственно, деградацией токопроводящих структур на основе МУНТ. Максимальная температура в этом случае достигала значения 89,2°C, а минимальная 44,1°C. Для композита с МУНТ на **рис. 4, г-е** представлено температурное поле с меньшим отклонением на поверхности. Эти нагревательные элементы имели максимальную температуру 72,9°C (минимальную 62,3°C). Таким образом, исходя из полученной термограммы (см. **рис. 4**), следует, что осуществление улучшенного теплоотвода в структуре кремнийорганического эластомера, заполненного МУНТ с металлизированной поверхностью, возникает из стабилизации температурного режима и, соответственно, улучшения теплового потока. В **таблице** представлены данные сравнения электро- и теплофизических свойств композитов, содержащих МУНТ, которые были синтезированы по CVD- и СВЧ-технологии.

Таблица. Электро- и теплофизические свойства композитов
Table. Electrical and thermophysical properties of composites

Тип МУНТ	CVD	СВЧ
Массовая концентрация МУНТ в эластомере, %	5	5
Теплопроводность λ , Вт/(м·°C)	0,19	0,34
Температуропроводность a , м ² /с	1,05 ⁻⁷	1,8 ⁻⁷
Электропроводность σ , См	0,01	0,12

При равной концентрации МУНТ в эластомерах (5 мас.%), для металлизированных МУНТ наблюдаются значительно лучшие электро- и теплофизические характеристики (см. **таблицу**), что связано с улучшением процессов теплопереноса за счет улучшения теплопроводности (с 0,19 до 0,34 Вт/(м·°C)) при одновременном улучшении электропроводности (с 0,01 до 0,12 См).

Выводы

1. Получены полимерные композиты на основе кремнийорганического силикона, модифицированного металлизированными МУНТ. Следует отметить, что для всех образцов характерно наличие эффекта саморегуляции температуры, выраженной в снижении мощности тепловыделения при повышении температуры до +40°C.
2. Установлено, что повторное включение/выключение эластомера с МУНТ на 50 и 100 циклов приводило к ухудшению свойств проводящего эластомера от доступной мощности 1,1 кВт/м² (-40°C) и, как следствие, снижению мощности до 0,3 кВт/м² (-40°C) после 100 циклов включения/выключения. При этом добавка МУНТ с металлизацией позволяет увеличить

мощность до 1,4 кВт/м² (27%) и снизить интенсивность деградации токопроводящих структур после 100 циклов включения/выключения до 1,2 кВт/м² при -40°C, что связано с улучшением процессов теплопереноса за счет улучшения теплопроводности (с 0,19 до 0,34 Вт/(м·°C)) при одновременном улучшении электропроводности (с 0,01 до 0,12 См).

Список источников

1. Kowalewska A., Majewska-Smolarek K. Synergistic Self-Healing Enhancement in Multifunctional Silicone Elastomers and Their Application in Smart Materials // Polymers. 2024, vol. 16, 487. DOI: 10.3390/polym16040487
2. Conjugated polymer-based composites for anti-corrosion applications / Dua S., Arora N., Prakashaiah B.G., Saxena R.C., Ganguly S.K., Senthilkumar T. // Progress in Organic Coatings. 2024, vol. 188, 108231. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108231.
3. Liu Z., Zhang Y., Li Y. Superhydrophobic coating for blade surface ice-phobic properties of wind turbines: A review // Progress in Organic Coatings. 2024, vol. 187, 108145.
4. Musa A.A., Onwualu A.P. Potential of lignocellulosic fiber reinforced polymer composites for automobile parts production: Current knowledge, research needs, and future direction // Heliyon. 2024, vol. 10, no. 3, e24683. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24683.
5. Thermal degradation and fire retardant behaviour of natural fibre reinforced polymeric composites - A Comprehensive Review / Hiremath V.S., Reddy D.M., Mutra R.R., Sajeev A., Dhilipkumar T., Naveen J. // Journal of Materials Research and Technology. 2024. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.04.085.
6. Goyal M., Singh K., Bhatnagar N. Conductive polymers: A multipurpose material for protecting coating // Progress in Organic Coatings. 2024, vol. 187, 108083. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.108083.
7. Kumar A., Kumar N. A review on the electrically conductive transparent polymer composites: Materials and applications // Materials Today: Proceedings. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.211.
8. Al-Saleh M.H., Al-Sharman M.M. Influence of carbon nanofiller geometry on EMI shielding and electrical percolation behaviors of polymer composites // Synthetic Metals. 2023, vol. 294, 117314. DOI: 10.1016/j.synthmet.2023.117314.
9. Advances in polymers and composite dielectrics for thermal transport and high-temperature applications / Wang L., Yang C., Wang X., Shen J., Sun W., Wang J., Yang G., Cheng Y., Wang Z. // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2023, vol. 164, 107320. DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.107320.
10. Smart composite using fibre optic sensors for fluid flow characterization and temperature measurement / Savastru D., Baschir L., Miclos S., Savastru R., Lancranjan I.I. // Composite Structures. 2023, vol. 304, no. 1, 116382. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116382.

11. Study of thermo-mechanical characteristics of polymer composite materials with embedded optical fibre / Savastru D., Miclos S., Savastru R., Lancranjan I.I. // *Composite Structures*. 2018, vol. 183, pp. 682-687. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.042.
12. Critical review on the characterization, preparation, and enhanced mechanical, thermal, and electrical properties of carbon nanotubes and their hybrid filler polymer composites for various applications / Ali Z., Yaqoob S., Yu J., D'Amore A. // *Composites Part C: Open Access*. 2024, vol. 13, 100434. DOI: 10.1016/j.jcomc.2024.100434.
13. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review / Ma P.-C., Siddiqui N.A., Marom G., Kim J.-K. // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010, vol. 41, no. 10, pp. 1345-1367. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.07.003.
14. Construction, mechanism and prospective of conductive polymer composites with multiple interfaces for electromagnetic interference shielding: A review / Wang M., Tang X.-H., Cai J.-H., Wu H., Shen J.-B., Guo S.-Y. // *Carbon*. 2021, vol. 177, pp. 377-402. DOI: 10.1016/j.carbon.2021.02.047.
15. Ultrafine iron oxide decorated mesoporous carbon nanotubes as highly efficient flame retardant in epoxy nanocomposites via catalytic charring effect / Zhang L., Yang D., Li Z., Zhai Z., Li X., de La Vega J., Wang D.-Y. // *Sustainable Materials and Technologies*. 2024, vol. 39, e00845. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e00845.
16. The morphology and magnetic properties of iron nanoclusters decorated multiwall carbon nanotubes / Al-Kindi U.S.H., Al-Harhi S.H., Myint M.T.Z., Kyaw H.H., Widadallah H.M., Elzain M.E. // *Materials Research Bulletin*. 2023, vol. 158, 112061. DOI: 10.1016/j.materresbull.2022.112061.
17. Fan X.-j., Li X. Preparation and magnetic property of multiwalled carbon nanotubes decorated by Fe₃O₄ nanoparticles // *New Carbon Materials*. 2012, vol. 27, no. 2, pp. 111-116. DOI: 10.1016/S1872-5805(12)60007-9.
18. Hamelian M., Varmira K., Veisi H. Synthesis heterogeneous and recyclable magnetic nanocatalysts by decorated amino-modified multi-walled carbon nanotubes with iron and silver nanoparticles (MWCNTs-NH₂/Fe₃O₄/Ag NPs) for organic dyes reduction // *Inorganic Chemistry Communications*. 2023, vol. 158, no. 1, 111566. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.111566.
19. Thermal degradation and fire retardant behaviour of natural fibre reinforced polymeric composites – A Comprehensive Review / Hiremath V.S., Reddy D.M., Mutra R.R., Sajeev A., Dhilipkumar T., Naveen J. // *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.04.085.
20. Visualizing electronic interactions between iron and carbon by X-ray chemical imaging and spectroscopy – Electronic supplementary information (ESI) available: Experimental details, computational details and Fig. S1–S10 / Chen X., Xiao J., Wang J., Deng D., Hu Y., Zhou J., Yu L., Heine T., Pan X., Bao X. // *Chemical Science*. 2015, vol. 6, no. 5, pp. 3262-3267. DOI: 10.1039/c5sc00353a.
21. Study of bamboo-type carbon nanotubes with magnetic iron carbide nanoparticles fabricated by a modified CVD method / Lobo Guerrero A., Rebollo-Plata B., Gallegos J.H.G. et al. // *J Nanopart Res* 23, 94 (2021). DOI: 10.1007/s11051-021-05207-3
22. Синтез углеродных нанотрубок с помощью СВЧ излучения для модификации эластомера с улучшенной электро- и теплопроводностью / Щегольков А.В., Щегольков А.В., Чумак М.А. и др. // *Перспективные материалы*. 2024. № 4. С. 54-65. DOI: 10.30791/1028-978X-2024-4-54-65.
23. Караваева Н.М., Першин Ю.В., Кодолов В.И. Свойства и высокая реакционная способность металл/углеродных нанокомпозитов // *Вестник Технологического университета*. 2017. Т. 20. № 19. С. 54-56.
24. Исследование влияния сверхмалых количеств металл/углеродного нанокомпозита на структуру поликарбоната / В.В. Тринеева, Ю.В. Першин, С.Г. Быстров, В.И. Кодолов // *Химическая физика и мезоскопия*. 2015. Т. 17. № 1. С. 126-131.
25. Isoprene Polymerization on Iron Nanoparticles Confined in Carbon Nanotubes / Li X., Zhang L., Tan R.P., Fazzini P.-F., Hungria T., Durand J., Sbastien Lachaize, Wen-Hua Sun, Marc Respaud, Katerina Soulantica, Serp P. // *Chemistry - A European Journal*. 2015, vol. 21, no. 48, 17437–17444. DOI: 10.1002/chem.201501165
26. Confinement effects on the shape and composition of bimetallic nano-objects in carbon nanotubes / Li X., Hungria T., Garcia Marcelot C., Axet M.R., Fazzini P.-F., Tan R.P., ..., Soulantica K. // *Chemical Communications*. 2016, vol. 52, no. 11, 2362–2365. DOI: 10.1039/c5cc09037g
27. Mugilgeethan Vijendran, Ryosuke Matsumoto, Shinya Taketomi. New understanding of one-dimensional thermal glide of a nano-sized prismatic dislocation loop in bcc iron: an atomic scale study // *Materials Today Communications*. 2023, vol. 37, 107387. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107387>.
28. Facile microwave synthesis of multi-walled carbon nanotubes for modification of elastomer used as heaters / I. Ali, Alexander Shchegolkov, Aleksey Shchegolkov, M. Chumak, A. Nashchekin, K. Likhachev, G. Imanova, T.A. Kurniawan, M.A. Habila // *Polymer Engineering & Science*. 2023, 63, pp. 1–11.
29. Применение углеродных нанотрубок, полученных CVD-методом, для суперконденсаторов с электролитом на основе LiPF₆ / Щегольков А.В., Липкин М.С., Щегольков А.В., Семенова А. // *Вопросы материаловедения*. 2022. №1(109). С. 64-76. DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-64-76

References

1. Kowalewska, A., Majewska-Smolarek, K. Synergistic Self-Healing Enhancement in Multifunctional Sili-

- cone Elastomers and Their Application in Smart Materials. *Polymers*. 2024.16, 487. DOI: 10.3390/polym16040487
2. Dua S., Arora N., Prakashaiah B.G., Saxena R.C., Ganguly S.K., Senthilkumar T. Conjugated polymer-based composites for anti-corrosion applications. *Progress in Organic Coatings*. 2024;188:108231. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108231.
 3. Liu Z., Zhang Y., Li Y. Superhydrophobic coating for blade surface ice-phobic properties of wind turbines: A review. *Progress in Organic Coatings*. 2024;187:108145. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.108145.
 4. Musa A.A., Onwualu A.P. Potential of lignocellulosic fiber reinforced polymer composites for automobile parts production: Current knowledge, research needs, and future direction. *Heliyon*. 2024;10(3):e24683. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24683.
 5. Hiremath V.S., Reddy D.M., Mutra R.R., Sajeev A., Dhilipkumar T., Naveen J. Thermal degradation and fire retardant behaviour of natural fibre reinforced polymeric composites - A Comprehensive Review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.04.085.
 6. Goyal M., Singh K., Bhatnagar N. Conductive polymers: A multipurpose material for protecting coating. *Progress in Organic Coatings*. 2024;187:108083. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.108083.
 7. Kumar A., Kumar N. A review on the electrically conductive transparent polymer composites: Materials and applications. *Materials Today: Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.211.
 8. Al-Saleh M.H., Al-Sharman M.M. Influence of carbon nanofiller geometry on EMI shielding and electrical percolation behaviors of polymer composites. *Synthetic Metals*. 2023;294:117314. DOI: 10.1016/j.synthmet.2023.117314.
 9. Wang L., Yang C., Wang X., Shen J., Sun W., Wang J., Yang G., Cheng Y., Wang Z. Advances in polymers and composite dielectrics for thermal transport and high-temperature applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2023;164:107320. DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.107320.
 10. Savastru D., Baschir L., Miclos S., Savastru R., Lancranjan I.I. Smart composite using fibre optic sensors for fluid flow characterization and temperature measurement. *Composite Structures*. 2023;304(1):116382. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116382.
 11. Savastru D., Miclos S., Savastru R., Lancranjan I.I. Study of thermo-mechanical characteristics of polymer composite materials with embedded optical fibre. *Composite Structures*. 2018;183:682-687. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.042.
 12. Ali Z., Yaqoob S., Yu J., D'Amore A. Critical review on the characterization, preparation, and enhanced mechanical, thermal, and electrical properties of carbon nanotubes and their hybrid filler polymer composites for various applications. *Composites Part C: Open Access*. 2024;13:100434. DOI: 10.1016/j.jcomc.2024.100434.
 13. Ma P.-C., Siddiqui N.A., Marom G., Kim J.-K. Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010;41(10):1345-1367. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.07.003.
 14. Wang M., Tang X.-H., Cai J.-H., Wu H., Shen J.-B., Guo S.-Y. Construction, mechanism and prospective of conductive polymer composites with multiple interfaces for electromagnetic interference shielding: A review. *Carbon*. 2021;177:377-402. DOI: 10.1016/j.carbon.2021.02.047.
 15. Zhang L., Yang D., Li Z., Zhai Z., Li X., de La Vega J., Wang D.-Y. Ultrafine iron oxide decorated mesoporous carbon nanotubes as highly efficient flame retardant in epoxy nanocomposites via catalytic charring effect. *Sustainable Materials and Technologies*. 2024;39:e00845. DOI: 10.1016/j.susmat.2024.e00845.
 16. Al-Kindi U.S.H., Al-Harthi S.H., Myint M.T.Z., Kyaw H.H., Widadallah H.M., Elzain M.E. The morphology and magnetic properties of iron nanoclusters decorated multiwall carbon nanotubes. *Materials Research Bulletin*. 2023;158:112061. DOI: 10.1016/j.materresbull.2022.112061.
 17. FAN X.-j., LI X. Preparation and magnetic property of multiwalled carbon nanotubes decorated by Fe₃O₄ nanoparticles. *New Carbon Materials*. 2012;27(2):111-116. DOI: 10.1016/S1872-5805(12)60007-9.
 18. Hamelian M., Varmira K., Veisi H. Synthesis heterogeneous and recyclable magnetic nanocatalysts by decorated amino-modified multi-walled carbon nanotubes with iron and silver nanoparticles (MWCNTs-NH₂/Fe₃O₄/Ag NPs) for organic dyes reduction. *Inorganic Chemistry Communications*. 2023;158(1):111566. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.111566.
 19. Hiremath V.S., Reddy D.M., Mutra R.R., Sajeev A., Dhilipkumar T., Naveen J. Thermal degradation and fire retardant behaviour of natural fibre reinforced polymeric composites - A Comprehensive Review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.04.085.
 20. Chen X., Xiao J., Wang J., Deng D., Hu Y., Zhou J., Yu L., Heine T., Pan X., Bao X. Visualizing electronic interactions between iron and carbon by X-ray chemical imaging and spectroscopy - Electronic supplementary information (ESI) available: Experimental details, computational details and Fig. S1-S10. *Chemical Science*. 2015;6(5):3262-3267. DOI: 10.1039/c5sc00353a.
 21. Lobo Guerrero A., Rebollo-Plata B., Gallegos J.H.G. et al. Study of bamboo-type carbon nanotubes with magnetic iron carbide nanoparticles fabricated by a modified CVD method. *J Nanopart Res* 23, 94 (2021). DOI: 10.1007/s11051-021-05207-3
 22. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Chumak M.A. et al. Synthesis of carbon nanotubes using microwave

- radiation to modify elastomer with improved electrical and thermal conductivity. *Perspektivnye materialy* [Promising materials], 2024;(4):54-65. (In Russ.) DOI: 10.30791/1028-978X-2024-4-54-65.
23. Karavaeva N.M., Pershin Yu.V., Kodolov V.I. Properties and high reactivity of metal/carbon nanocomposites. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2017;20(19):54-56. (In Russ.)
 24. Trineeva V.V., Pershin Yu.V., Bystrov S.G., Kodolov V.I. Study of the effect of ultra-small amounts of metal/carbon nanocomposite on the polycarbonate structure. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical physics and mesoscopy], 2015;17(1):126-131. (In Russ.)
 25. Li X., Zhang L., Tan R. P., Fazzini P.-F., Hungria T., Durand J., Sbastien Lachaize, Wen-Hua Sun, Marc Respaud, Soulantica Katerina, Serp P. Isoprene Polymerization on Iron Nanoparticles Confined in Carbon Nanotubes. *Chemistry - A European Journal*. 2015;21(48):17437-17444. DOI: 10.1002/chem.201501165
 26. Li X., Hungria T., Garcia Marcelot C., Axet M. R., Fazzini P.-F., Tan R. P., ..., Soulantica K. Confinement effects on the shape and composition of bimetallic nano-objects in carbon nanotubes. *Chemical Communications*. 2016;52(11):2362-2365. DOI: 10.1039/c5cc09037g
 27. Mugilgeethan Vijendran, Ryosuke Matsumoto, Shinya Taketomi. New understanding of one-dimensional thermal glide of a nano-sized prismatic dislocation loop in bcc iron: an atomic scale study. *Materials Today Communications*. 2023;37:107387. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.107387
 28. Ali I., Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Chumak M., Nashchekin A., Likhachev K., Imanova G., Kurniawan T.A., Habila M.A. Facile microwave synthesis of multi-walled carbon nanotubes for modification of elastomer used as heaters. *Polymer Engineering & Science*. 2023;63:1-11.
 29. Shchegolkov A.V., Lipkin M.S., Shchegolkov A.V., Semenkova A. Application of carbon nanotubes produced by CVD-method for supercapacitor with LiPF₆-based electrolyte. *Voprosy Materialovedeniya* [Questions of materials science], 2022;(1(109)):64-76. (In Russ.) DOI: 10.22349/1994-6716-2022-109-1-64-76

Поступила 04.06.2024; принята к публикации 30.07.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 04/06/2024; revised 30/07/2024; published 24/12/2024

Щегольков Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент,
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия.
Email: energynano@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4317-0689

Щегольков Алексей Викторович – кандидат технических наук, инженер,
Московский политехнический университет, Москва, Россия.
Email: alexxx5000@mail.ru. ORCID 0000-0002-1838-3842

Земцова Наталия Викторовна – аспирант,
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия.
Email: natasha_paramonova_68@mail.ru. ORCID 0000-0002-5274-6133

Никулин Павел Николаевич – аспирант,
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия.
Email: pasha2011nikulin@yandex.ru. ORCID 0009-0007-6041-014X

Alexander V. Shchegolkov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Tambov State Technical University, Tambov, Russia.
Email: energynano@yandex.ru. ORCID 0000-0002-4317-0689

Aleksei V. Shchegolkov – PhD (Eng.), Engineer,
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.
Email: alexxx5000@mail.ru. ORCID 0000-0002-1838-3842

Natalia V. Zemtsova – Postgraduate Student,
Tambov State Technical University, Tambov, Russia.
Email: natasha_paramonova_68@mail.ru. ORCID 0000-0002-5274-6133

Pavel N. Nikulin – Postgraduate Student,
Tambov State Technical University, Tambov, Russia.
Email: pasha2011nikulin@yandex.ru. ORCID 0009-0007-6041-014X

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.511.3
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-144-1513



АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РАБОТ НА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ НА АВИАСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Васин С.А.¹, Анцев В.Ю.¹, Трушин Н.Н.¹, Фетисов М.Н.², Юрин Д.С.²

¹Тульский государственный университет, Тула, Россия

²АО «НЦВ Миль и Камов», Томилино, Московская область, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Одним из направлений повышения производительности труда на авиастроительных предприятиях является организация результативного планирования производства авиационной техники. Результативность проектно-конструкторской деятельности и качество конструкторской документации во многом определяются принятыми на авиастроительном предприятии методами планирования работы инженерных служб. С одной стороны, существуют традиционные методики планирования работ. С другой стороны, развитие техники и технологий, изменение социально-экономических условий требуют модернизации существующих и создания новых методик планирования деятельности предприятия. Производственный опыт показывает, что на планирование проектно-конструкторских работ влияет сложная система факторов, связанных с причинами возникновения ошибок и несоответствий в конструкторской документации. Поэтому анализ проблем качества конструкторской документации должен являться основой модернизации системы планирования работы инженерных подразделений предприятия. **Цель работы.** Разработать методику эффективного планирования проектно-конструкторских работ исходя из анализа работы инженерного персонала предприятия. **Используемые методы.** Качество проектно-конструкторской документации определяется применяемыми на предприятии методами организации и планирования работы конструкторских подразделений. Многолетний производственный опыт показывает, что на планирование проектно-конструкторских работ оказывает влияние сложная система факторов, связанных с причинами возникновения ошибок и несоответствий в технической документации. Анализ проблем качества технической документации является основой модернизации системы планирования работы инженерных подразделений авиастроительного предприятия. **Новизна.** В статье представлены результаты системного анализа причин возникновения ошибок и несоответствий в проектно-конструкторских документах, разрабатываемых традиционно и при помощи компьютерных средств. Систематизация причин низкого качества технической документации показала, что всё многообразие причин ошибок и несоответствий можно подразделить на две группы: ошибки, обусловленные общими факторами, и ошибки, обусловленные специальными требованиями, предъявляемыми к проектируемому изделию. В случае производства авиационной техники специальные высокие требования к качеству проектно-конструкторской документации (ПКД) связаны с особенностями конструкций и условий эксплуатации проектируемых машин. **Результат.** Результаты анализа деятельности инженеров-конструкторов легли в основу специального инструментария обеспечения качества конструкторских работ. Разработанные инструменты качества используются в АО «НЦВ Миль и Камов». **Практическая значимость.** В результате практического применения разработок значение комплексного показателя качества разработки ПКД увеличилось до 0,98, процент сдачи ПКД с первого предъявления достиг уровня 92%, время ожидания проверки ПКД сократилось с двух недель до 2–4 дней, производительность труда проверяющих подразделений повысилась вдвое.

