

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова

2024. Т.22, №2

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

Издается с марта 2003 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольцев (Россия)

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

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор О.Н. Тулупов

Первый заместитель главного редактора
М.А. Полякова

Заместители главного редактора:
А.Г. Корчунов, О.С. Логунова,
Н.Н. Орехова, В.Р. Храмшин

Редактор Н.П. Боярова

Технический редактор А.А. Нерода

Перевод на английский О.Е. Сухих

Дизайн обложки: А.Д. Григорьев

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 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 27.06.2024. Заказ 157. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2024. Vol.22, no.2

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

PUBLISHED SINCE MARCH, 2003

EDITORIAL BOARD MEMBERS

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

M. Dabala' (Italy), R.O. Dusane (India),
H. Dyja (Poland), Ye Feng (China),
S.E. Gavrishev (Russia), V.E. Gromov (Russia),
J. Grum (Slovenia), I.G. Gun (Russia),
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),
R. Kawalla (Germany), V.R. Khramshin (Russia),
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia),
D. Milovanovic (Serbia), K. Mori (Japan),
I. Musirin (Malaysia), A.B. Naizabekov (Kazakhstan),
N.N. Orekhova, M. Pietrzyk (Poland), R. Qin (UK),
V.F. Rashnikov (Russia), G.A. Rogerson (UK),
V.M. Schastlivtsev (Russia), O.N. Tulupov (Russia),
J.-B. Vogt (France)

EDITORIAL STAFF

Editor-in-Chief O.N. Tulupov

First Deputy Chief Editor M.A. Polyakova

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

Editor N.P. Boyarova

Technical Editor A.A. Neroda

Translated into English O.E. Sukhikh

The cover is designed by A.D. Grigorev

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 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: 27.06.2024. Order 157. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ	5
<i>Заляднов В.Ю.</i> Оценка устойчивости функционирования горнотехнической системы открытой геотехнологии на основе интегрального показателя горных возможностей.....	5
<i>Чебан А.Ю.</i> Ресурсосберегающая технология формирования отвалов с использованием модернизированного отвалообразователя.....	14
<i>Иванов Е.А.</i> Контроль нарушенных площадей земной поверхности при подземной разработке месторождения	22
<i>Курочкин А.И., Габбасов Б.М., Подболотов С.В., Усов И.Г., Пикалов В.А., Гавришев С.Е.</i> Повышение эффективности работы подъемных машин, эксплуатируемых на больших глубинах проходки стволов и при добыче полезных ископаемых.....	33
<i>Черских О.И., Минаков В.С., Довженко А.С.</i> Оценка подготовленности условий для автотранспортирования на угольном разрезе	41
<i>Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н.</i> Обоснование связи предельной толщины межфазной пленки со скольжением жидкости	49
<i>Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю.</i> Современное состояние и направления совершенствования процессов разделения суспензий продуктов обогащения углей с применением флокулянтов.....	58
<i>Иванов А.Г.</i> Способы опрессовки эксплуатационных колонн технологических скважин скважинного подземного выщелачивания урана	71
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ	79
<i>Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Захаров А.В.</i> Вещественный состав шлаков производства пудлингового железа (на примере Верхнесыертского завода, Средний Урал).....	79
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.....	88
<i>Сергеев Ю.С., Платов С.И., Сергеев С.В., Гузеев В.И., Пузанков М.С., Шадрин П.А., Козлов А.В.</i> Применение поляризационно-оптического метода для оценки деформационных и силовых характеристик при проникании лезвий инструмента в упруговязкопластичные материалы.....	88
<i>Нгуен Хыу Хай, Зайдес С.А.</i> Определение рациональных режимов реверсивного выглаживания цилиндрических деталей машин	101