Ключевые слова: авиационная промышленность, подготовка производства, организация и планирование проектно-конструкторских работ

© Васин С.А., Анцев В.Ю., Трушин Н.Н., Фетисов М.Н., Юрин Д.С., 2024

Для цитирования

Анализ влияния качества проектно-конструкторских работ на результативность производственного планирования на авиастроительном предприятии / Васин С.А., Анцев В.Ю., Трушин Н.Н., Фетисов М.Н., Юрин Д.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 144-151. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-144-151>



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

ANALYSIS OF DESIGN WORK QUALITY IMPACT ON THE PRODUCTION PLANNING EFFECTIVENESS AT AN AIRCRAFT MANUFACTURING ENTERPRISE

Vasin S.A.¹, Antsev V. Yu.¹, Trushin N.N.¹, Fetisov M.N.², Yurin D.S.

¹Tula State University, Tula, Russia

²JSC National Helicopter Center Mil and Kamov, Tomilino, Moscow region, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). One of the directions of increasing labor productivity at aircraft building enterprises is the organization of effective planning of aircraft production. The efficiency of design and development activities and the quality of design documentation are largely determined by the methods of planning the work of engineering services adopted at the aircraft building enterprise. On the one hand, there are traditional methods of work planning. On the other hand, the development of techniques and technologies, changes in socio-economic conditions require modernization of existing and creation of new methods of enterprise activity planning. Production experience shows that planning of design and engineering works is influenced by a complex system of factors related to the causes of errors and discrepancies in the design documentation. Therefore, the analysis of design documentation quality problems should be the basis for modernization of the enterprise engineering departments work planning system. **Objectives.** The purpose of this study is to create a methodology for efficient planning of design activities, rooted in an analysis of engineering personnel performance. **Methods Applied.** The study relies on assessing the quality of design documentation affected by organizational and planning methods applied by the design departments. Extensive production experience underscores that planning the design and engineering activities is influenced by a multifaceted array of factors, leading to errors and discrepancies in technical documentation. Analysis technical documentation quality challenges is the basis for the system modernization of planning the work of an aircraft manufacturing enterprise engineering departments. **Originality.** This study is a systematic analysis of the causes of errors and discrepancies in manually and computer-generated design and manufacturing documents. The causes of poor quality of technical documentation can be divided into two groups: errors caused by general factors and errors caused by special requirements for the product. In the case of aircraft engineering, special high requirements for the quality of design documentation are associated with the design features and operating conditions of the designed machines. **Result.** The analysis results of the activities of design engineers formed the basis of a special toolkit for ensuring the quality of design work that is currently in use in the JSC National Helicopter Center Mil and Kamov. **Practical Relevance.** As a result of practical application of the developments, the value of the complex index of design documentation development quality increased to 0.98, the percentage of design documentation delivery from the first presentation reached the level of 92 %, the waiting time for design documentation inspection reduced from two weeks to 2–4 days, the labor productivity of inspection departments doubled.

Keywords: aircraft engineering, preparation of production, design organization and planning

For citation

Vasin S.A., Antsev V. Yu., Trushin N.N., Fetisov M.N., Yurin D.S. Analysis of Design Work Quality Impact on the Production Planning Effectiveness at an Aircraft Manufacturing Enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 144-151. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-144-151>

Введение

Авиационное является одной из ведущих отраслей машиностроения России и обладает громадным научно-техническим потенциалом. С момента своего появления в самом начале XX века авиационное играет роль одного из наиболее мощных драйверов развития мировой экономики [1, 2]. Именно поэтому 25 июня 2022 года Правительством Российской Федерации была утверждена «Комплексная программа развития авиатранспортной отрасли до 2030 г.», которая предусматривает выпуск и поставку авиакомпаниям 990 самолётов и 765 вертолётов с быстрой локализацией

производства авиационных агрегатов, ранее не производившихся в Российской Федерации.

Проблематика российской обрабатывающей промышленности, в том числе и авиационной, находится на особом контроле в Кабинете министров РФ. Так, 3 апреля 2024 года в Государственной Думе Российской Федерации состоялся ежегодный отчёт Правительства РФ, который представил Председатель Правительства М.В. Мишустин (источник – <http://government.ru/news/51246/>). Специальное внимание в своём отчёте премьер-министр уделил ключевым отраслям российской промышленности. В частности, объём промышленного авиастроительного производства увеличился на 19,4%. Как было отмечено

но в докладе, в самолётостроении была проделана огромная работа по переходу на отечественные наукоёмкие материалы и изделия, чтобы снизить зависимость от иностранных поставщиков. А в отношении вертолётостроения премьер-министр особо подчеркнул, что в 2024 году планируется увеличить почти на 30 % выпуск гражданских вертолётостроения. М.В. Мишустин также отметил, что «мы должны делать самые надёжные и современные машины».

Также в своём докладе премьер-министр уделил внимание и быстро развивающимся беспилотным авиационным системам, которые могут изготавливаться как на основе самолётов, так и на основе вертолётостроения. При этом М.В. Мишустин отметил, что «Правительство РФ приняло стратегию развития этого важного направления, утвердило национальный проект». В результате принимаемых Правительством РФ мер должно быть обеспечено эффективное использование беспилотников в российской экономике.

Таким образом, исходя из сложившихся технико-экономических условий, российским авиастроительным предприятиям необходимы интенсивные разработки инновационных методов проектирования, организации планирования, производства, модернизации и ремонта пилотируемой и беспилотной авиационной техники (АТ).

В настоящее время в РФ действуют Федеральные авиационные правила «Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21», которые содержат обновлённые требования к производителям АТ, которые обязаны иметь систему менеджмента качества летательных аппаратов (ЛА). Для осуществления поставленных задач предприятия авиационной промышленности проходят этап технического перевооружения, внедрения новых технологий и методов проектирования и конструирования ЛА с применением различных систем автоматизированного проектирования (САПР). При этом постоянно меняется и среда разработки проектно-конструкторской документации (ПКД), что в значительной степени повышает риск возникновения ошибок в ПКД, связанных с качеством работы конструкторов.

Материалы и методы исследования

Одним из направлений обеспечения машиностроительного производства является организация его результативного планирования. Результативность проектно-конструкторской деятельности и качество ПКД во многом определяются принятыми на предприятии методами планирования работы инженерных служб. С одной стороны, существуют традиционные методики планирования работ. С другой стороны, развитие техники и технологий, изменение социально-экономических условий требуют модернизации существующих и создания новых методик планирования деятельности предприятия.

Производственный опыт показывает, что на планирование проектно-конструкторских работ влияет

сложная система факторов, связанных с причинами возникновения ошибок и несоответствий в ПКД. Поэтому анализ проблем качества ПКД является базой, на основе которой производится модернизация системы планирования работы инженерных подразделений предприятия.

Полученные результаты и их обсуждение

Конструкторская подготовка производства в авиастроении – это ключевой этап в обновлении и расширении авиационного парка страны. Инженеры-конструкторы являются одними из наиболее востребованных работников в авиастроении, поскольку авиационная техника – это сложный высокотехнологичный продукт, состоящий из десятков тысяч деталей и сборочных единиц, к которому предъявляется большое количество требований. Производство самолётов и вертолётостроения по всем своим свойствам является глубоко наукоёмким производством, при этом доля расходов на научные исследования по совершенствованию технологии и продукции составляет порядка 40-60 % всех расходов предприятия. Проблематика и особенности различного рода наукоёмких производств рассматриваются во многих публикациях, например в [3, 4].

В наукоёмком производстве выпуск продукции связан с необходимостью проведения большого объёма теоретических расчётов, научных изысканий и экспериментов. Наукоёмкие производства также сопровождаются большими объёмами инженерно-графических работ при разработке конструкторских и технологических документов. Основная часть затрат приходится на разработку оптимальной конструкции изделий, создание новых материалов, разработку новых схем, обеспечение требуемой надёжности, экологической чистоты и безопасности обслуживания. При этом численность научного персонала в структуре наукоёмкого производства оставляет не менее 30-40% всей численности работников.

К самолётам и вертолётостроению традиционно предъявляются особо высокие требования к конструктивной и эксплуатационной надёжности. Требования, предъявляемые к ЛА, разделены по зонам ответственности: соответствие технических решений проверяется в рамках группы конструкторов, за технологическую проработку конструкции отвечает группа технологов, за метрологический контроль, контроль масс и другие сферы деятельности также отвечают соответствующие отделы, а в отделе нормоконтроля осуществляется проверка соответствия формальным требованиям к оформлению ПКД. От квалификации и эффективности работы как отдельных инженеров-конструкторов, так и проектно-конструкторских подразделений авиастроительных предприятий зависит качество проектируемой, изготавливаемой, модернизируемой и ремонтируемой АТ. Для самолетов и вертолетов как технических изделий ответственного назначения требуются специальные подходы к обеспечению их качества [5].

Одним из основных параметров ПКД является уровень ее качества, которое определяется как соответствие документации действующим нормативам и стандартам. Известно, что стоимость устранения ошибки, совершенной на стадии разработки воздушного судна и выявленной при эксплуатации, в сотни раз превышает стоимость ее устранения на стадии разработки, что требует совершенствования системы менеджмента качества разработчика АТ. Реализация такой системы проектирования новой продукции позволит проектировать опытные образцы ЛА с первого раза в полном соответствии с применяемыми к воздушному судну требованиями. Это чрезвычайно сложная задача, она остается такой и в настоящее время даже при наличии последних разработок в области САПР. Решение задачи обеспечения качества ПКД осложняется тем обстоятельством, что комплект ПКД для одного изделия исчисляется тысячами документов. Таким образом, ошибки и несоответствия, возникающие при создании ПКД, в итоге ведут к серьезным финансовым потерям и увеличивают сроки постановки изделия на производство [6, 7]. Аналогичная ситуация имеет место не только в авиастроении, но и в других отраслях промышленности, изготавливающих сложные технические изделия.

Ошибки, не выявленные в процессе контроля ПКД, могут привести к авариям и катастрофам ЛА. Природа и общие многочисленные причины ошибок инженеров в конечном итоге во многом связаны с человеческим фактором. Ошибки возникают на всех этапах проектно-конструкторских работ, имеют разную степень значимости и последствий [8, 9].

В работах [10-12] приведен анализ причин возникновения ошибок в работе инженеров-конструкторов, работавших более 40 лет назад, когда сложность АТ не была такой экстремальной, как сейчас, возможности вычислительной техники были еще низкими, а САПР находились на очень ранней стадии своего развития. С течением времени появилась необходимость новой систематизации и классификации деятельности инженеров и несоответствий, возникающих при проведении проектно-конструкторских работ в области АТ. Далее представлены результаты системного анализа причин и факторов, способствующих появлению ошибок в проектах АТ.

1. Главная причина ошибок в ПКД обусловлена низкой профессиональной эрудицией, недостаточным опытом и невысокой квалификацией исполнителей. Профессиональная эрудиция инженера начинает формироваться еще в общеобразовательной школе, углубляется во время обучения в вузе и в процессе профессиональной деятельности. Некоторые аспекты формирования профессиональных компетенций и технической эрудиции инженеров рассматриваются во многих методических публикациях по проблемам обучения, в частности в [13, 14].

2. Источником ошибок является и недостаточная трудовая дисциплина исполнителей из-за отсутствия или недостаточности последующего контроля ПКД. Данная причина в той или иной мере устраняется, в частности известной политикой «кнута и пряника» – рациональным сочетанием мер дисциплинарного воздействия, морального и материального стимулирования работников.

3. Низкое качество проектно-конструкторских работ может быть связано с недостаточностью результатов экспериментальных исследований. Для авиационной техники данный аспект является исключительно важным, поэтому авиастроительные предприятия имеют лётно-испытательные центры (ЛИЦ). С одной стороны, авиастроительные предприятия должны поддерживать актуальное техническое обеспечение ЛИЦ, с другой – для обеспечения работы ЛИЦ авиационные предприятия должны вести специальную подготовку и переподготовку инженеров-исследователей, тесно взаимодействующих с инженерами-конструкторами и инженерами-технологами.

4. Несоответствие технического задания на проектирование действительным требованиям к изделию также является причиной некачественной ПКД. В этом случае недостаточная проработка технического задания возникает вследствие отсутствия у разработчиков глубоких теоретических и практических знаний по функционированию проектируемого изделия.

5. Сложные технические изделия изготавливаются в кооперации с многими предприятиями. Поэтому на качество проектно-конструкторских работ также влияет и отсутствие локальных (частных) технических заданий на проектирование или приобретение конструкционных материалов, сборочных единиц и других составных частей проектируемого изделия.

6. На недостатки ПКД могут влиять неполнота научно-технической информации и проведенного патентно-лицензионного исследования в отношении проектируемого изделия. ЛА относятся к тем изделиям, проектирование и конструирование которых связано с созданием многочисленных объектов интеллектуальной собственности. Навыки проведения патентных исследований для будущих инженеров закладываются в процессе вузовского обучения. Вопросы организации патентных исследований и патентно-лицензионной работы в вузах при подготовке студентов-машиностроителей также рассмотрена во многих публикациях, например в [15].

7. Отсутствие анализа либо его недостаточность в отношении аналогов и прототипов проектируемого изделия тоже служит источником ошибок при проектно-конструкторских работах. В настоящее время в мировой авиационной промышленности накоплен громадный банк знаний, который требует тщательного изучения. В некоторых случаях проектировщики недостаточно активно ведут библиографические исследования, ищут и исследуют ранее выполненные разработки в области проектируемых объектов.

8. Недостаточность квалификации и/или компетентности руководителей проектно-конструкторских работ также может являться фактором низкого качества ПКД. Очевидно, что менеджмент предприятия наряду с рядовыми работниками должен периодически проходить переподготовку и повышение квалификации в соответствии с технико-экономическим состоянием отрасли.

9. Ошибки и несоответствия в ПКД могут возникать при отсутствии или недостаточности необходимого контроля над проектированием как изделия в целом, так и его отдельных составных частей. Для устранения этого фактора необходимы в отрасли в целом и на предприятиях в частности соответствующие локальные нормативные акты (ЛНА).

10. Еще одна причина недостаточного качества ПКД – отсутствие или нарушение типовых методик и процедур (алгоритмов) при организации и проведении проектно-конструкторских работ. Данная причина несоответствия ПКД установленным требованиям, как и предыдущие причины, может устраняться как экстенсивными, так и интенсивными методами. В первом случае это увеличение контролирующего персонала и контрольных операций, во втором – автоматизация контрольных операций. Очевидно, что при этом необходим рациональный баланс между этими методами.

11. При создании первых опытных и экспериментальных образцов вновь проектируемых изделий могут появляться творческие ошибки, обусловленные недостаточностью познания физической сущности изделия. Познание физической сущности изделия осуществляется в процессе многократных испытаний изделий.

12. Ошибки в расчётах тоже достаточно часто встречаются при проектировании сложных наукоёмких объектов. При этом зачастую инженеры-расчётчики не учитывают в полной мере динамические процессы, которые могут возникать во время работы изделия. Это приводит, в частности, к ослаблению конструкции изделия, элементов кинематической цепи, недостаточной (или завышенной) мощности двигателей. Данная причина ошибок во многом свойственна для авиастроения, поскольку физические процессы, сопровождающие полет ЛА, являются чрезвычайно сложными и трудно поддаются математической формализации.

13. Как продолжение предыдущего пункта систематизации – это ошибки при компоновке, выборе массы и габаритных размеров как проектируемого изделия, так и его отдельных составных частей. Проблема избыточной массы ЛА неоднократно описана в многочисленных научно-технических и научно-популярных изданиях, посвященных АТ [16-18]. В этих же монографиях описано много аварий и катастроф самолётов и вертолётов, причины которых были обусловлены ошибками при проектировании и конструировании ЛА.

14. Недостаточный учёт действия на проектируемое изделие внешних сил и вращающих моментов, который связан с ограниченностью знаний о физической сущности объекта проектирования, тоже может приводить к ошибкам в ПКД. Этому фактору в полной мере соответствует давно известное идиоматическое выражение «Дьявол кроется в деталях».

15. Часто недостаточное внимание конструкторами и технологами уделяется эргономическим требованиям, предъявляемым к проектируемому изделию, и обеспечению удобной и безопасной работе с ним обслуживающему персоналу. Важную роль при проектировании ЛА в настоящее время должно уделяться авионике – совокупности электронных пилотажно-навигационных приборов, устанавливаемых на борту ЛА.

16. Ещё один фактор низкого качества ПКД – отсутствие должного внимания к вопросам эксплуатации и техническому обслуживанию проектируемого изделия, регулировки и смазки движущихся частей. Многие сложные машины в настоящее время оснащаются автоматизированными системами централизованной смазки.

17. Недостаточное внимание конструкторами часто уделяется вопросам экологической безопасности проектируемого изделия с точки зрения его производства, эксплуатации и утилизации. Проблемы экологичности техники в полной мере применимы и к ЛА по разным направлениям: двигательная установка, конструкция планера и фюзеляжа, электрические и гидравлические системы и пр.

18. Низкое качество ПКД может быть связано с отсутствием у конструкторов должного внимания вопросам стандартизации, типизации и унификации в проектируемом изделии групп, узлов и отдельных деталей. В настоящее время роль унификации и стандартизации в отношении сложных технических изделий играет немаловажную роль в обеспечении их качества на всех этапах жизненного цикла.

19. При проектировании сложных технических изделий приходится использовать сборочные единицы и агрегаты сторонних изготовителей. Использование покупных составных частей проектируемого изделия в условиях работы, для которых они не предназначены, также является причиной некачественной ПКД.

20. Большое количество ошибок у конструкторов обусловлены их невнимательностью и торопливостью, что приводит к появлению большого количества более мелких ошибок в чертежах, спецификациях, расчётах, пояснительных записках. Данная причина зачастую обусловлена перегруженностью инженеров проектными заданиями, жёсткими сроками сдачи проектов в производство, отвлечением работников на непрофильные и внеочередные задания.

21. Определённая часть ошибок проектирования связана с нарушением разного рода специальных инструкций, требований и указаний, предъявляемых к изделиям с особыми требованиями по надёжности и долговечности эксплуатации, к которым относятся и

ЛА. При этом тоже необходимо найти рациональный баланс между количеством инструкций и их целесообразностью.

22. Недостаточный функционал, ошибки и недочёты в алгоритмах работы конструкторских САПР – тоже источник ошибок и несоответствий в проектно-конструкторских документах. Инженеры-программисты САПР во многих случаях также совершают ошибки в своих программах, поэтому пользователям САПР необходимо периодически обновлять версии программных продуктов, внимательно, а иногда и критически подходить к оценке получаемых результатов работы программ.

23. Неуверенное пользование конструкторами вычислительной техникой и специальными программными продуктами также может быть источником ошибок в процессе проектно-конструкторских работ. В настоящее время в конструкторских подразделениях совместно работают как молодые, так и возрастные конструкторы. Однако на практике регистрируются случаи, когда молодые инженеры, которые должны быть уверенными пользователями вычислительной техники, недостаточно глубоко исследуют и используют функционал программ САПР.

24. Ошибки в проектах могут быть также связаны с состоянием физического здоровья и морального состояния исполнителя (-ей), что также часто связано с перегруженностью работников. В данном случае для устранения фактора низкого качества ПКД необходима система планирования проектно-конструкторских работ, исключающая перегрузку работников.

Заключение

Результаты систематизации причин низкого качества ПКД показывают, что всё многообразие причин ошибок и несоответствий в ПКД можно подразделить на две группы: ошибки, обусловленные общими факторами, и ошибки, обусловленные специальными требованиями, предъявляемыми к проектируемому изделию. В случае производства АТ специальные высокие требования связаны с особенностями конструкций и условий эксплуатации проектируемых ЛА.

Результаты анализа деятельности инженеров-конструкторов и разрабатываемой ими ПКД послужили базой для создания специального инструментария обеспечения качества документации. Разработанные инструменты качества внедрены на предприятии АО «НЦВ Миль и Камов», входящем в холдинг «Вертолеты России» [19]. При этом значение комплексного показателя качества разработки ПКД увеличилось до 0,98, процент сдачи ПКД с первого предъявления достиг уровня 92%, время ожидания проверки ПКД сократилось с двух недель до 2–4 дней, производительность труда проверяющих подразделений повысилась вдвое.

Список источников

1. Мантуров Д.В., Калачанов В.Д. Организация производства наукоёмкой продукции в авиационной промышленности России в современных экономических условиях // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 4. С. 186-192.
2. Круглов М.Г., Юрин Д.С. Устойчивое развитие российских предприятий: проблемы и перспективы // Горизонты ИСО: Системы менеджмента и оценка соответствия. 2021. № 6. С. 3-9.
3. Латышенко Г.И. Наукоёмкие технологии и их роль в современной экономике России // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2009. № 3 (24). С. 136-140.
4. Авдонин Б.Н., Хрусталёв Е.Ю. Методология организационно-экономического развития наукоёмких производств. М.: Наука, 2010. 367 с.
5. Васин С.А., Плахотникова Е.В. Модель обеспечения качества технических систем ответственного назначения // Качество и жизнь. 2019. № 1 (21). С. 3-7.
6. Кохановский В.Д., Дзюман-Грек Ю.Н. Конструкторский контроль чертежей. М.: Машиностроение, 1988. 232 с.
7. Амиров Ю.Д. Основы конструирования: Творчество – стандартизация – экономика. М.: Изд-во стандартов, 1991. 392 с.
8. Управление процессом разработки конструкторской документации в современной организации / А.Н. Пегина, Л.И. Назина, Н.Л. Клейменова и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. Вып. 4. С. 228-235.
9. Анцев В.Ю., Казанлеев М.Х., Ханин К.Н. Управление качеством процесса разработки проектной документации на транспортно-технологические комплексы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 4. С. 228-238.
10. Дружинский И.А. Слагаемые качества конструкторских работ. Записки конструктора. Л.: Лениздат, 1977. 119 с.
11. Борисов В.И. Общая методология конструирования машин. М.: Машиностроение, 1978. 120 с.
12. Разумов И.М., Трайнев В.А., Баранчев В.П. Организация управления качеством проектных работ. Тула: Приок. кн. изд-во, 1979. 200 с.
13. Профессионализм инженера-конструктора: анализ, оценка и совершенствование / А.П. Исаев, А.М. Козубский, Л. В. Плотников и др. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 168 с.
14. Трушин Н.Н. Некоторые аспекты организации творческой работы студентов и аспирантов // Образование и проблемы развития общества. 2022. № 2 (19). С. 74-84.
15. Лобанов А.В., Трушин Н.Н. Патентные исследования как форма организации научно-исследовательской практики студентов и аспиран-

тов машиностроительных направлений и специальностей // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2022. № 4 (18). С. 59-63.

16. Шавров В.Б. История конструкций самолетов в СССР до 1938 г. М.: Машиностроение, 2002. 703 с.
17. Шавров В.Б. История конструкций самолетов в СССР, 1938-1950 гг. М.: Машиностроение, 2002. 543 с.
18. Арсеньев Е.В., Берне Л.П., Боев Д.А. История конструкций самолетов в СССР 1951-1965 гг. М.: Машиностроение, 2002. 824 с.
19. Юрин Д.С., Тарасов А.С., Денискина А.Р. Организация процесса улучшения качества рабочей конструкторской документации на авиастроительном предприятии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 8. С. 3-9.

References

1. Manturov D.V., Kalachanov V.D. Organization of production of knowledge-intensive products in the aviation industry of Russia in modern economic conditions. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo instituta* [Aerospace MAI Journal], 2012;19(4):186-192. (In Russ.)
2. Kruglov M.G., Yurin D.S. Sustainable Development of Russian Enterprises: Problems and Prospects. *Gorizonty ISO: Sistemy menedzhmenta i ocenka sootvetstviya* [ISO Horizons: Management Systems and Conformity Assessment], 2021;(6):3-9. (In Russ.)
3. Latyshenko G.I. Science-intensive technologies and their role in the modern economy of Russia. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev], 2009;3(24):136-140. (In Russ.)
4. Avdonin B.N., Hrustal'ov E.Yu. *Metodologiya organizacionno-ekonomicheskogo razvitiya naukovykh proizvodstv* [Methodology of organizational and economic development of knowledge-intensive industries]. Moscow: Science, 2010, 367 p. (In Russ.)
5. Vasin S.A., Plahotnikova E.V. Model of quality assurance of technical systems of responsible purpose. *Kachestvo i zhizn'* [Quality and life], 2019;1(21):3-7. (In Russ.)
6. Kohanovskij V.D., Dzyuman-Grek Yu.N. *Konstruktorskiy kontrol chertezhej* [Design inspection of drawings]. Moscow: Mechanical engineering, 1988, 232 p. (In Russ.)
7. Amirov Yu.D. *Osnovy konstruirovaniya: Tvorchestvo – standartizatsiya – ekonomika* [Fundamentals of Design: Creativity – Standardization – Economics]. Moscow: Standards Publishing House, 1991, 392 p. (In Russ.)
8. Pegina A.N., Nazina L.I., Klejmenova N.L., Shemelova A.D. Management of the design documentation development process in a modern organization. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Tula states university. Technical Sciences], 2020;(4):228-235. (In Russ.)
9. Antsev V.Yu., Kazanleev M.X., Xanin K.N. Quality management of the process of developing design documentation for transportation and technological complexes. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Tula states university. Technical Sciences], 2011;(4):228-238. (In Russ.)
10. Druzhinskij I.A. *Slagaemye kachestva konstruktorskih rabot. Zapiski konstruktora* [Constituents of the quality of design work. Notes of the designer]. Leningrad: Lenizdat, 1977, 119 p. (In Russ.)
11. Borisov V.I. *Obshchaya metodologiya konstruirovaniya mashin* [General machine design methodology]. Moscow: Mechanical engineering, 1978, 120 p. (In Russ.)
12. Razumov I.M., Trajnev V.A., Barancheev V.P. *Organizatsiya upravleniya kachestvom proektnykh rabot* [Organization of quality management of project works]. Tula: Priokskoe book publishing house, 1979, 200 p. (In Russ.)
13. Isaev A.P., Kozubskij A.M., Plotnikov L.V., Suhanov G.G., Fomin N.I., Furin V.O. *Professionalizm inzhenera-konstruktora: analiz, ocenka i sovershenstvovanie* [Professionalism of a design engineer: analysis, evaluation and improvement]. Ekaterinburg: Ural University Publishing House, 2015, 168 p. (In Russ.)
14. Trushin N.N. Some aspects of organization of creative work of undergraduate and postgraduate students. *Obrazovanie i problemy razvitiya obshchestva* [Education and the challenges of societal development], 2022;2(19):74-84. (In Russ.)
15. Lobanov A.V., Trushin N.N. Patent research as a form of organization of research practice of students and postgraduates of machine-building directions and specialties. *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of the Vologda State University. Series: Technical Sciences], 2022;4(18):59-63. (In Russ.)
16. Shavrov V.B. *Istoriya konstrukcij samoletov v SSSR do 1938 g.* [History of airplane designs in the USSR before 1938]. Moscow: Mechanical engineering, 2002, 703 p. (In Russ.)
17. Shavrov V.B. *Istoriya konstrukcij samoletov v SSSR, 1938-1950 gg.* [History of airplane designs in the USSR, 1938-1950]. Moscow: Mechanical engineering, 2002, 543 p. (In Russ.)
18. Arsenev E.V., Berne L.P., Boev D.A. *Istoriya konstrukcij samoletov v SSSR 1951-1965 gg.* [History of airplane designs in the USSR 1951-1965]. Moscow: Mechanical engineering, 2002, 824 p. (In Russ.)
19. Yurin D.S., Tarasov A.S., Deniskina A.R. Organization of the process of improving the quality of working design documentation at an aircraft manufacturer. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Tula states university. Technical Sciences], 2023;(8):3-9. (In Russ.)

Поступила 19.05.2024; принята к публикации 11.06.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 19/05/2024; revised 11/06/2024; published 24/12/2024

Васин Сергей Александрович – доктор технических наук, профессор,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: vasin_sa53@mail.ru. ORCID 0009-0008-6737-7909

Анцев Виталий Юрьевич – доктор технических наук, профессор,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: anzev@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7239-9266

Трушин Николай Николаевич – доктор технических наук, доцент,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: trunikolaj@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7974-3832

Фетисов Михаил Николаевич – заместитель исполнительного директора,
АО «НЦВ Миль и Камов», Томилино, Московская область, Россия.
Email: mkhl.ftsv@gmail.com. ORCID 0009-0009-8952-5068

Юрин Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук,
заместитель исполнительного директора по системе качества,
АО «НЦВ Миль и Камов», Томилино, Московская область, Россия.
Email: yurinds@rambler.ru. ORCID 0009-0000-0484-6802

Sergej A. Vasin – DrSc (Eng.), Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: vasin_sa53@mail.ru. ORCID 0009-0008-6737-7909

Vitalij Yu. Antsev – DrSc (Eng.), Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: anzev@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7239-9266

Nikolaj N. Trushin – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: trunikolaj@yandex.ru. ORCID 0000-0001-7974-3832

Mixail N. Fetisov – Deputy Executive Director,
JSC National Helicopter Center Mil and Kamov, Tomilino, Moscow region, Russia.
Email: mkhl.ftsv@gmail.com. ORCID 0009-0009-8952-5068

Dmitriy S. Yurin – PhD (Eng.), Deputy Executive Director for Quality System,
JSC National Helicopter Center Mil and Kamov, Tomilino, Moscow region, Russia.
Email: yurinds@rambler.ru. ORCID 0009-0000-0484-6802

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 623.4.01
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-152-162



МОДЕРНИЗАЦИЯ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ В ОБОГАТИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Лонcich П.А., Федотова А.В., Головина Е.Ю., Лонcich Н.П., Евлоева М.В.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. В современных подходах к управлению промышленным предприятием наблюдается широкое использование принципов децентрализованного группового управления. Эти подходы предусматривают передачу подразделениям предприятия значительного объема функций с высших уровней управления, что позволяет им самоорганизоваться и повысить эффективность и результативность принимаемых решений. При этом возможность отказаться от централизованного планирования производства на оперативном уровне становится реальностью. Такой подход способствует более гибкой организации и автоматизации производственных процессов, что отражается на эффективности работы предприятия. Сетецентрическая система управления основана на концепции сетецентричной структуры, которая способствует созданию и эффективному использованию информации членами организации с целью увеличения конкурентного преимущества через сотрудничество гибких самоуправляемых команд. Сама сетецентричность представляет собой основополагающий принцип организации систем управления, обеспечивающий понимание ситуации (ситуационную осведомленность). В рамках сетецентрического подхода успешное управление заключается в поддержании системы в максимально полном и достоверном состоянии, прежде всего путем вовлечения максимального количества доступных источников первичной оперативной информации. В ходе исследования обсуждаются основные принципы сетецентрической модели управления и его преимущества для обогащательной промышленности. Данная модель управления применяется для улучшения координации между различными подразделениями, оптимизации процессов обогащения и повышения качества продукции. Практические аспекты внедрения сетецентрического управления в обогащательной промышленности, включая выбор подходящих технологий, обучение персонала и управление изменениями. В заключение авторы приходят к выводу, что сетецентрическая модель управления имеет большой потенциал для трансформации обогащательной промышленности, позволяя организациям работать более эффективно, продуктивно и безопасно.

Ключевые слова: системы управления, сетецентрические системы, цикл Бойда, цикл Деминга, система менеджмента качества

© Лонcich П.А., Федотова А.В., Головина Е.Ю., Лонcich Н.П., Евлоева М.В., 2024

Для цитирования

Модернизация сетецентрической концепции в обогащательном производстве / Лонcich П.А., Федотова А.В., Головина Е.Ю., Лонcich Н.П., Евлоева М.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 152-162. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-152-162>



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

IMPROVING THE NETWORK-CENTRIC CONCEPT IN ENRICHMENT PRODUCTION

Lontsikh P.A., Fedotova A.V., Golovina E.Yu., Lontsikh N.P., Evloeva M.V.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. The principles of decentralized group management are widely applied in modern industrial enterprise management approaches. These approaches provide for the transfer of a significant amount of functions from the highest management levels to enterprise divisions, which allows them to self-organize and improve the efficiency of decision-making and makes the opportunity to abandon centralized production planning at the operational level real. This approach contributes to a more flexible organization and automation of production processes, which improves the efficiency of the enterprise. The network-centric management system is based on the concept of a network-centric structure, which promotes the creation and efficient use of information by organization members to increase competitive advantage through the collaboration of flexible self-managing teams. Network-centricity itself represents a fundamental principle of organizing management systems, ensuring situational awareness. Within the network-centric approach, successful management involves maintaining the system in the most complete and accurate state, primarily by involving the maximum number of available sources of primary operational information. The study discusses the main principles of the network-centric management model and its benefits for the enrichment industry. This management model is used to improve coordination between different departments, optimize enrichment processes and improve product quality. Practical aspects of implementing network-centric management in the enrichment industry, including choosing the right technologies, training personnel, and managing change. In conclusion, the authors conclude that the network-centric management model has great potential to transform the enrichment industry, enabling organizations to work more effectively, productively and safely.

Keywords: management systems, network-centric systems, Boyd cycle, Deming cycle, quality management system

For citation

Lontsikh P.A., Fedotova A.V., Golovina E.Yu., Lontsikh N.P., Evloeva M.V. Improving the Network-Centric Concept in Enrichment Production. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 152-162. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-152-162>

Введение

Сетецентрический подход к управлению предприятием представляет собой инновационный метод, основанный на постоянном цикле развития и оценке качества по циклу Деминга. Сравнивая два известных цикла – цикл Деминга и цикл Бойда, можно сделать вывод, что стремление к сетецентрической модели становится все более актуальным, ключевое значение приобретает анализ принципов построения такой среды. Отказ от традиционных иерархических структур в пользу коллективной обработки информации позволяет увеличить оперативность и эффективность деятельности предприятия. Сегодня все больше компаний стремятся создать эффективную сетецентрическую среду, основанную на передовых технологических принципах. Это свидетельствует о стремлении к инновациям и усилении конкурентоспособности на рынке. Такой подход не только подтверждает актуальность предлагаемого цикла Деминга, но также открывает новые перспективы для проверки его эффективности в ходе процессов валидации и верификации. Исследования в данной области могут стать отправной точкой для новых открытий в сетецентрическом менеджменте и способствовать развитию бо-

лее гибких и адаптивных моделей управления. Ключевым моментом становится внедрение технологических инноваций, способных улучшить процессы сбора, анализа и использования информации в сетецентрической среде.

Анализ применимых методов управления обогатительного производства.

Реализация сетецентрической концепции на основе цикла Бойда в обогатительном производстве

Для того чтобы более глубоко понимать сетецентрический подход, необходимо различать два понятия: сетевая организация и организация сетецентрическая. Разнообразие категорий и определений сетей и сетевого управления порождает множество подходов к данной теме. В отечественной литературе существует различное толкование понятия «сетевая структура», и каждое исследование находит свое объяснение понятия «сеть». Однако в большинстве случаев под «сетевой структурой» подразумевается сеть внутри компании, где различные подразделения действуют как автономные единицы и сотрудничают между собой. Эти компании часто называются «сете-

выми организациями». Тем не менее, когда применяется сетцентрический подход, любая сетевая организация становится сетцентрической [1, 3].

В эпоху высоких технологий классические модели управления уступают место гибким, динамичным сетям. Во многих высокотехнологичных предприятиях информация течет свободно, подобно электричеству, питая каждый узел сложной системы. Это и есть сетцентричная организация – новый подход к управлению, изначально находя применение в военном деле. В 1998 году, словно секретное оружие, эта концепция впервые появилась на поле боя. Военные стратеги осознали: ключ к победе – не грубая сила, а информационное превосходство. Объединив разрозненные элементы армии в единую информационно-коммуникационную сеть, они создали мощный инструмент для достижения стратегических целей. Сегодня этот революционный подход находит применение далеко за пределами военных полигонов. Высокотехнологичные компании перенимают принципы сетцентричной организации, меняя не только инфраструктуру и процессы, но и саму корпоративную культуру. Сотрудники перестают быть винтиками в гигантской машине, превращаясь в активных участников сети, способных быстро адаптироваться к меняющейся ситуации. Сетцентричная организация – это не просто новая управленческая концепция. Это ключ к успеху в мире, где информация ценится дороже золота, а скорость реакции определяет победителя.

Отмечается, что сетцентрический подход к применению метода последовательной динамической оценки качества заключается в использовании концепции OODA (Observe – Orient – Decide – Act), известной также как цикл Бойда, на каждом этапе процесса. Этот подход предполагает многократное повторение действий с учетом принципа Деминга PDCA. В англоязычной литературе цикл OODA иногда называют «Boyd Cycle» (рис. 1).

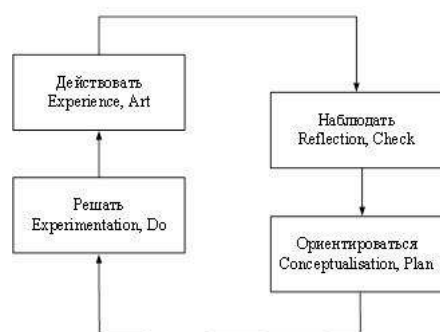


Рис. 1. Цикл Бойда (Boyd Cycle), или «Observe (наблюдай) – Orient (ориентируйся) – Decide (решай) – Act (действуй)»

Fig. 1. Boyd Cycle, or “Observe – Orient – Decide – Act”

Для того чтобы успешно внедрить концепцию сетцентрической организации, необходимо отказаться от традиционной иерархической структуры в пользу

гибридной формы, способной к гибкой адаптации. Основная идея цикла НОРД звучит следующим образом: побеждает не тот, кто идеально приспособлен к текущей ситуации, а тот, кто готовится к переменам и действует в условиях неопределенности [2].

Если мы не можем справиться с неопределенностью, мы застреваем на стадии решения, действия, либо наблюдения.

Робастное проектирование включает в себя разработку систем, процессов или стратегий, которые устойчивы к неопределенности и изменениям внешних условий. Оно предполагает создание таких решений, которые способны адаптироваться к различным сценариям развития событий без серьезного нарушения функционирования. Для робастного проектирования важно учитывать неопределенность в различных областях, таких как технологические инновации, экономические флуктуации, изменения потребительских предпочтений и даже естественные катаклизмы. Это требует использования различных методов и инструментов, таких как анализ чувствительности, сценарный анализ, моделирование риска и стратегическое планирование. Робастное проектирование также включает в себя создание гибких и адаптивных систем, способных быстро реагировать на изменения внешних условий. В результате получаются гибкие и адаптивные системы, способные быстро реагировать на изменения окружающей среды. Это может быть достигнуто за счет использования гибких технологий, управления запасами, диверсификации и горизонтальной интеграции. В целом робастное проектирование при неопределенности предполагает учет различных возможных изменений и создание систем, которые могут успешно функционировать в разных сценариях.

Сетцентрическая концепция при модернизированном цикле Бойда

Модернизация цикла Бойда (рис. 2) может включать в себя использование передовых технологий для улучшения скорости и качества каждого этапа. Научная новизна состоит в исследовании и совершенствовании концепции Бойда, одного из элементов данного цикла. Элемент «Изменить» состоит в поиске способов оптимизации процесса принятия решений в динамичной среде: изучение возможностей повышения скорости, точности и адаптивности с применением передовых технологий и научных методов.

1. Наблюдение. Внедрение передовых систем наблюдения, таких как беспилотные летательные аппараты (БПЛА), датчики и системы искусственного интеллекта для сбора и анализа информации в реальном времени.

2. Ориентирование. Использование аналитики данных и машинного обучения для обработки собранной информации и формирования понимания текущей ситуации.

3. Принятие решения. Создание автоматизированных систем поддержки принятия решений, которые могут анализировать большие объемы данных и предлагать оптимальные варианты действий.

4. Изменение. Изменение цикла может включать в себя использование новых инструментов, оптимизацию процессов, внедрение автоматизации и улучшение пропускной способности. Это также может включать в себя анализ данных для более точного прогнозирования и планирования изменений в цикле. Ключевыми компонентами могут быть технологии Интернета вещей (IoT), искусственный интеллект (ИИ) и цифровая трансформация.

5. Действие. Внедрение современных технологий автоматизации и роботизации для оперативного выполнения принятых решений и реагирования на изменяющиеся условия.

Модернизация цикла Бойда с использованием современных технологий может существенно улучшить способность принятия эффективных решений и выполнения оперативных действий в различных областях, от военной стратегии до бизнеса и управления проектами.

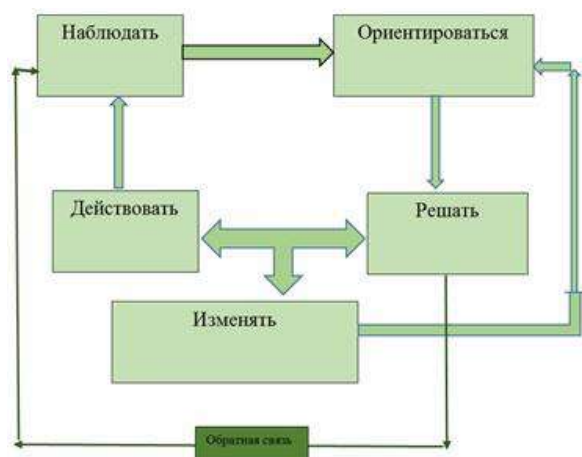


Рис. 2. Модернизированный цикл Бойда
Fig. 2. Modernized Boyd cycle

В наше время мы постоянно сталкиваемся с неопределенностью в окружающей нас среде, исследуем новые возможности принятия решений и стремимся адаптироваться к переменам.

Адизес считает, что создание эффективной и результативной организации в долгосрочной и краткосрочной перспективе, что является итоговой целью процесса управления, возможно при условии выполнения четырех функций:

Р – producing – производство результатов, для которых и существует компания.

А – administrating – администрирование, необходимое для эффективного взаимодействия.

Е – entrepreneuring – предпринимательство, направленное на управление развитием.

І – integrating – интеграция, обеспечивающая жизнеспособность компании в долгосрочной перспективе за счет объединения ее элементов [5].

В концепции Ицхака Адизеса каждая роль управленческой команды обозначается как буква: Р (предприниматель), А (администратор), Е (производитель), І (интегратор). Если менеджер имеет выраженную функцию, то ей соответствует заглавная буква, а если функция не так очевидна, используется маленькая буква. Идеального руководителя (РАЕІ) не бывает, поэтому эффективные лидеры обладают сильным фокусом на одной или двух функциях, в то время как остальные функции могут быть менее выраженными (рис. 3).

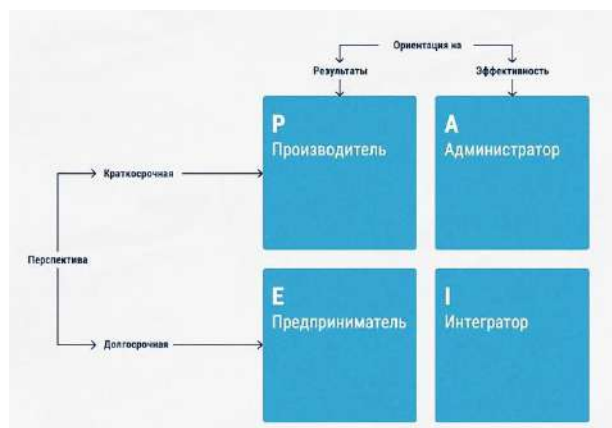


Рис. 3. Типы руководителей по методологии Адизеса
PAEI

Fig. 3. Types of managers according to the Adizes' PAEI methodology

Познание эффективности принятия решений состоит в том, чтобы уделять внимание всем ролям, которые играют свою часть. Однако одному человеку сложно справиться сразу со всеми четырьмя. Поэтому формирование команды с оптимальным спектром управленческих ролей гарантирует результативное управление на каждом этапе работы.

Любая смесь этих функций, каждая выполненная на оптимальном уровне, представляет собой уникальный стиль управления. Хорошему лидеру не обязательно быть идеальным в выполнении всех функций. Достаточно справляться с ними на уровне, соответствующем поставленной задаче. В зависимости от этого создается стиль управления: руководитель может быть производителем – Раеі, администратором – рАеі, предпринимателем – РаЕі, интегратором – раеІ и т.д. [6, 7].

Изучая исследования Ицхака Адизеса, можно прийти к выводу, что менеджмент – это процесс достижения результатов и эффективности в краткосрочной и долгосрочной перспективах. Подобно функционированию большинства физических, биологических или социальных систем, динамика органи-

зационного развития описывается циклическим характером, похожим на идеи Грейнера.

Ошибочные стили управления начали преобладать в компаниях на волне изменений во внешней экономической среде с конца XX и начала XXI века [8]. Глобализация, укрепление позиций международных корпораций, изменение долей рынков, стремление к прибыли и личному обогащению высших менеджеров и собственников корпораций – все это стало основной целью бизнеса. Успех компании (как и успех ее руководства) стал все больше зависеть от агрессивных и скоростных мер по выводу конкурентов из игры, что разрывается с обеспечением качественных результатов. Качественные результаты требуют внимательного анализа, методичного решения проблем, детального определения истинных причин и последующих корректирующих мер для их устранения. Менеджмент имеет массив эффективных методов, но их применение несовместимо с поспешными решениями, несущими рост и укрепление бизнеса в настоящей агрессивной внешней среде.

Теория Бойда, изначально разработанная для военной практики, демонстрирует высокую эффективность и находит применение в моделировании сложных систем, принятии решений в различных областях.

В статьях, посвященных теории Бойда [3], разнообразие циклических моделей деятельности и принятия решений в различных областях научного и практического знания представляет собой многообразие подходов. Многие ученые отмечают, что цикл OODA, сочетающий в себе функциональные блоки, модельные и когнитивные возможности, является своеобразной «золотой серединой» среди подобных моделей. На **рис. 4** представлены несколько известных циклических моделей, применяемых в управлении проектами, принятии решений, управлении качеством, психологии и военном деле, что подчеркивает их универсальность и значимость в различных областях человеческой деятельности.

В мире сетевых взаимодействий узким местом становится не скорость обмена информацией, а способность системы переваривать её и трансформировать в конкретные действия. Закон Амдаля в своем приложении, известном как «эффект очередей», наглядно демонстрирует это ограничение. Как бы быстро ни двигались данные по сети, их реальное влияние ограничено скоростью обработки, анализа и принятия решений. В сетевцентричной организации ИТ-платформы и уровень цифровизации играют, насколько быстро информация превратится в результат.

№ п/п	Наименование, основные этапы	Кол-во этапов	Основная область применения, источники информации
1.	Цикл OODA, НОРД (O – observe – наблюдай, O – orient – ориентируйся, D – decide – решай, A – act – действуй)	4	Моделирование военной деятельности в МО США
2.	Цикл поражения цели F2T2EA (Find – найти, Fix – захватить, Track – сопровождать, Target – навести, Engage – поразить, Assess – оценить)	7	Моделирование высокоточного оружия в ВВС США
3.	Цикл Деминга PDCA (P – plan – планирование, D – do – реализация, C – check – проверка, A – action – действие)	4	Управление качеством продукции
4.	Цикл Деминга для рутинной деятельности SDCA (S – standard – стандарт, D – do – реализация, C – check – проверка, A – action – действие)	4	Управление качеством в конвейерных операциях
5.	Цикл обучения Колба (наблюдение и рефлексирование – обдумывание – принятие решения – действие)	4	Теория обучения и искусственного интеллекта
6.	Проектный цикл Новикова Д.А. (проектирование – технологическая реализация – рефлексия)	3	Управление проектами
7.	Цикл управленческой деятельности (планирование – организация – мотивация – контроль)	4	Менеджмент
8.	Цикл универсальной системы показателей деятельности TPS (Total Performance Scorecard) (формулирование – информационное связывание – совершенствование – развитие – анализ и обучение)	5	Менеджмент
9.	Цикл разведки, Intelligence Cycle (Collect – собирать, Index & Organize – систематизировать, PCEAISIP – формирование единого документа, Disseminate – отсев ненужного, Plan & Direct – планирование и передача информации)	5	Разведка
10.	Цикл программно-целевого планирования и управления PPBE (P – planning – планирование, P – programming – программирование, B – budgeting – бюджетирование, E – executing – исполнение)	4	Планирование и управление НИОКР созданием вооружения
11.	Цикл научного метода (наблюдение – формирование гипотезы – проверка гипотезы – построение теории)	4	Научная деятельность

Рис. 4. Циклические модели деятельности

Fig. 4. Cyclical models of activity

Теория Бойда добавляет еще один штрих к этой картине. Каждый участник сети, будь то человек или организация, обладает своей собственной «петлей принятия решений», своей индивидуальной скоростью реакции. Поэтому эффективность сетевидной структуры определяется не только технологическими возможностями, но и способностью каждого узла сети быстро и эффективно обрабатывать информацию.

Для достижения максимальной эффективности и конкурентоспособности любого предприятия важно иметь систему организационных процедур, документации и ресурсов, направленных на управление качеством продукции и услуг. Когда деятельность организована и управляется как слаженное взаимодействие процессов, функционирующих как хорошо согласованная система, достижение последовательных и предсказуемых результатов происходит наиболее эффективно и успешно. Система управления качеством состоит из взаимосвязанных процессов, и осознание этого позволяет организациям максимально оптимизировать свою деятельность.

Процессы СМК обогатительного производства

В производстве обогатительных процессов система управления качеством играет важную роль, обеспечивая контроль за процессами обогащения руд и гарантируя соответствие производимой продукции высочайшим стандартам качества. Они также включают меры по обеспечению безопасности труда и охране окружающей среды. Понимание взаимосвязей между всеми этими процессами позволяет оптимизировать систему и обеспечить эффективную работу всего предприятия.

Обогатительное производство относится к процессу обработки и обогащения полезных ископаемых, таких как руды металлов, угля, нефти и газа. Здесь применяются различные технологические процессы, включая физическое и химическое обогащение, флотацию, магнитную сепарацию, гравитационное обогащение, обжиг и др. Физическое обогащение часто используется для удаления нежелательных примесей из руды, например их разделение по размеру или плотности. Химическое обогащение, с другой стороны, включает использование химических реакций для извлечения ценных компонентов из руды. Флотация является широко применяемым процессом, который используется для обогащения руд металлов. Этот метод включает в себя использование реагентов, которые приводят к образованию пены на поверхности руды, позволяя ценным минералам быть отделенными от отходов. Магнитная сепарация используется для извлечения магнитных материалов из руды, таких как железные руды. Гравитационное обогащение включает разделение минералов по плотности при помощи силы тяжести. Обжиг используется для обогащения руд, содержащих ценные компоненты, путем их обработки при высоких температурах. Эти технологические процессы играют важную роль в обогатительном производстве и позволяют извлекать ценные материалы из руды для дальнейшего использования.

Минерально-сырьевой комплекс России – это фундамент экономики страны. Но богатства земли не даются легко. Будущее отрасли связано с освоением месторождений, скрытых в глубинах, сложных для разработки, требующих новых подходов и смелых технологических решений. Глубоко под землей, где сокровища недр ждут своего часа, разгорается битва интеллекта и инноваций. Горно-металлургическая промышленность стоит на пороге новой эры, где успех зависит от способности преодолеть вызовы глубины.

Разработка таких месторождений требует не просто мощной техники, но и глубокого понимания геодинамических и геомеханических процессов, протекающих в недрах. Ученые и инженеры объединяют усилия, чтобы создать технологии, которые позволят безопасно и эффективно извлекать полезные ископаемые из самых недоступных уголков земли. На кону стоит не только экономическое процветание, но и экологическая безопасность. Новые технологии призваны не только повысить эффективность добычи, но и минимизировать воздействие на окружающую среду, сохраняя природное богатство для будущих поколений [7, 8].

Для эффективной работы на заводе или фабрике должно быть налажено управление множеством взаимосвязанных процессов. Процессы СМК – это последовательность действий, которые являются реально совершаемыми и логически завершенными. Эти процессы являются неотъемлемой частью структуры управления. Организация должна определить процессы, необходимые для системы менеджмента качества и их применение во всей организации. Вся мощь горнопромышленного предприятия, словно сложный часовой механизм, сосредоточена в трех ключевых процессах: добыча полезных ископаемых, обогащение и отгрузка и реализация готовой продукции. Это три кита, на которых держится вся отрасль, от глубоких недр до реализации. Добыча – это начальный и важнейший этап в цепи производства. Твердые руды, жидкая нефть, газообразный метан – все это извлекается из недр с помощью мощных технологий, объединяющих человеческий интеллект и силу машин. Это процесс трансформации, где необработанная руда превращается в ценный ресурс. Извлеченная из глубин земли, она поднимается на поверхность, словно новорожденная, чтобы начать свой путь в мире промышленности.

Процесс добычи полезных ископаемых: участие специалистов и горных рабочих, применение различных технических средств и оборудования, использование геологоразведочной информации и разработка горных пород, управление в соответствии с инструкциями, стандартами и планом добычи.

Процесс обогащения полезных ископаемых: разделение ценных минералов от пустой породы, получение готовой продукции или концентрата, использование технических средств и обогатительных установок, управляющие воздействия – инструкции, стандарты, требования клиентов.

Процесс отгрузки и реализации готовой продукции: заключительный этап для полезных ископаемых, определение получаемой прибыли, осуществление персоналом маркетингового отдела и погрузочно-разгрузочных участков, использование погрузочно-разгрузочного оборудования и транспортных средств [4].

В контексте горной промышленности вспомогательные бизнес-процессы играют важную роль в обеспечении эффективной работы предприятий. Один из таких процессов, который занимает центральное место, это «Погрузка и транспортировка полезных ископаемых». Его основная задача заключается в эффективной погрузке и перемещении добытых материалов к пункту отгрузки.

Этот процесс является одним из самых значимых и затратных на горнопромышленных предприятиях. Для его выполнения используется специализированное оборудование и персонал погрузочно-разгрузочных участков (ПРУ). Они отвечают за выполнение задач по погрузке и транспортировке материалов.

Помимо этого, на предприятиях горной промышленности существуют и другие вспомогательные процессы, такие как «Техническое обслуживание» и «Административно-хозяйственная деятельность».

Таким образом, вспомогательные бизнес-процессы на предприятиях горной промышленности, включая «Погрузку и транспортировку полезных ископаемых», играют ключевую роль в обеспечении эффективности и производительности предприятий. Они требуют специализированного оборудования и квалифицированного персонала для успешного выполнения задач [10].

В рамках данного процесса применяются ресурсы, необходимые для обеспечения бесперебойной работы техники, а также добытые ценные ископаемые, полученные на выходе из предшествующего этапа. Этот процесс регулируется стандартами, касающимися расхода сырья и материалов, а также планом загрузки ценных ископаемых. Результатом труда персонала погрузочно-разгрузочных площадок являются отгруженные полезные ископаемые. Для обеспечения информационной поддержки деятельности отправляется отчет о загрузке.

В высокотехнологичных организациях горнодобывающей отрасли управление бизнес-процессами охватывает множество ключевых аспектов, включая «Управление инновациями», «Стратегическое планирование», «Оперативное планирование и управление», «Управление человеческими ресурсами», «Управление информационными ресурсами», «Управление экологией», «Финансовое управление», «Управление улучшениями и изменениями» и др. Взаимодействие этих процессов как внутри организации, так и с внешними факторами может значительно различаться в зависимости от конкретной компании. Поэтому разработка модели бизнес-процессов для типичного горнодобывающего предприятия предполагает объединение управления инновациями и финансами в один общий процесс – «Управление инновациями и финансами».

С учетом вышеизложенного модель бизнес-процессов верхнего уровня типового горнопромышленного предприятия можно представить в следующем виде (рис. 5).

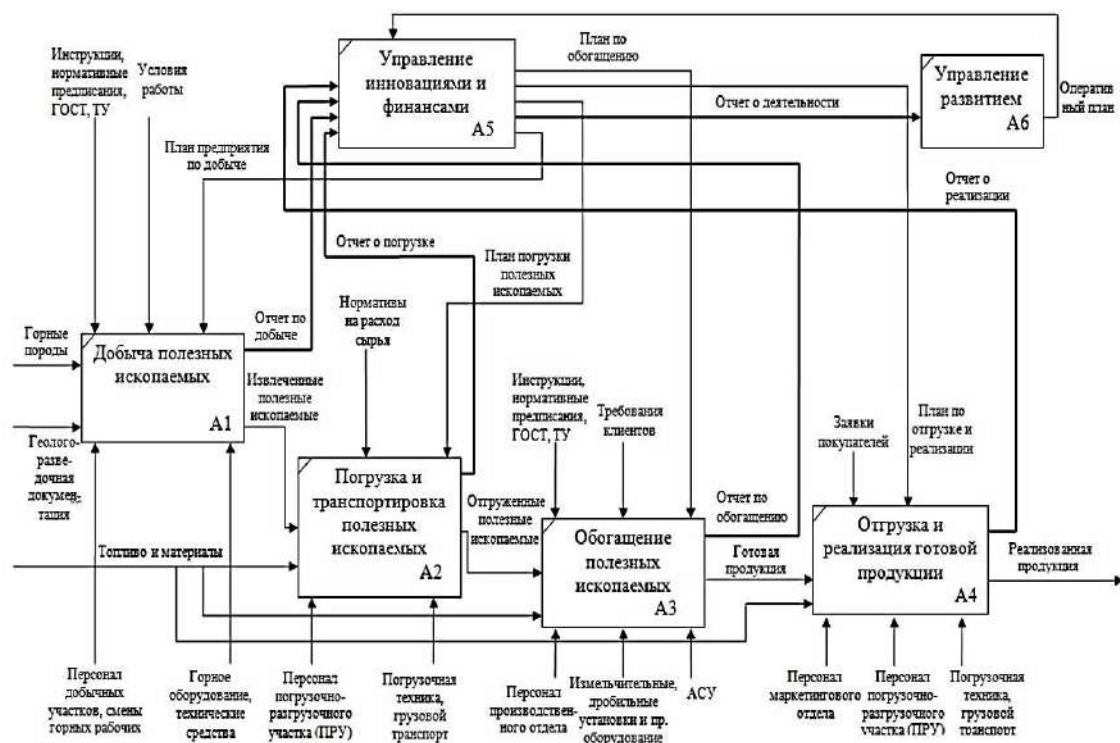


Рис. 5. Модель бизнес-процессов верхнего уровня типового горнопромышленного предприятия

Fig. 5. The model of top-level business processes at a typical mining enterprise

Все технологические звенья горно-обогатительного комплекса работают бесперебойно, даже в условиях, когда становится сложно. В начале цифровизации затрагиваются подсистемы, связанные с проектированием и оценкой промышленных объектов, как новых, так и действующих. Затем системы контроля и учета ресурсов и персонала, включая мониторинг безопасности и оценку состояния здоровья. Последующие этапы – это системы управления транспортом и технологическими процессами. Это позволит значительно увеличить производительность, уменьшить расход топлива и материалов, а также увеличить объем добытой руды на одного работника.

Использование цифровых технологий в процессах обогатительного производства

Исследование раскрывает, что более половины (59%) компаний в горнодобывающей индустрии пока не в полной мере задействовали цифровые технологии в своем производстве. Среди респондентов 26% отметили, что процессы цифровизации только начинают развиваться, в то время как у 33% компаний на данный момент цифровизация затрагивает лишь ключевые аспекты производства. Однако стоит отметить, что интерес к технологиям значителен: 31% предприятий сейчас активно формируют свою цифровую стратегию [9].

Интерес к цифровым технологиям огромен: многие предприятия еще только формируют свои цифровые стратегии, а процессы цифровизации находятся на

начальной стадии. Однако уже сейчас явно видно, что внедрение цифровых инструментов – это долгий и сложный процесс, который однако приносит колоссальные результаты. Одним из ключевых этапов этого процесса является разработка методики оценки результатов с учетом особенностей каждого предприятия.

Один из важнейших факторов успеха в процессе внедрения цифровых проектов – это комплексный подход к оценке планируемых результатов. Кроме того, необходимо обратить внимание на поддержку со стороны высшего руководства компании, информирование персонала о целях цифровизации, их обучение, а также создание системы долгосрочной поддержки и развития цифровых технологий. Все эти элементы совместно способствуют успешной реализации проектов по цифровой трансформации и повышению эффективности бизнес-процессов. Эти факторы играют важную роль в успешной реализации цифровых трансформаций в горнодобывающей отрасли и помогают обеспечить эффективное внедрение инноваций и повышение конкурентоспособности предприятий.

Внедрение цифровых систем и автоматизация делают производственный процесс на обогатительной фабрике эффективнее: с их помощью можно упростить предупреждение внеплановых простоев с помощью тех или иных инструментов бережливого производства и оптимизировать время проведения ремонтов (рис. 6).

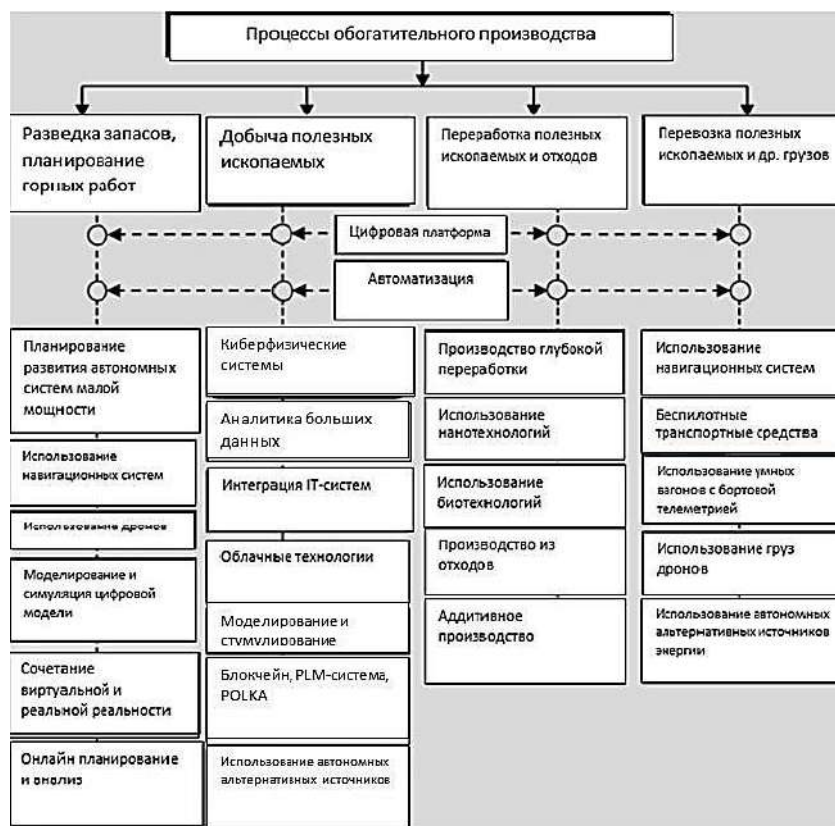


Рис. 6. Использование Цифровой площадки в процессах обогатительного производства

Fig. 6. Use of the Digital Platform in enrichment processes

Кроме того, цифровизация укрепляет рыночные позиции предприятий, позволяя им ускорять выпуск продукции на рынок, повышать ее качество и создавать индивидуальные решения с той же эффективностью, что и при массовом производстве. Таким образом, цифровизация открывает перед предприятиями безграничные возможности для повышения производительности, оптимизации процессов и укрепления своего положения на рынке в условиях динамично меняющейся деловой среды.

Внедрение методик, способных автоматизировать процесс формирования, оптимизации и корректировки технического обслуживания и ремонта оборудования с использованием диаграмм информационного потока в нотации DFD, представляет собой инновационный подход [11]. Для эффективного управления ремонтными работами можно определить критерии ранжирования и классифицировать их по степени важности. Алгоритм разработки и оптимизации графиков ремонтных работ может стать основой для системы поддержки принятия решений, предназначенной для высококвалифицированных специалистов предприятия, и последующей интеграции в существующую информационную систему. Такой подход позволит повысить эффективность и точность принимаемых решений, а также оптимизировать процессы обслуживания и ремонта оборудования.

Заключение

Предложенная статья подтверждает актуальность заявленной цели исследования – модернизации сетцентрической модели управления, имеющей большой потенциал для трансформации обогатительной промышленности. Данная модель управления позволит организациям интегрировать и обмениваться информацией между всеми заинтересованными сторонами в режиме реального времени, позволит повысить эффективность, продуктивность и безопасность, что приводит к достижению цели исследования. Предложенный в статье модернизированный цикл Бойда как комплексный подход к совершенствованию всех элементов системы, включая технологии, процессы и людей, повысит эффективность сетцентрического управления и обеспечит преимущество в конкурентной среде. Перспективы его развития: интеграция с искусственным интеллектом, сочетание с цифровыми технологиями, развитие методов использования цикла Бойда в условиях неопределенности, применение в других сферах, таких как медицина, финансы, логистика и др., где важно быстро принимать решения на основе данных, создание отдельных программных решений, обучение персонала.

Определенным вкладом полученных результатов в исследование в данной сфере следует считать модернизацию цикла Бойда, которая включает в себя использование передовых технологий для улучшения скорости и качества каждого этапа. Внедрение сетцентрического управления при модернизированном

цикле Бойда – это не просто технологический проект. Необходимо проводить грамотную подготовку персонала, выбирать подходящие технологии, создавать инфраструктуру и управлять изменениями, которые неизбежно произойдут в организации.

Внедрение модернизированной сетцентрической модели управления в обогатительной промышленности по сравнению с традиционными методами приведет к таким преимуществам, как: улучшение координации между различными подразделениями, такими как добыча, обогащение и сбыт; оптимизация процессов обогащения; повышение качества продукции за счет более точного контроля над процессами обогащения; повышение безопасности за счет улучшения осведомленности о состоянии оборудования и процессах; повышение эффективности за счет сокращения простоев и повышения производительности, что, несомненно, является отличием данных исследований от иных, близких по тематике.

Кроме того, практическое применение цифровых инструментов позволит собирать данные с различного оборудования и датчиков, а затем анализировать их для выявления потенциальных проблем или улучшения производственных процессов обогатительных фабрик. Отметим, что перспективами развития рассматриваемой тематики является то, что цифровая трансформация поможет в предотвращении аварийных ситуаций, оптимизации энергопотребления, улучшении качества продукции и повышении эффективности производства в целом.

Список источников

1. Каляев И.А., Капустян С.Г., Гайдук А.Р. Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели // Сетевые модели в управлении: сборник статей. М.: Эгвес, 2011. С. 57–89.
2. Федосеев С.А., Столбов В.Ю., Пустовойт К.С. Модель группового управления в сетцентрических производственных системах // Управление в технических, эргатических, организационных и сетевых системах (УТЭОСС – 2012): материалы 5-й Российской мультikonференции по проблемам управления, Санкт-Петербург, 9–11 октября 2012 г. СПб., 2012. С. 1240–1243.
3. Связь цикла Деминга и спираль качества Джурана в задачах развития цикла PDCA и создания сетцентрической системы менеджмента / Федотова А.В., Лончих П.А., Кунаков Е.П., Лончих Н.П. // Качество. Инновации. Образование. 2023. №1. С. 3–10.
4. Сури Р. Время – деньги. Конкурентное преимущество быстрореагирующего производства. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 326 с.
5. Федотова А.В., Лончих П.А. Стадии обнаружения и действия с несоответствующей продукцией на промышленных предприятиях // Байкальская наука: идеи, инновации, инвестиции: сб. ст. по ма-

- тер. всерос. науч.-практ. конф., Иркутск, 10 ноября 2022 г. Иркутск, 2022. С. 61–65.
6. Федотова А.В., Лонцих П.А. Проблемы управления качеством на предприятии // Байкальская наука: идеи, инновации, инвестиции: сб. ст. по матер. всерос. науч.-практ. конф., Иркутск, 10 ноября 2022 г. Иркутск, 2022. С. 98–102.
 7. Канбан и «точно вовремя» на Toyota. Менеджмент начинается на рабочем месте: пер. с англ. М.: Альпина Паблишер, 2016. 214 с.
 8. Уязвимости периметра корпоративных сетей [Электронный ресурс]. <https://www.ptsecurity.com>
 9. Костогрызов А.И. Пути решения некоторых проблем комплексной безопасности методами системной инженерии // ИТ-Стандарт. 2017. № 4 (13). С. 5–12.
 10. ГОСТ 34.601-90. Информационная технология. Автоматизированные системы. Стадии создания. М.: Стандартинформ, 2009.
 11. ISO 9241-220 «Эргономика взаимодействия человек-система. Часть 220. Процессы обеспечения, выполнения и оценки человеко-ориентированного проектирования в организации». <https://gostassistant.ru/doc/6b7b45b7-6861-4ad7-b331-29c9e5f7f426>
- References**
1. Kalyaev I.A., Kapustjan S.G., Gajduk A.R. Self-organizing distributed control systems for groups of intelligent robots based on a network model. *Setevye modeli v upravlenii* [Network models in management]. Moscow: Egves, 2011;57-89. (In Russ.)
 2. Fedoseev S.A., Stolbov V.Yu., Pustovoi K.S. The model of group management in network-centric production systems. *Upravlenie v tekhnicheskikh, ergaticheskikh, organizatsionnykh i setevykh sistemakh* (UTEOSS – 2012): materialy 5-i Rossijskoj multikonferencii po problemam upravleniya [Management in technical, ergatical, organizational and network systems (UTEOSS - 2012): materials of the 5th Russian multiconference on management problems], St. Petersburg, October 9–11, 2012. St. Petersburg, 2012, pp. 1240-1243. (In Russ.)
 3. Fedotova A.V., Lontsikh P.A., Kunakov E.P., Lontsikh N.P., The connection between the Deming cycle and the Juran quality spiral in developing the PDCA cycle and creating a network-centric management system. *Kachestvo. Innovacii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education]. Moscow, 2023;(1):3-10. (In Russ.)
 4. Suri R. *Vremya – dengi. Konkurentnoe preimushchestvo bystroreagiruyushchego proizvodstva* [Time is money. Competitive advantage of fast-response production]. Moscow: BINOM. Knowledge Laboratory, 2014, 326 p. (In Russ.)
 5. Fedotova A.V., Lontsikh P.A. Stages of detecting and dealing with non-conforming products at industrial enterprises. *Bajkalskaya nauka: idei, innovacii, investicii: sb. st. po mater. vseros. nauch.-prakt. konf.* [Baikal science: ideas, innovations, investments. Proceedings of all-Russian scientific and practical conference], Irkutsk, November 10, 2022, pp. 61-65. (In Russ.)
 6. Fedotova A.V., Lontsikh P.A. Problems of quality management at the enterprise. *Bajkalskaya nauka: idei, innovacii, investicii: sb. st. po mater. vseros. nauch.-prakt. konf.* [Baikal science: ideas, innovations, investments. Proceedings of all-Russian scientific and practical conference], Irkutsk, November 10, 2022, pp. 98-102. (In Russ.)
 7. *Kanban i «tochno vovremya» na Toyota. Menedzhment nachinaetsya na rabochem meste* [Kanban and just-in-time at Toyota: Management begins at the workplace]. Moscow: Alpina Publisher, 2016, 214 p. (In Russ.)
 8. *Uyazvimosti perimetra korporativnykh setej* [Vulnerabilities of the perimeter of corporate networks]. Available at: <https://www.ptsecurity.com>
 9. Kostogryzov A.I. Ways to solve some problems of complex security using systems engineering methods. *IT-Standart* [IT-Standard], 2017;4(13):5-12. (In Russ.)
 10. State standard GOST 34.601-90. Information technology. Automated systems. Stages of creation. Moscow: Standardinform, 2009. (In Russ.)
 11. ISO 9241-220 Ergonomika vzaimodejstviya chelovek-sistema. Chast 220. Processy obespecheniya, vypolneniya I ocenki cheloveko-orientirovannogo proektirovaniya v organizacii [Ergonomics of human-system interaction. Part 220. Processes for enabling, implementing and evaluating human-centered design in an organization]. Available at: <https://gostassistant.ru/doc/6b7b45b7-6861-4ad7-b331-29c9e5f7f426>

Поступила 07.05.2024; принята к публикации 30.05.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 07/05/2024; revised 30/05/2024; published 24/12/2024

Лонцих Павел Абрамович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации и управления, Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ), Иркутск, Россия.
Email: palon@list.ru ORCID 0000-0001-7688-3194

Федотова Анжелика Витальевна – ассистент кафедры автоматизации и управления, Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ), Иркутск, Россия.
Email: netsela@mail.ru ORCID 0009-0004-5694-1819

Головина Елена Юрьевна – кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры экономики и цифровых бизнес-технологий,
Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ), Иркутск, Россия.
Email: elena_uspeh@mail.ru ORCID 0000-0002-5215-9289

Лонцих Наталья Павловна – кандидат педагогических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизации и управления,
Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ), Иркутск, Россия.
Email: natalysib@list.ru ORCID 0000-0002-0453-9156

Евлоева Малика Вахаевна – аспирант кафедры автоматизации и управления,
Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ), Иркутск, Россия.
Email: malika-vahaevna2013@yandex.ru ORCID 0000-0009-6842-9642

Pavel A. Lontsikh – DrSc (Eng.), Professor, Department of Automation and Management,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: palon@list.ru ORCID 0000-0001-7688-3194,

Anzhelika V. Fedotova – Assistant, Department of Automation and Management,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: netsela@mail.ru ORCID 0009-0004-5694-1819

Elena Yu. Golovina – PhD (Economics), Associate Professor,
Department of Economics and Digital Business Technology,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: elena_uspeh@mail.ru ORCID 0000-0002-5215-9289

Natalya P. Lontsikh – PhD (Pedagogy), Associate Professor, Department of Automation and Management,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: natalysib@list.ru ORCID 0000-0002-0453-9156

Malika V. Evloeva – Postgraduate student, Department of Automation and Management,
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: malika-vahaevna2013@yandex.ru ORCID 0000-0009-6842-9642

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.7.043
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-163-170



ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ МЕДИ М1 ПОЛИМЕРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ ПОЛИЛАКТИДА PLA

Куликов А.Д.^{1,2}, Бурлаков И.А.^{1,2}, Петров П.А.¹, Полшков П.А.^{1,2}, Деметрашвили И.С.²

¹Московский политехнический университет, Москва, Россия

²ПК «Салют» АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены результаты экспериментального исследования формообразования листового проката меди марки М1 с помощью инструмента из полилактида. Формообразующий инструмент изготавливался из полилактида по экструзионной аддитивной технологии (FFF – Fused Filament Fabrication, послойное наплавление пластика). Выполнен анализ литературных источников и выделены примеры применения инструмента из полимерного материала, изготовленного методом 3D-печати для выполнения различных формообразующих операций обработки давлением, что подчеркивает актуальность вопроса, исследуемого в статье. Исследованы и выбраны оптимальные режимы 3D-печати формообразующего инструмента из полимерного материала, важной особенностью которого является 100%-е заполнение при температуре 3D-печати 210°C. В качестве методов исследования выбраны испытание на сжатие, металлографический метод, метод измерения микротвердости, компьютерное моделирование. Полученные результаты показывают принципиальную возможность выполнения гибки заготовок из меди М1 с применением полимерного инструмента. Моделирование операции гибки программой QForm выполнено по результатам натурного эксперимента; получено хорошее согласование между расчетом и экспериментом. Для компьютерного моделирования выбрана модель материала, позволяющая оценить сопротивление деформации в зависимости от температурно-скоростных условий деформирования, из открытых источников. Исследовано влияние температурно-скоростного режима деформирования образцов меди М1 на эволюцию микроструктуры. Микротвердость по Виккерсу деформированных образцов М1 измерялась при нагрузке на индентор 50 г. Выявлены особенности изменения микротвердости в зависимости от скорости деформации. В заключении статьи приводятся рекомендации о возможности применения штампового инструмента из полилактида для мелко- и среднесерийного производства.

Ключевые слова: медь марки М1, компьютерное моделирование, программа QForm, полилактид PLA, 3D-печать, микроструктура, формообразование, листовая заготовка

© Куликов А.Д., Бурлаков И.А., Петров П.А., Полшков П.А., Деметрашвили И.С., 2024

Для цитирования

Формообразование листовых заготовок из меди М1 полимерным инструментом из полилактида PLA / Куликов А.Д., Бурлаков И.А., Петров П.А., Полшков П.А., Деметрашвили И.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 163-170. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-163-170>



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

SHAPING M1 COPPER SHEET BLANKS USING TOOLS MADE OF POLYLACTIDE PLA

Kulikov A.D.^{1,2}, Burlakov I.A.^{1,2}, Petrov P.A.¹, Polshkov P.A.^{1,2}, Demetrashvili I.S.²

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

² Production Complex Salyut JSC United Engine Corporation, Moscow, Russia

Abstract. The article discusses the results of an experimental study of rolled M1 copper sheets shaping using polylactide tools. The shaping tool was made from polylactide using extrusion additive technology (FFF – Fused Filament Fabrication, layer-by-layer fusion of plastic). An analysis of literary sources was carried out and examples of the use of tools made of polymer material manufactured by 3D printing to perform various shaping operations of pressure processing were highlighted, which emphasizes the relevance of the issue studied in the article. The optimal modes for 3D printing of a shaping tool made of polymer material were studied and selected; an important feature of which is 100% filling at a 3D printing temperature of 210°C. Compression testing, metallographic method, microhardness measurement method, and computer modeling were chosen as research methods. The results obtained show the fundamental possibility of bending blanks made of M1 copper using polymer tools. The bending operation was simulated using the QForm program based on the results of a full-scale experiment; good agreement between calculation and experiment was obtained. For computer modeling, a material model was selected that allows to estimate the deformation resistance depending on the temperature and rate conditions of deformation, from open sources. The influence of the temperature and rate deformation regime of M1 copper samples on the evolution of the microstructure was studied. Microhardness of deformed M1 samples was measured at an indenter load of 50 g according to the Vickers hardness test. Peculiarities of changes in microhardness depending on the deformation rate were revealed. The article concludes with recommendations on the possibility of using polylactide stamping tools for small- and medium-scale production.

Keywords: copper M1, computer modeling, QForm simulation program, PLA polylactide, 3D-printing, microstructure, shaping, metal sheet blank

For citation

Kulikov A.D., Burlakov I.A., Petrov P.A., Polshkov P.A., Demetrashvili I.S. Shaping M1 Copper Sheet Blanks Using Tools Made of Polylactide PLA. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 163-170. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-163-170>

Введение

Детали, полученные листовой штамповкой, занимают важное место в различных отраслях машиностроения, в первую очередь в автомобиле- и авиастроении [1], так как позволяют изготавливать тонкостенные детали, которые зачастую не могут быть получены иным способом. Разнообразные методы штамповки, применение различных по конструкции штампов и использование соответствующих материалов для их изготовления обеспечивают рентабельное производство в условиях как крупного, так и мелкосерийного производства. Однако требуются значительные затраты на изготовление штамповой оснастки, поскольку рынок требует все больше и больше продуктов [2]. С целью снижения стоимости формообразующего инструмента в 70-х годах прошлого столетия были предприняты попытки применения полиуретана в качестве рабочих частей штамповой оснастки в цехах опытного, мелкосерийного и серийного производства [3-5]. Преимуществом таких штампов является простота конструкции и низкая стоимость, составляющая 2-10% от стоимости соответствующих специальных штампов. Как показала

практика, штампы из полиуретана могут быть применены для гибки холодноштамповочных листовых деталей, холодной вытяжки деталей, для раздачи, обжатия, формовки и отбортовки листовых заготовок. Однако этот материал не нашел широкого применения, возможно, вследствие невысокой стойкости и необходимости назначения повышенных припусков при выполнении разделительных операций.

В последнее время появилась информация о применении штамповой оснастки, изготовленной из полилактида (ПЛА) методом 3D-печати. Относительно широкое применение нашел метод 3D-печати, который может быть применен для изготовления инструмента из полилактида для гибки труб диаметром до 28 мм из стали 12X18H10T [6]. Известны разработки и исследования моделированием в программе QForm процесса гибки изделия типа «Улитка» с применением формообразующего инструмента из PLA-пластика [7]. Анализ процесса показал теоретические и практические возможности применения полимерного инструмента для изготовления декоративных деталей из алюминиевого сплава АД31. Имеющиеся литературные данные касаются применения полимерной штам-

повой оснастки для гибочных операций заготовок из мартенситно-старееющей стали DP600 [8], профилирования тонкостенных алюминиевых листов [9], для импульсной штамповки заготовок из алюминиевых листов толщиной 0,5 мм [10]. Анализ отечественной и зарубежной информации позволил установить, что опубликованные материалы касаются преимущественно экспериментальных работ по применению полимерного инструмента. В частности, отсутствуют данные об его эксплуатационной стойкости.

Целью настоящей работы являлось определение возможности применения штампового инструмента из PLA для среднесерийного производства. Для достижения поставленной цели необходимо было выбрать исследуемый деформируемый материал, определить зависимость его сопротивления деформации от термомеханических параметров, осуществить моделирование процесса с целью определения возникающих контактных напряжений, оценить свойства полученных заготовок на уровне микроструктуры металлографическим методом.

Материалы и методы исследования

В качестве исследуемого материала была выбрана медь М1, учитывая, что напряжение текучести технически чистой меди М1 зависит как от величины деформации, так и от ее скорости, в отличие от стальных материалов. В открытых источниках [11] найдены кривые упрочнения меди М1 (рис. 1). Отметим, что для более точной оценки сопротивления деформации меди М1, используемой в данной работе, требуется проведение отдельного исследования, направленного на определение реологических свойств. Однако это выходит за рамки данной статьи.

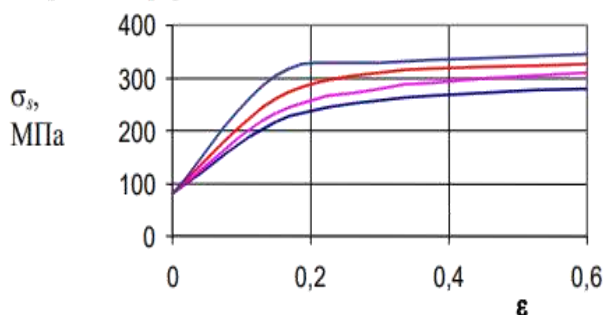


Рис. 1. Кривые упрочнения для меди М1 при комнатной температуре и скоростях деформации, с^{-1} (снизу-вверх): 0,005; 3; 15; 50 [11]

Fig. 1. Hardening diagrams of copper M1 at room temperature and strain rates (bottom-up): 0,005; 3; 15; 50 [11]

Микротвердость материала образцов определяли на приборе «EMCO TEST DuraScan 20» при нагрузке на индентор 50 г.

Для моделирования процесса гибки был применен программный комплекс QForm 10.3.0 [12].

Исходные данные для моделирования:

– обрабатываемый материал – медь М1 с использованием модели сопротивления деформации, показанной на рис. 1;

– материал инструмента – полимерный материал ПЛА;

– температура заготовки – 20°C ;

– температура инструмента – 20°C ;

– фактор трения – 0,8;

– скорость перемещения инструмента – 2 мм/с.

Трехмерная модель штампового блока, изготовленного методом 3D-печати, показана на рис. 2.

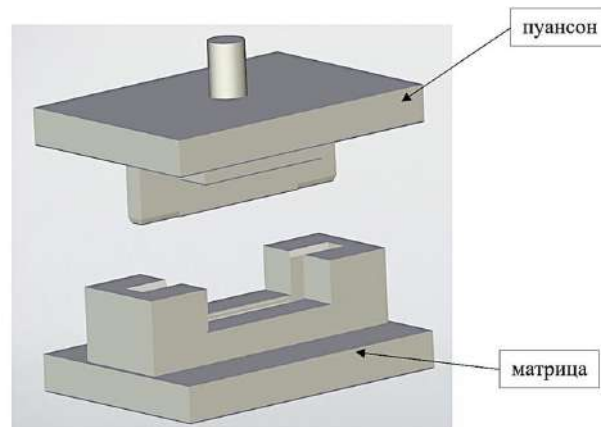


Рис. 2. Трехмерная модель штампового блока
Fig. 2. 3D-model of the stamping unit

В качестве материала для штампового инструмента, изготовленного методом 3D-печати с применением экструзионной технологии FFF (Fused Filament Fabrication) на принтере Raise 3D Pro2 Plus, был выбран полилактид PLA фирмы «ESUN», физико-механические свойства которого представлены в табл. 1. Режим 3D-печати штампового блока представлен в табл. 2. Для достижения максимальной стойкости инструмента был выбран коэффициент заполнения 100% с прямолинейной формой заполнения.

Исходные заготовки для штамповки получали вырубкой в штампе из ленты толщиной 1 мм. Металлографические исследования отштампованных заготовок осуществляли на бинокулярном оптическом микроскопе «Olympus Delta» и «FEI QUANTA 650» с увеличением $\times 500$.

Металлографические исследования эволюции структуры материала заготовок из меди М1 выполнены также на оптическом микроскопе. Для проведения исследования изготавливались цилиндрические образцы размером 10 мм в диаметре и 10 мм высотой. Образцы подвергали сжатию на универсальной испытательной машине модели LFM250 (холодная деформация) и модели LFM50 (теплая деформация, учитывая, что при штамповке наблюдается тепловой эффект пластической деформации). Температура испытаний – 20, 50, 100°C ; скорость деформации при каждой температуре – 0,4, 0,01, $0,001 \text{ с}^{-1}$. Сжатие образцов из меди М1 выполнялось без смазки, и величина

относительной деформации составляла 50%; при тепловой деформации инструмент для сжатия нагревался до температуры испытания, то есть до 50 и 100°C.

Таблица 1. Физико-механические свойства ПЛА
Table 1. Physical and mechanical properties of PLA

Параметр	Значение
Плотность материала	1,25 г/см ³
Температура термдеформации	52°C, 0,45 МПа
Индекс текучести расплава	4 г/10 мин (190 °C/2,16 кг)
Предел прочности	65 МПа
Относительное удлинение при разрыве	12%
Прочность на изгиб	75 МПа
Модуль упругости при изгибе	2102 МПа

Таблица 2. Режимы изготовления образцов
Table 2. Conditions of sample production

Параметр	Значение
Температура сопла, °C	210
Температура рабочего стола, °C	60
Диаметр сопла, мм	0,4
Ширина линии, мм	0,4
Толщина слоя, мм	0,16
Толщина стенки (оболочки), мм	1,2
Обдув, %	100
Ретракт	Да
Плотность заполнения, %	100
Стиль заполнения	Прямолинейный
Поддержки	Нет

Полученные результаты и их обсуждение






Исследование микроструктуры медных заготовок, осажденных на 50% (табл. 3), показало, что изменение температуры в диапазоне 20–100°C и скорости деформации в пределах 0,4, 0,01 и 0,001 с⁻¹ незначительно влияет на ее изменение, и размер зерен остается в пределах 50–500 мкм.

Микротвердость в центре образцов, деформированных при температурах 20, 50 и 100°C, оставалась практически неизменной и находилась в пределах HV0,05 = 122–128. Следует отметить незначительное влияние на микротвердость скорости деформации при температуре 100°C, которая снижается от 122 до 113 единиц с повышением скорости до 0,4 с⁻¹, что можно объяснить некоторым разогревом материала.

Моделирование с применением модели меди M1, показанное на рис. 3, позволило определить, что напряжения в направлении перемещения инструмента (ось Z) составляет от 40 до 150 МПа. Учитывая, что напряжения текучести при сжатии образцов из PLA достигают 100–150 МПа [6], можно ожидать надежную работу пластикового инструмента. Так как температура нагрева заготовок не превышает 40°C, определение зависимости напряжения от величины деформации было проведено для трех температур: 20,

50 и 100°C. Накопленная деформация в расчете не превышает 0,40 с⁻¹, что соответствует относительной деформации цилиндрических образцов, на которых изучалась эволюция микроструктуры (см. табл. 3).

Таблица 3. Микроструктура деформированных на 50% образцов из меди M1
Table 3. Microstructure of 50% deformed M1 copper samples

Микроструктура образца, увеличение ×500	Температура образца, °C	Скорость деформации $\dot{\epsilon}$, с ⁻¹
	20	0,001
	50	0,001
	100	0,001
	100	0,01
	100	0,4

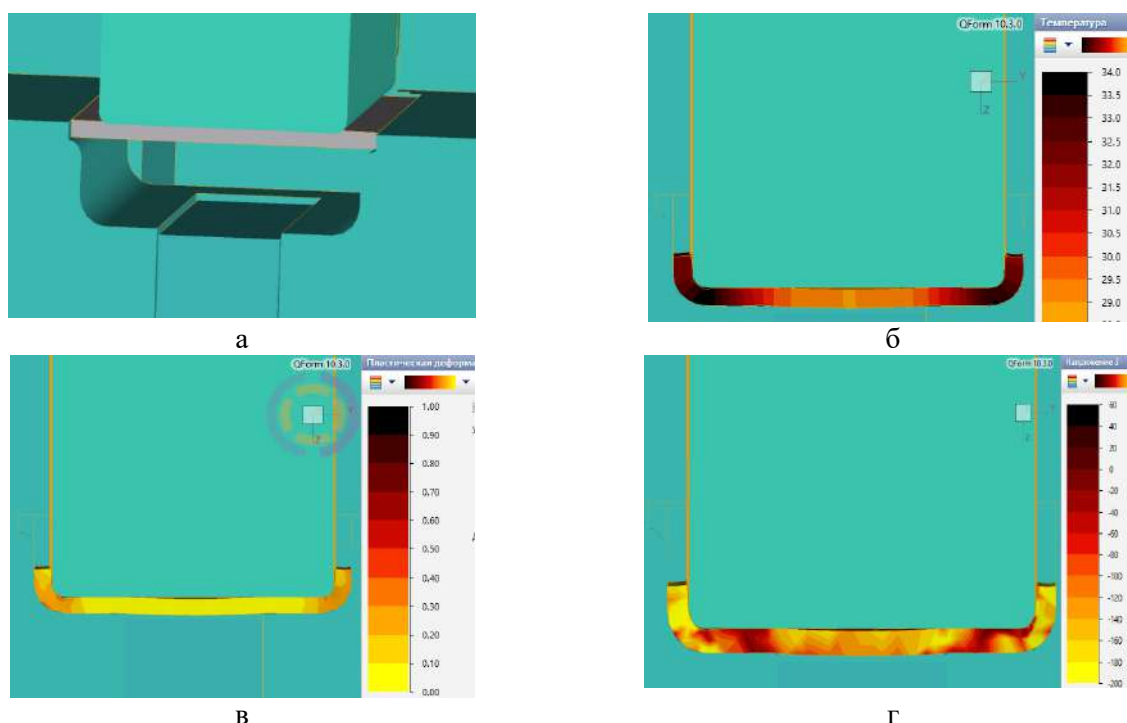


Рис. 3. Моделирование процесса штамповки: а – до деформации; б – после деформации (температура); в – после деформации (величина пластической деформации); г – после деформации (напряжения)
 Fig. 3. Simulation of the stamping process: а is before deformation, б is after deformation (temperature), в is after deformation (plastic deformation), г is after deformation (effective stress)

Разработанная компьютерная модель процесса гибки заготовки из меди М1 в инструменте из ПЛА содержит следующее количество конечных элементов в сетке (табл. 4).

Таблица 4. Количество конечных элементов в сетке для последнего шага расчета процесса гибки

Table 4. Number of finite elements in the mesh for the last calculation step of the bending process

Наименование объекта в модели процесса	Количество приповерхностных элементов	Количество объёмных элементов
Заготовка	17214	45964
Инструмент 1	15584	46759
Инструмент 2	19892	82200
Инструмент 3	1156	2027

Для описания инструмента из ПЛА использовали данные, показанные в табл. 1, и результаты испытаний на сжатия цилиндрических образцов данного полимерного материала, которые после предварительной обработки вводили в базу данных материалов в программе QForm. Таким образом, учитывали поведение инструмента из ПЛА при выполнении гибки металлического материала.

Экспериментальные работы по гибке заготовок из меди М1 проводили с применением штамповой оснастки из ПЛА, установленной на гидравлическом

вытяжном прессе (рис. 4, 5). Контроль геометрических параметров штампованных заготовок осуществляли с помощью универсального мерительного инструмента. Точность измерения составляла $\pm 0,1$ мм. Исходные заготовки и заготовки после штамповки показаны на рис. 6.



Рис. 4. Гидравлический пресс с установленной штамповой оснасткой из ПЛА

Fig. 4. Hydraulic press with the stamping unit made of PLA



Рис. 5. Штамповая оснастка из ПЛА (укрупненно)
Fig. 5. Stamping unit made of PLA (magnified)



а



б

Рис. 6. Заготовки до штамповки (а) и после деформации (б)
Fig. 6. Blanks before stamping (a) and after deformation (б)

Качество выпущенных деталей соответствовало требованиям чертежа, а геометрические размеры деталей находились в пределах допуска, установленного чертежом. Несмотря на высокие расчетные напряжения, возникающие в процессе формообразования, заметный износ инструмента замечен не был, что было подтверждено стабильными геометрическими параметрами изготовленных деталей. Величина пружинения заготовок при штамповке была близка к расчетной, полученной моделированием.

К геометрическим параметрам отштампованных заготовок предъявляются высокие требования по геометрической точности и шероховатости поверхности. Выполненные исследования позволили установить, что, несмотря на высокие контактные напряжения, возникающие в процессе деформации заготовок, гибочный инструмент из полилактида PLA обеспечивает изготовление заготовок с требуемыми геометри-

ческими параметрами, что позволяет рекомендовать его для более широкого применения в листостамповочном производстве.

Заключение

1. Анализ напряженно-деформированного процесса, выполненный с применением программного комплекса QForm 10.3.0, позволил определить, что напряжения в направлении перемещения инструмента (ось Z) составляют от 40 до 150 МПа. Учитывая, что напряжение текучести полимерного материала ПЛА составляет 100–150 МПа, можно ожидать надежную работу полимерного инструмента.

2. Исследование микроструктуры показало, что изменение температуры в диапазоне 20–100°C и скорости деформации в пределах 0,4, 0,01 и 0,001 с⁻¹ незначительно влияет на ее изменение; размер зерен остается в пределах 50–500 мкм, что позволяет не

учитывать эволюцию микроструктуры меди при ее деформировании при моделировании процесс гибки.

3. Микротвердость в центре образцов, деформированных при температурах 20, 50 и 100°C, оставалась практически неизменной и находилась в пределах 122–128 HV0,05. Следует отметить незначительное влияние на микротвердость скорости деформации при температуре 100°C, которая снижается от 122 до 113 единиц с повышением скорости до 0,4 с⁻¹, что можно объяснить небольшим разогревом материала.

4. Выполненные исследования позволили установить, что, несмотря на предполагаемые высокие контактные напряжения при гибке, возникающие в процессе деформации заготовок, гибочный инструмент из полимерного материала ПЛА обеспечивает удовлетворительную стойкость, что позволяет рекомендовать его для более широкого применения в листоштамповочном производстве. Например, мелко- и среднесерийном производстве изделий гибкой из листового проката меди М1 толщиной 1 мм.

Список источников

1. Development of a framework for the flexibility assessment of automotive production concepts / Kampker A., Bergweiler G., Hollah A., Bickendorf P., Hoffmann F. // *Procedia CIRP*. 2019, no. 81, pp. 34-39.
2. Агеев Н.П., Данилин Г.А., Огородников В.П. Вытяжка в штампах полых тонкостенных деталей машино- и приборостроения: в 2 ч. Тверь: Герс, 1997-1998. Ч. 1: Механические основы процесса вытяжки. 1997. 336 с. Ч. 2: Проектирование технологических процессов. 1998. 257 с.
3. Ходырев В.А. Проектирование, изготовление и эксплуатация штампов с полиуретаном. Пермь: Кн. изд-во, 1975. 365 с.
4. Шелухин А.С. Исследование процесса вытяжки эластичной матрицей с политропическим регулированием давления: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1971. 21 с.
5. РД 37.002.0490-86. Конструирование штампов листовой штамповки. М.: НПО «НИИТавтопром», 1987. 4.1-2.
6. Повышение прочности формообразующего инструмента из полилактида PLA методом закалки / Полшков П.А., Бурлаков И.А., Петров П.А., Сапрыкин Б.Ю. // *Станкоинструмент*. 2023. № 1. С. 58-65.
7. Звонов С.Ю. Разработка и исследование моделированием в программе QForm процесса гибки изделия типа «Улитка» на инструменте из PLA-пластика // *QForm Форум «Моделирование процессов штамповки, прокатки и прессования в QForm»*. М., 2023.
8. Nader Asnafi et al. Design and Validation of 3D-Printed Tools for Stamping of DP600 // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019.
9. Aksenov L.B., Kononov I.Y. 3D Printed Plastic Tool for Al Thin-Sheet Forming // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019 (337). (In Russ.)
10. Lasse Langstädtler et al. Rapid Tooling for Impulse Forming. <https://www.researchgate.net/publication/350858236> (дата обращения: 19.01.2024).
11. Логинов Ю.Н. Медь и деформируемые медные сплавы: учеб. пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. 136 с.
12. Руководство пользователя системы QForm (в электронном виде). ООО «КванторФорм», 2019. <https://www.qform3d.ru/> (дата обращения: 19.01.2024).

References

1. Kampker A, Bergweiler G, Hollah A, Bickendorf P, Hoffmann F. Development of a framework for the flexibility assessment of automotive production concepts. *Procedia CIRP*, 2019 (81):34-39.
2. Ageev N.P., Danilin G.A., Ogorodnikov V.P. *Vityajka v shtampah polih tonkostennih detalei mashino- i priborostroeniya: v 2 ch.* [Stretching in dies of hollow thin-walled parts of mechanical and device engineering]. Tver, 1997-1998. (In Russ.)
3. Hodyrev V.A. *Proektirovanie, izgotovlenie i ekspluatatsiya shtampov s poliuretanom* [Design, manufacture and operation of polyurethane dies]. 1975, 365 p. (In Russ.)
4. Shelukhin A.S. *Issledovanie processa vytyazhki elastichnoj matricej s politropicheskim regulirovaniem davleniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Study of the stretching process with an elastic die with polytropic regulation pressure. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Moscow, 1971, 1971. 21 p.
5. *Konstruirovaniye shtampov listovoy shtampovki* [Construction of dies for sheet-metal forming]. RD, no. 37.002.0490-86, 1987.
6. Polshkov P.A., Burlakov I.A., Petrov P.A., Saprykin B.Yu. *Povysheniye prochnosti formoobrazuyushchego instrumenta iz polilaktida PLA metodom zakalki* [Increasing the strength of PLA polylactide molding tools by hardening method]. *Stankoinstrument* [Machin tools], 2023;(1):58-65. (In Russ.)
7. Zvonov S.Yu. *Razrabotka i issledovanie modelirovaniem v programme QForm processa gibki izdeliya tipa "Ulitka" na instrumente iz PLA-plastika* [Development and research of bending process of "Snail" type product on PLA-plastic tool by modeling in QForm program]. *QForm Forum "Modelirovaniye processov shtampovki, prokatki i pressovaniya v QForm"* [QForm Forum "Modeling of stamping, rolling and pressing processes in QForm"]. Moscow, 2023. (In Russ.)
8. Nader Asnafi et al. Design and Validation of 3D-Printed Tools for Stamping of DP600. 2019 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*

9. Aksenov L.B., Kononov I.Y. 3D Printed Plastic Tool for Al Thin-Sheet Forming. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2019 (337).
10. Lasse Langstädtler et al. Rapid Tooling for Impulse Forming. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/350858236> (Accessed January 19, 2024).
11. Loginov Yu.N. *Med' i deformiruemye mednye splavy: uchebnoe posobie* [Copper and deformable copper alloys: textbook]. Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2004, 136 p. (In Russ.)
12. *Rukovodstvo polzovatelya sistemy QForm (v elektronnom vide)* [QForm System User Manual (electronic)], OOO "KvantorForm" [QuantorForm Ltd.], 2019. Available at: <https://www.qform3d.ru/> (Accessed January 19, 2024).

Поступила 16.04.2024; принята к публикации 01.07.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 16/04/2023; revised 01/07/2024; published 24/12/2024

Куликов Алексей Дмитриевич – аспирант, заместитель начальника цеха по подготовке производства, Московский политехнический университет, Москва, Россия;
ПК «Салют» АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия.
Email: a.kulikov@uecrus.com. ORCID 0009-0000-3849-0023

Бурлаков Игорь Андреевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор, главный специалист, Московский политехнический университет, Москва, Россия;
ПК «Салют» АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия.
Email: iaburlakov@gmail.com. ORCID 0000-0002-9427-0217

Петров Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, доцент, Московский политехнический университет, Москва, Россия.
Email: petrov_p@mail.ru. ORCID 0000-0001-5541-5690

Полшков Павел Анатольевич – аспирант, начальник технологического бюро, Московский политехнический университет, Москва, Россия;
ПК «Салют» АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия.
Email: p.polshkov@uecrus.com. ORCID 0000-0004-7504-6000

Деметрашвили Ирина Сергеевна – инженер-технолог 2-й категории, ПК «Салют» АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия.
Email: i.demetrashvili@uecrus.com. ORCID 0009-0002-2363-0198

Aleksei D. Kulikov – Postgraduate student, Deputy Head of the Workshop, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia;
Production complex Salyut JSC United Engine Corporation, Moscow, Russia.
Email: a.kulikov@uecrus.com. ORCID 0009-0000-3849-0023

Igor A. Burlakov – DrSc (Eng.), Senior Researcher, Professor, Chief Specialist, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia;
Production complex Salyut JSC United engine corporation, Moscow, Russia.
Email: iaburlakov@gmail.com. ORCID 0000-0002-9427-0217

Pavel A. Petrov – PhD (Eng.), Associate Professor, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.
Email: petrov_p@mail.ru. ORCID 0000-0001-5541-5690

Pavel A. Polshkov – Postgraduate student, Head of the Bureau, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia;
Production complex Salyut JSC United engine corporation, Moscow, Russia.
Email: p.polshkov@uecrus.com. ORCID 0000-0004-7504-6000

Irina S. Demetrashvili – Process engineer, Production complex Salyut JSC United engine corporation, Moscow, Russia.
Email: i.demetrashvili@uecrus.com. ORCID 0009-0002-2363-0198



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 620.17
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-171-180

ОЦЕНКА И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ ДЕГРАДАЦИИ СПЛАВА НП-30ХГСА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ WAAM С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТОВОЙ МОДЕЛИ

Аносов М.С., Манцеров С.А., Клочкова Н.С., Михайлов А.М.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Аддитивные технологии, такие как 3D-печать, становятся все более актуальными в современном мире. Они позволяют создавать сложные изделия и конструкции, которые ранее было трудно или даже невозможно изготовить с использованием традиционных методов производства. При этом технология WAAM представляет собой важное направление в развитии аддитивного производства металлических изделий и имеет высокую актуальность в современной промышленности. При изготовлении деталей методом WAAM крайне важно знать их остаточный ресурс, который во многом определяется усталостными свойствами материала. **Цель работы.** Разработать способ диагностирования конструкционных сталей, полученных методом 3D-печати электродуговой наплавкой. **Используемые методы.** Методы неразрушающего контроля и машинного обучения. **Новизна.** Предложенный метод диагностики структурной деградации является новым подходом к контролю состояния деталей из сплава НП-30ХГСА. Использование нейросетовых моделей для анализа данных о структуре сплава позволяет получить более точные результаты по сравнению с традиционными методами диагностики. Это даёт возможность более эффективно контролировать состояние деталей из сплава НП-30ХГСА и своевременно выявлять признаки структурной деградации. **Результат.** В данной работе исследованы процессы накопления структурной поврежденности в сплаве 30ХГСА при испытаниях на усталость. Наиболее выраженные структурные трансформации происходят при значениях относительного удлинения свыше 7%. **Практическая значимость.** Оценка и диагностика структурной деградации сплава НП-30ХГСА, изготовленного с использованием технологии WAAM и анализированного с помощью нейросетовой модели, представляет собой ключевой инструмент, способствующий обеспечению высокого качества производимых деталей. Это также позволяет повысить надежность конструкций и совершенствовать производственные процессы.

Ключевые слова: металлы, механические свойства, нейронносетовое моделирование, сплав НП-30ХГСА, 3D-печать, WAAM, новые структуры металлов, заданные свойства, усталостные свойства

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSWE-2023-0008).

© Аносов М.С., Манцеров С.А., Клочкова Н.С., Михайлов А.М., 2024

Для цитирования

Оценка и диагностирование структурной деградации сплава НП-30ХГСА, полученного методом WAAM с использованием нейросетовой модели / Аносов М.С., Манцеров С.А., Клочкова Н.С., Михайлов А.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 171-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-171-180>



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

ASSESSMENT AND DIAGNOSIS OF STRUCTURAL DEGRADATION OF NP-30HGSA ALLOY OBTAINED BY WAAM USING A NEURAL NETWORK MODEL

Anosov M.S., Mantserov S.A., Klochkova N.S., Mikhailov A.M.

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

Abstract. Problem Statement (Relevance). Additive technologies such as 3D printing are becoming increasingly relevant in the modern world. They allow to create complex products that were previously difficult or even impossible to manufacture using traditional production methods. At the same time, WAAM technology represents an important direction in the development of additive manufacturing of metal products and is highly relevant in modern industry. When manufacturing parts using the WAAM method, it is extremely important to know their residual life, which is largely determined by the fatigue properties of the material. **Objectives.** It is required to develop a method for diagnosing structural steels obtained by 3D printing with electric arc surfacing. **Methods Applied.** Methods of non-destructive testing and machine learning. **Originality.** The proposed method for diagnosing structural degradation is a new approach to monitoring the condition of parts made of NP-30HGSA alloy. The use of neural network models for analyzing data on the alloy structure allows to obtain more accurate results compared with traditional diagnostic methods. This makes it possible to more effectively monitor the condition of parts made of NP-30HGSA alloy and timely identify signs of structural degradation. **Result.** In this paper, the processes of accumulation of structural damage in alloy 30HGSA during fatigue tests are investigated. The most pronounced structural transformations occur at values of relative elongation above 7%. **Practical Relevance.** Assessment and diagnostics of structural degradation of NP-30CrHSA alloy manufactured using WAAM technology and analyzed using a neural network model is a key tool to ensure high quality of manufactured parts. It also makes it possible to increase the reliability of structures and improve production processes.

Keywords: metals, mechanical properties, neural network modeling, NP-30HGSA alloy, 3D printing, WAAM, new metal structures, preset properties, fatigue properties

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FSWE-2023-0008).

For citation

Anosov M.S., Mantserov S.A., Klochkova N.S., Mikhailov A.M. Assessment and Diagnosis of Structural Degradation of NP-30HGSA Alloy Obtained by Waam Using a Neural Network Model. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 171-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-171-180>

Введение

В последнее время наблюдается активный рост аддитивных технологий в области производства. Это объясняется возможностью аддитивных технологий создавать изделия практически любой сложности посредством послойной печати из 3D-модели, включая детали с комплексной геометрией [1]. Однако некоторые методы, такие как лазерное спекание металлических порошков, обладают определенными недостатками, включая пониженные механические характеристики и нестабильность структуры [2]. В данной работе исследуется технология аддитивного электродугового выращивания (WAAM), которая позволяет преодолеть большинство из этих ограничений [3, 4].

Увеличение надежности технических систем, особенно содержащих компоненты, произведенные с использованием WAAM и эксплуатирующиеся в экстремальных условиях, достигается за счет тщательного выбора материала, метода производства, параметров печати и диагностики в процессе эксплуатации.

Важной характеристикой материалов для изделий, работающих в тяжелых условиях, являются механические свойства, в частности усталостные характеристики, которые определяют остаточный ресурс деталей в критических узлах механизмов и конструкций.

Наиболее эффективным и надежным методом оценки остаточного ресурса изделий является метод прямого анализа микроструктурных изменений в рабочих зонах деталей машин с использованием количественных показателей микроструктуры [5].

Для обработки большого объема разнообразной диагностической информации применяются нейронные сети.

В связи с этим данное исследование направлено на решение такой проблемы, как отсутствие методики диагностики конструкционных сталей, произведенных с помощью 3D-печати электродуговой наплавкой, применяя техники неразрушающего контроля и машинного обучения.

Материалы и методы исследования

Для изучения процессов деформации и разрушения при пластическом деформировании в качестве материала исследования выбран широко используемый сплав НП-30ХГСА. Этот сплав часто применяется для наплавки и сварки, в частности, при восстановлении обжимных прокатных валков, крановых колес и различных деталей машин, которые подвергаются динамическим нагрузкам (работы проводятся как под слоем флюса, так и в среде защитных газов) ($\sigma_b = \text{более } 520 \text{ МПа}$). Защитный газ, используемый при наплавке, – CO_2 .

Экспериментальные образцы были изготовлены с использованием метода WAAM на специально оборудованном стенде [6].

Режимы печати исследуемого материала определялись экспериментальным путем по параметрам микроструктуры и механическим свойствам на образцах металлов, полученных на различных режимах [7]. Режимы печати: сила сварочного тока $I = 160 \text{ А}$, напряжение сварки $U = 24 \text{ В}$, скорость перемещения при наплавке $V = 150 \text{ мм/мин}$ для сплава 30ХГСА, дуговой зазор составлял при этом 11 мм.

Из наплавленных стенок после механической обработки были вырезаны образцы для проведения испытаний на растяжение и усталость. Испытания проводились как в продольном, так и в поперечном направлении относительно направления наплавки (рис. 1).

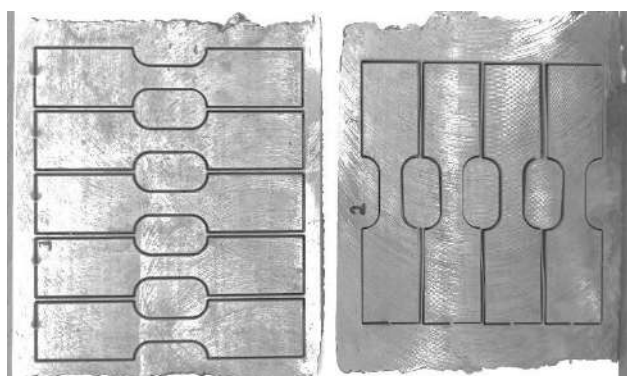


Рис. 1. Образцы для исследований
Fig. 1. Samples for research

Для количественной оценки процессов деформации и разрушения сплава 30ХГСА использовали портативный металлографический микроскоп «ЛАБАКС-1К», установленный на специальном приспособлении с фокусировкой в рабочей зоне образца (рис. 2). Изображения микроструктуры рабочей зоны образца на каждом этапе нагружения подвергались обработке с использованием специализированного программного обеспечения, обеспечивающего выравнивание яркости исходного изображения и устранения помех [8, 9].

На каждом этапе испытания было получено порядка 100 фотографий микроструктур.



Рис. 2. Фотография экспериментального стенда
Fig. 2. Photo of the experimental stand

Для оценки наработки материала образца и его остаточного ресурса производился расчет ряда количественных показателей микроструктуры [10, 11]. К числу таких показателей относятся:

1. Фрактальная размерность отцифрованной фотографии микроструктуры.

Для расчета фрактальной размерности изображения микроструктуры D_F обработанное изображение покрывали прямоугольной сеткой с размером ячейки e (диапазон величин ячеек выбирали исходя из среднего размера зерна металла d от $0,01d$ до d). После этого подсчитывали количество ячеек N , содержащих границу или фрагмент полосы скольжения, а также дефекта. Фрактальная размерность определялась по уравнению линии регрессии, имеющей вид

$$\log(N) = D_F \cdot \log(1/e) + C, \quad (1)$$

где C – коэффициент линии регрессии.

Подробно методика оценки фрактальной размерности описана в работе [5].

Для оценки интенсивности накопления структурных повреждений на отдельных участках рабочей зоны образца, как показали проведенные ранее исследования, можно использовать показатель приращения фрактальной размерности:

$$\Delta D_F = D_{F_{\text{тек.}}} - D_{F_{\text{исх.}}}, \quad (2)$$

где $D_{F_{\text{тек.}}}$ и $D_{F_{\text{исх.}}}$ – показатель фрактальной размерности участка изображения микроструктуры рабочей зоны образца в рассматриваемый момент времени и в исходном состоянии (до проведения испытания) соответственно.

2. Концентрация полос скольжения и дефектов в материале.

3. Относительная площадь дефектов микроструктуры и полос скольжения, возникших в ходе нагружения.

4. Дополнительно для анализа структурной поврежденности вместе с другими информативными показателями может применяться измерение микротвердости. Исследования микротвердости проводились в зоне наибольших напряжений с использованием микротвердомера ИТВ-1-АМ при нагрузке в 1 кгс.

Для расчета количественных показателей фотографии микроструктуры были смещены и повернуты относительно начального изображения, соответствующего исходному состоянию материала. Смещение и поворот с шагом 1 пиксель проводились до появления максимального контраста текущего изображения с исходным. Для выявления структурных изменений проводилось вычитание массива бинаризованных изображений, соответствующих разной наработке, из массива данных, соответствующего начальному состоянию материала. После этого концентрацию полос скольжения и дефектов в материале n , мм^{-2} , рассчитывали с использованием функционала MATLAB по следующей зависимости:

$$n = \frac{N_{\text{деф}}}{F_{\text{м}}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{деф}}$ – количество полос скольжения и дефектов на анализируемом изображении микроструктуры; $F_{\text{м}}$ – фактическая площадь анализируемой микроструктуры.

Также после предварительной обработки определялась относительная площадь образовавшихся в процессе усталостного нагружения дефектов микроструктуры и полос скольжения $F_{\text{отн}}$ по следующей зависимости:

$$F_{\text{отн}} = \frac{F_{\text{деф}}}{F_{\text{м}}}, \quad (4)$$

где $F_{\text{деф}}$ – площадь полос скольжения и дефектов на анализируемом изображении микроструктуры, мм^2 .

Отличительной особенностью фрактальной размерности является то, что она характеризует степень заполнения пространства, в которой существует фрактальная система. Большшему значению фрактальной размерности соответствует большая степень заполнения изображения (его трехмерного представления). Так, для совершенно черного изображения фрактальная размерность $D = 2$, то есть будет совпадать с топологической размерностью плоскости.

Полученные результаты и их обсуждение

Были получены следующие результаты экспериментальных исследований образцов из исследуемого сплава: образцы, вырезанные вдоль направления наплавки, демонстрируют большие значения предела текучести $\sigma_{0,2}$ и способны выдерживать большую де-

формацию δ , в сравнении с образцом, вырезанным поперечно направлению наплавки.

Также были изучены изменения микротвердости образцов из стали 30ХГСА, изготовленных по технологии WAAM, в процессе пластической деформации. Результаты измерений микротвердости представлены на рис. 3.

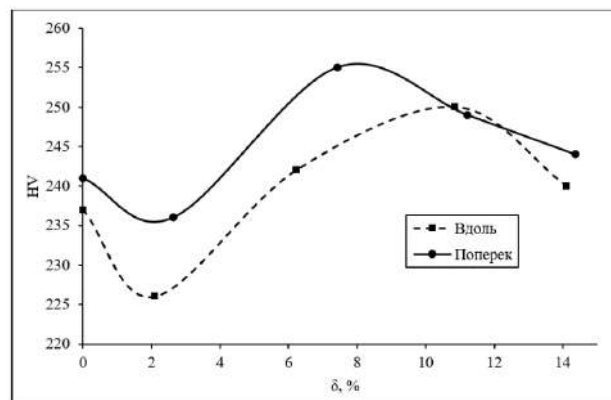


Рис. 3. График зависимости микротвердости от степени деформации для образцов из стали 30ХГСА

Fig. 3. Graph of the dependence of microhardness on the degree of deformation for 30HGSA steel samples

В процессе эксперимента было выявлено, что начальное снижение твердости в ходе деформирования связано с нейтрализацией сжимающих структурных и термических напряжений, возникших во время наплавки образцов методом WAAM. Последующее повышение твердости обусловлено усилением деформационных процессов, таких как значительный наклеп и увеличение плотности дислокаций. Когда степень деформации превышает 8% для образца, вырезанного поперек направления наплавки, наблюдается постоянное снижение микротвердости, что указывает на начало разрушения материала образца. Этот процесс сопровождается формированием и развитием систем микротрещин, ведущих к появлению несплошностей. С увеличением деформации эти несплошности сливаются, что приводит к формированию макротрещин в объеме материала. Это наблюдение хорошо коррелирует с микроструктурными исследованиями. Аналогичные процессы происходят и в образце, вырезанном вдоль направления наплавки, где микротвердость начинает уменьшаться, когда степень деформации достигает более 10%.

Эволюция микроструктуры образцов из стали 30ХГСА, изготовленных методом WAAM и вырезанных вдоль и поперек направления наплавки, представлена на рис. 4 и 5 соответственно.

Анализ микроструктур, полученных после поэтапного деформирования, показывает, что уже на ранних этапах деформации заметно появление многочисленных устойчивых полос скольжения внутри отдельных ферритных зерен, проявляющихся в виде

тонких линий. В процессе пластической деформации энергия тратится не только на накопление микродефектов, но и на формирование текстуры деформации, что ведёт к ограниченному повороту и фрагментации зерен. Вдоль грубых полос скольжения, которые представляют собой экструзии, формируются интрузии – микротрещины. Эти микротрещины становятся источником макротрещин, формирующихся на поверхности и в приповерхностном слое, простирающемся на несколько размеров зерен. Это особенно заметно на образце, вырезанном поперек направления наплавки, как показано на **рис. 5, в, г**.

Результаты фрактального анализа изображений микроструктур представлены на **рис. 6**.

Изменение концентрации и относительной площади дефектов микроструктуры и полос скольжения, которые возникли во время нагружения в зависимости от относительного удлинения образца δ , представлено на **рис. 7 и 8** соответственно.

При растяжении может рассматриваться линейная модель накопления поврежденности, прямо пропорциональная относительному удлинению. Анализируя полученные зависимости количественных характеристик микроструктуры (см. **рис. 6–8**), можно отметить, что в процессе увеличения относительного удлинения образца наблюдается снижение фрактальной размерности изображения микроструктуры в рабочей зоне, а также увеличение как общего количества дефектов в материале, так и их относительной площади в анализируемом изображении. Наиболее заметные структурные изменения происходят при значениях относительного удлинения более 7%. Стоит отметить, что полученные зависимости практически не отличаются для образцов, полученных вдоль и поперек относительно направления наплавки.

Одним из наиболее перспективных методов обработки большого количества разнородной диагностической информации (изображения, числовые ряды и т.д.) являются методы машинного обучения.

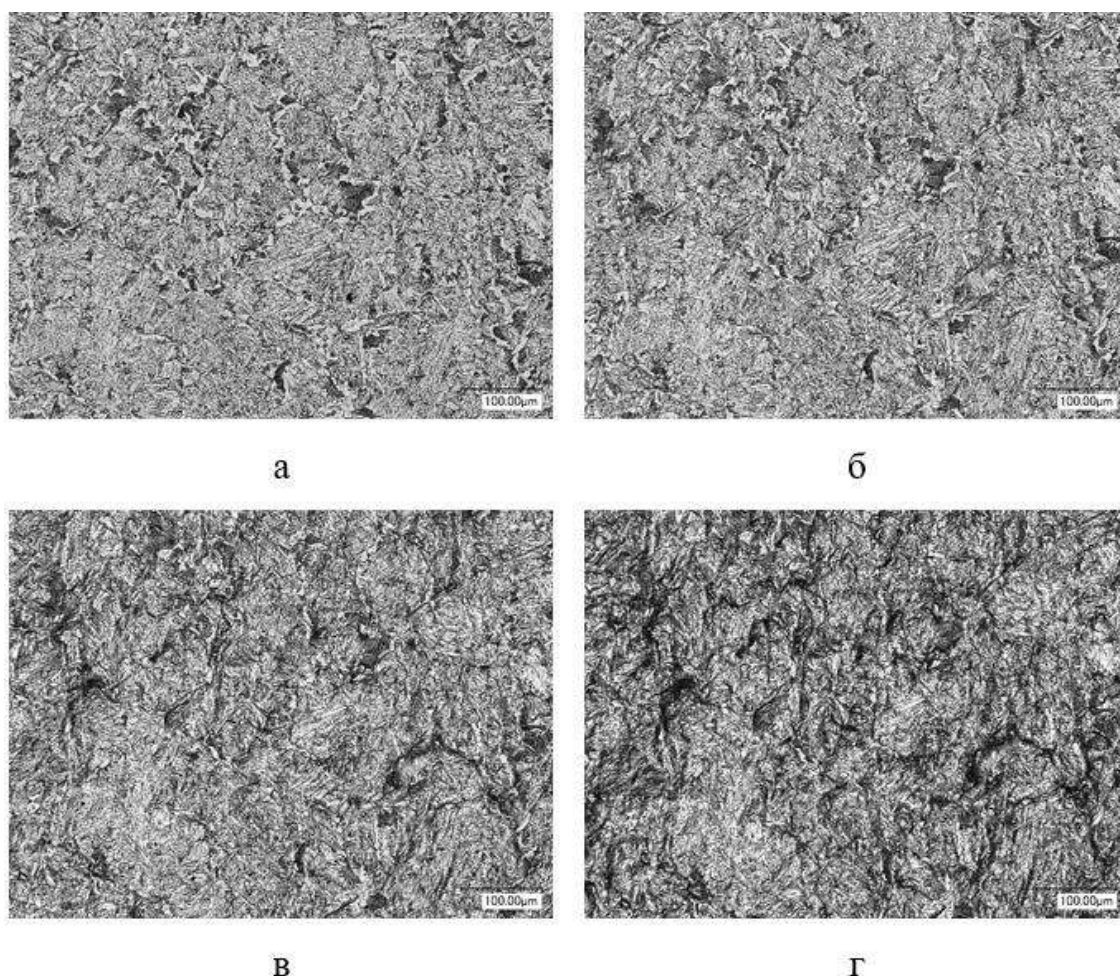


Рис. 4. Структурные изменения продольно вырезанного образца из стали 30ХГСА в процессе поэтапного растяжения, $\times 500$: а – относительное удлинение 0%; б – относительное удлинение 2,6%; в – относительное удлинение 7,4%; г – относительное удлинение 11,2%

Fig. 4. Structural changes of a longitudinally cut 30KHGSA steel sample in the process of stretching ($\times 500$): а is elongation 0%; б is elongation 2.6%; в is elongation 7.4%; г is elongation 11.2%

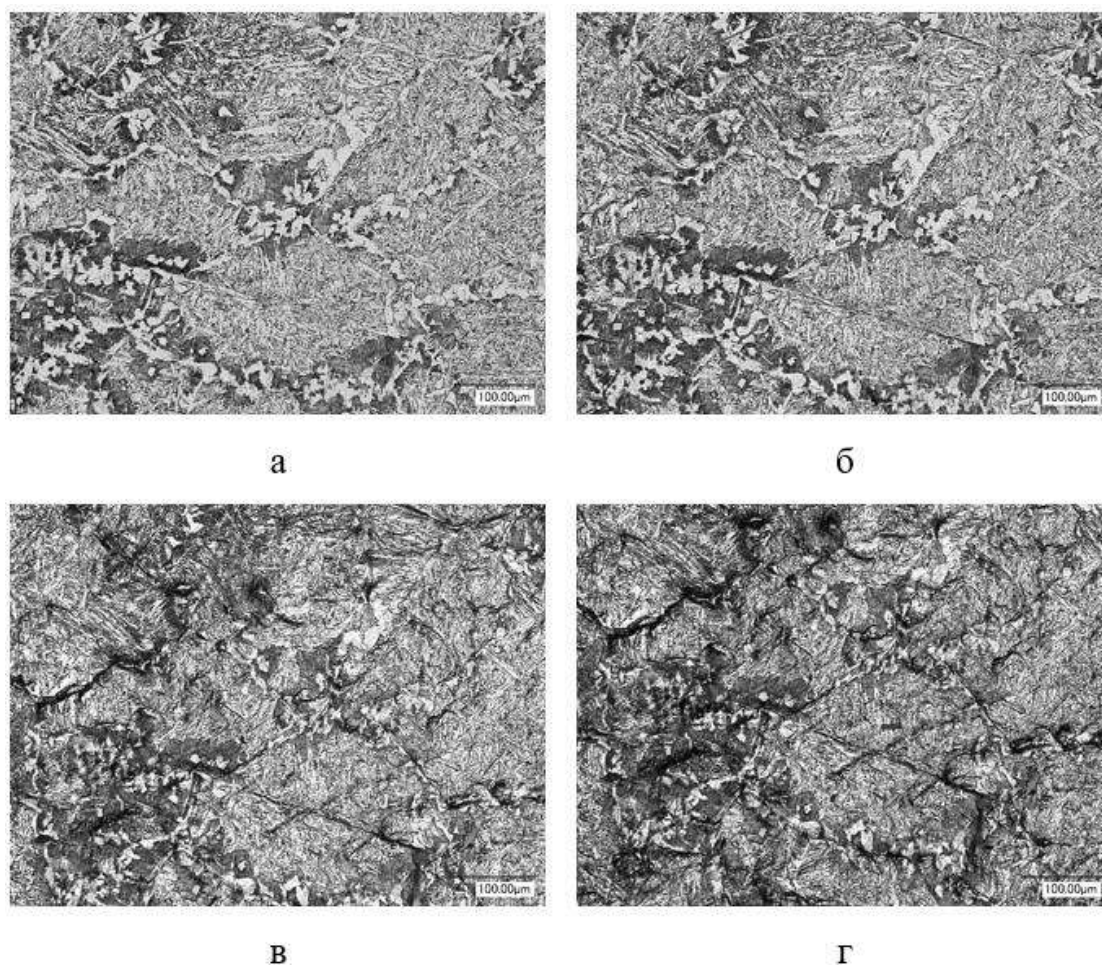


Рис. 5. Структурные изменения поперечно вырезанного образца из стали 30ХГСА в процессе поэтапного растяжения, $\times 500$: а – относительное удлинение 0%; б – относительное удлинение 2,1; в – относительное удлинение 6,23%; г – относительное удлинение 10,86%

Fig. 5. Structural changes of a cross-cut sample made of 30KHGSA steel in the process of stretching ($\times 500$): a is elongation 0%; б is elongation 2.1; в is elongation 6.23%; г is elongation 10.86%

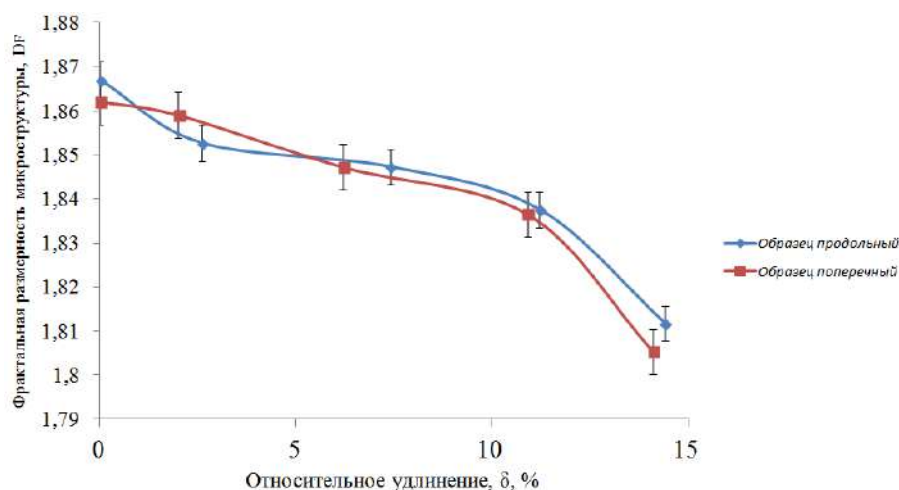


Рис. 6. График изменения фрактальной размерности изображения микроструктур сплава 30ХГСА в процессе испытаний на растяжение

Fig. 6. Graph of changes in the fractal dimension of the 30KHGSA alloy microstructures image during tensile testing

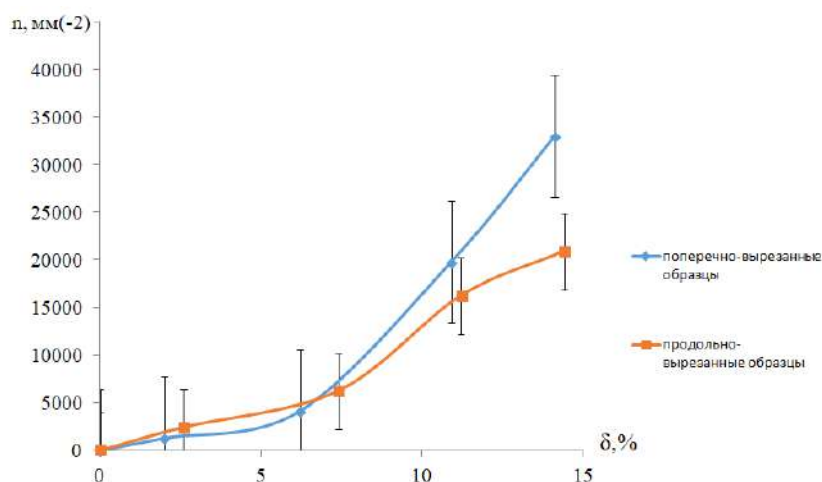


Рис. 7. Изменение концентрации полос скольжения и дефектов в материале n от относительного удлинения образца δ

Fig. 7. The change in the concentration of slip bands and defects in the material n from the elongation of the sample δ

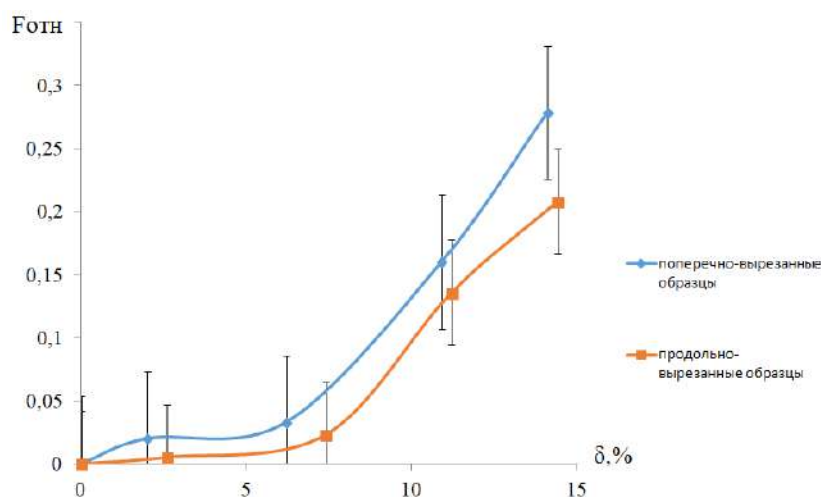


Рис. 8. Изменение относительной площади образовавшихся в процессе нагружения дефектов микроструктуры $F_{отн}$ и полос скольжения от относительного удлинения образца δ

Fig. 8. Change in the area of defects in the structure of the $F_{отн}$ and sliding bands formed during stressing from the elongation of the sample δ

Моделирование с использованием методов машинного обучения

С прогрессом искусственного интеллекта в исследовании диагностирования технических объектов были введены различные методы машинного обучения. Для решения поставленной нами задачи применялись искусственные нейронные сети.

Учитывая взаимную корреляцию количественных параметров микроструктуры (см. рис. 6–8), для разработанной нами модели достаточно использовать или один из параметров изображения микроструктуры, или же непосредственно само изображение микроструктуры на входе нейросетевой модели для его классификации. Исследования показали, что наибольшую точ-

ность имеет нейросетевая модель, на входе которой используется изображение микроструктуры, которое проходило предварительную обработку и фильтрацию, а также параметры испытания, такие как температура испытания и максимальное напряжение в цикле, а на выходе нейросетевой модели был получен показатель поврежденности материала, изменяющийся от 0 до 1 (рис. 9). В исходном состоянии материала данный показатель был равен 0, после появления магистральной трещины в рабочем сечении значение данного параметра было равно 1.

Программа для расчета количественных показателей микроструктуры и прогнозирования поврежденности разработана в среде LabView на основе приведенного алгоритма (рис. 10).

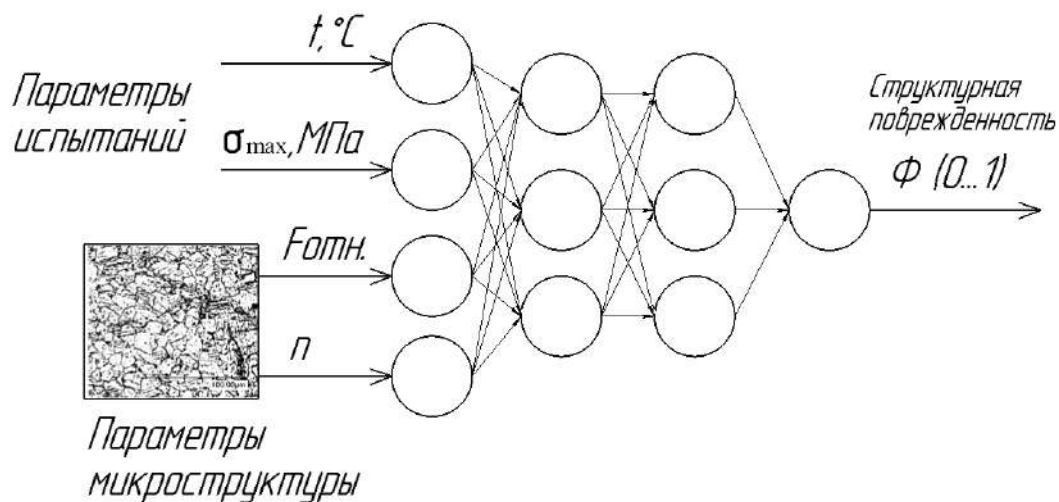


Рис. 9. Структура нейронной сети для оценки поврежденности материала по параметрам микроструктуры
 Fig. 9. The structure of the neural network for assessing the damage of the material according to the parameters of the microstructure

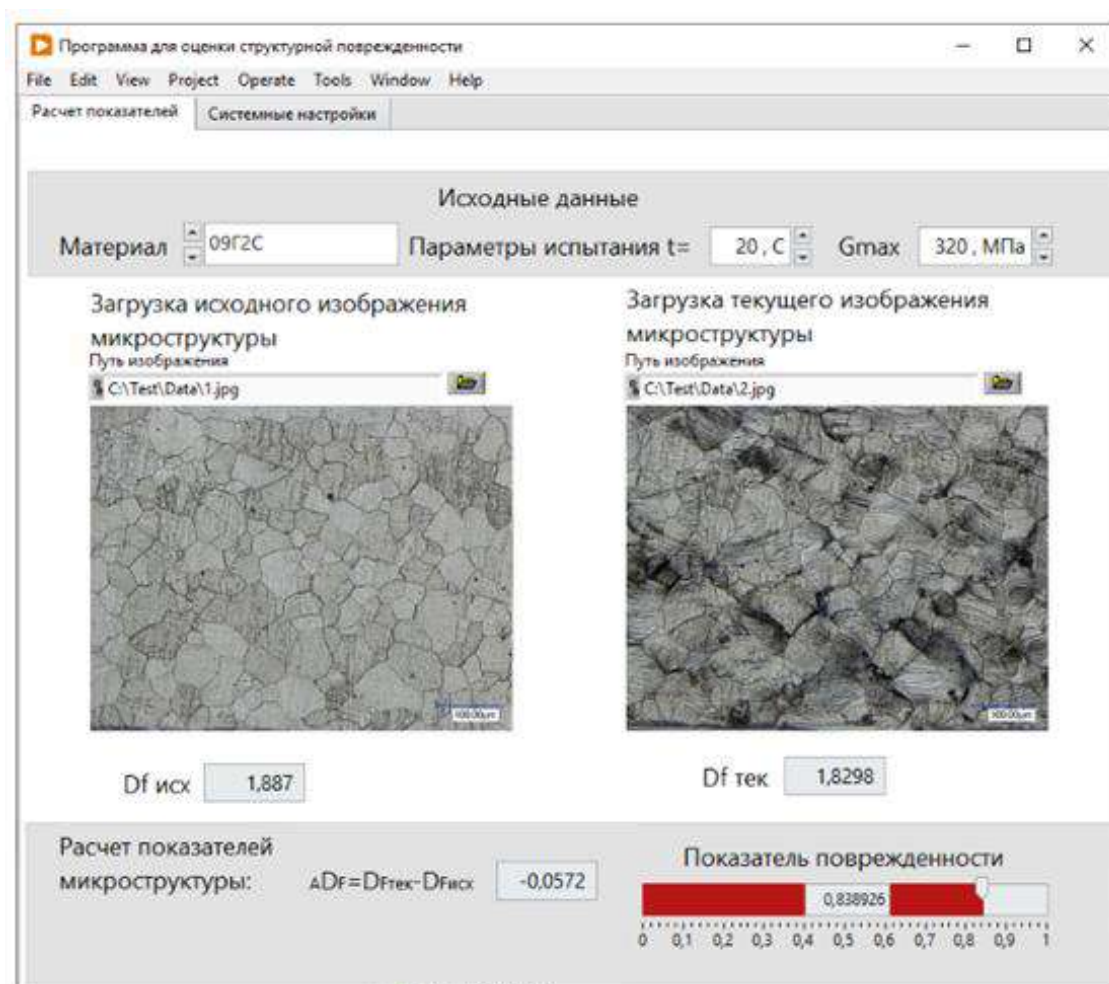


Рис. 10. Интерфейс программы для оценки показателей микроструктуры структурной поврежденности
 Fig. 10. The program interface for evaluating microstructure indicators of structural damage

Полученная нейросетевая модель проходила обучение на 11 классах с поврежденностью материала примерно равной 0, 0,1, 0,2, ..., 1. Время обучения полученной нейросетевой модели составило порядка трех минут. Точность распознавания поврежденности по изображениям микроструктур, полученным по результатам тестирования модели, составили порядка 94%.

Заключение

Таким образом, в данной работе было произведено экспериментальное исследование накопления структурной поврежденности в сплаве 30ХГСА при испытаниях на усталость. Получены экспериментальные зависимости значений фрактальной размерности изображения микроструктуры, количества и относительной площади дефектов в микроструктуре. Установлено, что в качестве диагностического параметра нейросетевой модели оценки поврежденности могут быть использованы непосредственно изображения микроструктур с различной наработкой. Точность распознавания поврежденности по разработанной искусственной нейронной сети составила порядка 94%.

Список источников

1. Scaffold characteristics, fabrication methods, and biomaterials for the bone tissue engineering / J.-W. Jang, K.-E. Min, C. Kim, J. Shin, J. Lee, S. Yi // *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2023, vol. 24, pp. 511–529.
2. Zivkovic M., Zujovic M., Milosevic J. Architectural 3D-printed structures created using artificial intelligence: a review of techniques and applications // *Appl. Sci.* 2023, vol. 13(19), 10671.
3. Технологическое обеспечение параметров качества синтезируемой WAAM-методом детали управлением траекторией движения фидстока / А.В. Киричек, А.Г. Сергеев, С.О. Федонина, Д.И. Петрешин // *Транспортное машиностроение*. 2022. №4 (4). С. 60-68.
4. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А.А. Осолков, Е.В. Матвеев, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников, Е.Л. Кротова // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2018. Т. 20, № 3. С. 90-105.
5. Исследование малоциклового усталости стали 12Х18Н10Т на основе подходов фрактального анализа и искусственного интеллекта / А.А. Хлыбов, Ю.Г. Кабалдин, М.С. Аносов, Д.А. Рябов, Д.А. Шатагин // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2021. Т. 87. № 9. С. 59-67.
6. Diagnostics of 3D printing on a CNC machine by machine learning / Kabaldin Y.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kolchin P.V., Kiselev A.V. // *Russian Engineering Research*. 2021, vol. 41, no. 4, pp. 320-324.
7. Структурообразование сплава Нп-30ХГСА при аддитивном электродуговом выращивании / Аносов М.С., Шатагин Д.А., Чернигин М.А., Мордовина Ю.С., Аносова Е.С. // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2023. Т. 66. № 3. С. 294-301.
8. Digital Destination Matching: Practices, Priorities and Predictions / Cooper M., Camprubi R., Koc E., Buckley R. // *Sustainability*. 2021, vol. 13(19), 10540.
9. Kim V.A., Mokritskii B.Y., Morozova A.V. Multifractal analysis of microstructures after laser treatment of steels // *Solid State Phenomena*. 2020, vol. 299SS, pp. 926-932.
10. Hinojosa M., Trejo V., Ortiz U. Fractal Analysis of the Microstructure of Aisi 304 Steel // *MRS Proceedings*. 1995, vol. 407, pp. 411-416.
11. Манцеров С.А., Аносов М.С., Итальянцев Д.С. Диагностика структурной поврежденности стали 09Г2С, полученной с использованием технологии WAAM при малоциклового усталости на основе нейро-нечеткой классификации // *Морской вестник*. 2023. № 2 (86). С. 32-36.

References

1. J.-W. Jang, K.-E. Min, C. Kim, J. Shin, J. Lee, S. Yi, Scaffold characteristics, fabrication methods, and biomaterials for the bone tissue engineering. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2023;24:511-529.
2. Zivkovic M., Zujovic M., Milosevic J. Architectural 3D-printed structures created using artificial intelligence: a review of techniques and applications. *Appl. Sci.* 2023;13(19):10671.
3. Kirichek A.V., Sergeev A.G., Fedonina S.O., Petreshin D.I. Technological provision of quality parameters of a part synthesized by the WAAM method by controlling the trajectory of the feedstock movement. *Transportnoe mashinostroenie* [Transport engineering], 2022;(4):66–68. (In Russ.)
4. Oskolkov A.A., Matveev E.V., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N., Krotova E.L. Advanced technologies for additive manufacturing of metal product. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science], 2018;20(3):90-105. (In Russ.)
5. Khlybov A.A., Kabaldin Yu.G., Anosov M.S., Ryabov D.A., Shatagin D.A. Investigation of low-cycle fatigue of steel 12X18H10T based on the approaches of fractal analysis and artificial intelligence. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory Laboratory. Diagnostics of materials], 2021;87(9):59-67. (In Russ.)
6. Kabaldin Y.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kolchin P.V., Kiselev A.V. Diagnostics of 3D printing on a CNC machine by machine learning. *Russian Engineering Research*. 2021;41(4):320-324.
7. Anosov M.S., Shatagin D.A., Chernigin M.A., Morodovina Yu.S., Anosova E.S., Structure formation of Np-30HGSA alloy during additive electric arc cultivation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy], 2023;66(3):294-301. (In Russ.)

8. Cooper M., Camprubi R., Koc E., Buckley R., Digital Destination Matching: Practices, Priorities and Predictions. *Sustainability*. 2021;13(19):10540.
9. Kim V.A., Mokritskii B.Y., Morozova A.V. Multifractal analysis of microstructures after laser treatment of steels. *Solid State Phenomena*. 2020;299SS:926-932.
10. Hinojosa, M., Trejo, V., Ortiz, U. Fractal Analysis of the Microstructure of Aisi 304 Steel. *MRS Proceedings*. 1995;(407):411-416.
11. Manzerov S.A., Anosov M.S., Italians D.S. Diagnostics of structural damage of steel 09G2C obtained using WAAM technology for low-cycle fatigue based on neuro-fuzzy classification. *Morskoy Vestnik* [The Marine Bulletin], 2023;2(86):32-36. (In Russ.)

Поступила 03.06.2024; принята к публикации 11.07.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 03/06/2024; revised 11/07/2024; published 24/12/2024

Аносов Максим Сергеевич – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332

Манцеров Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: mca_9@nntu.ru. ORCID 0000-0001-8458-8259

Клочкова Наталья Сергеевна – ассистент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: klockovanatasha@gmail.com. ORCID 0000-0001-9745-2326

Михайлов Александр Михайлович – учебный мастер,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: miksaleks@bk.ru. ORCID 0000-0002-7971-9274

Maxim S. Anosov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: anosov-maksim@list.ru. ORCID 0000-0001-8150-9332

Sergey A. Mancerov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: mca_9@nntu.ru. ORCID 0000-0001-8458-8259

Natalya S. Klochkova – Assistant,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: klockovanatasha@gmail.com. ORCID 0000-0001-9745-2326

Aleksandr M. Mikhailov – Training Master,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email address: miksaleks@bk.ru . ORCHID 0000-0002-7971-9274