CONTENTS

SUBSOIL USE	5
<i>Zalyadnov V.Yu.</i> Assessing Sustainability of the Operation of the Mining System of Open Geotechnology Based on an Integral Indicator of Mining Capabilities.....	5
<i>Cheban A.Yu.</i> Resource-Saving Technology for Dump Formation Using a Modernized Spreader	14
<i>Ivanov E.A.</i> Monitoring of Disturbed Areas of the Earth Surface During Underground Mining	22
<i>Kurochkin A.I., Gabbasov B.M., Podbolotov S.V., Usov I.G., Pikalov V.A., Gavrishev S.E.</i> Increasing Efficiency of Performance of Hoisting Units Operating at Great Depths of Shaft Sinking and in Mining Operations	33
<i>Cherskikh O.I., Minakov V.S., Dovzhenok A.S.</i> Assessment of Preparedness of Conditions for Transportation at the Opencast Coal Mine	41
<i>Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Gorlova O.E., Orekhova N.N.</i> Providing a Rationale for the Relationship Between Limit Interfacial Film Thickness and Slip of Liquid.....	49
<i>Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu.</i> Current State and Areas of Improving Separation Processes for Suspensions of Coal Enrichment Products Using Flocculants	58
<i>Ivanov A.G.</i> Pressure Testing Methods for Production Strings of Process Wells of Uranium In-Situ Leaching	71
METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS.....	79
<i>Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Zakharov A.V.</i> A Material Composition of Puddling Slags (Using the Example of the Verkhnesyertsy Plant, The Middle Urals).....	79
MATERIAL PROCESS ENGINEERING	88
<i>Sergeev Yu.S., Platov S.I., Sergeev S.V., Guzeev V.I., Puzankov M.S., Shadrin P.A., Kozlov A.V.</i> Application of a Polarization Optical Method for Assessing Deformation and Force Characteristics when Cutting Tool Edges Penetrate Elastoviscoplastic Materials.....	88
<i>Nguyen Huu Hai, Zaides S.A.</i> Determination of Rational Reverse Burnishing Modes for Cylindrical Machine Parts.....	101

<i>Дерябин И.П., Токарев А.С.</i> Экспериментальное исследование адекватности математической модели расчета увода осей отверстий при обработке двузубыми зенкерами	111	<i>Deryabin I.P., Tokarev A.S.</i> An Experimental Study on the Adequacy of a Mathematical Model for Calculating the Deflection of the Axes of Holes when Machining with Two Flute Countersinks	111
<i>Петров П.А., Бурлаков И.А., Нгуен Хань Тоан, Во Фан Тхань Дат</i> Получение гибридных заготовок из титанового сплава ОТ4-1 горячей осадкой с кручением	120	<i>Petrov P.A., Burlakov I.A., Nguyen Khanh Toan, Vo Phan Thanh Dat</i> Producing Hybrid Workpieces from Titanium Alloy OT4-1 by Hot Upsetting with Torsion	120
<i>Пашков А.Е., Пашков А.А., Исаченко А.С., Дук А.А., Рыбак А.М.</i> Исследование процесса посадки крупногабаритных монолитных панелей	128	<i>Pashkov A.E., Pashkov A.A., Isachenko A.S., Duk A.A., Rybak A.M.</i> Study on a Fitting Process of Large-Sized Monolithic Panels	128
<i>Рогов Е.Ю., Овсянников В.Е., Кулемина А.А., Ковенский И.М.</i> Некоторые аспекты технологического обеспечения качества посадок подшипников качения	139	<i>Rogov E.Yu., Ovsyannikov V.E., Kulemina A.A., Kovenskii I.M.</i> Some Aspects of Process Quality Assurance of Roller Bearing Fit	139
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА	145	PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT	145
<i>Голубчик Э.М., Полякова М.А.</i> Развитие адаптивных принципов управления качеством металлопродукции	145	<i>Golubchik E.M., Polyakova M.A.</i> Development of Adaptive Principles of Metal Products Quality Management	145
<i>Антипова Т.Н., Бабкин Д.С.</i> Обоснование структуры информационного обеспечения системы управления качеством металломатричных слоистых композиционных материалов с заданными потребительскими свойствами	153	<i>Antipova T.N., Babkin D.S.</i> Providing a Rationale for the Structure of Information Support for the Quality Management System of Metal Matrix Layered Composite Materials with Specific Consumer Properties	153
<i>Хомяков Н.В.</i> Концепция виртуального контроля качества деталей при аддитивном производстве на основе цифрового двойника	163	<i>Khomyakov N.V.</i> A Concept of Part Quality Virtual Control in Additive Manufacturing Based on a Digital Twin	163
<i>Лонцих П.А., Головина Е.Ю., Лонцих Н.П., Лившиц И.И.</i> Методы и инструменты управления рисками на высокотехнологичном машиностроительном предприятии, оснащенном виброактивным оборудованием	170	<i>Lontsikh P.A., Golovina E.Yu., Lontsikh N.P., Livshits I.I.</i> Methods and Tools of Risk Management at a High-Tech Machine-Building Enterprise with Vibration Active Equipment	170
<i>Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Жижка В.Н., Логунова Т.В., Шайхулина Н.В., Азаров А.П.</i> Практическая реализация метода интегративной оценки качества технического устройства на примере сталеразливочного ковша, эксплуатируемого на опасном производственном объекте металлургического предприятия	181	<i>Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Zhizhka V.N., Logunova T.V., Shaikhulina N.V., Azarov A.P.</i> Practical Implementation of the Integrative Assessment Method for the Quality of Technical Equipment Using the Example of a Steel Ladle Operated at a Hazardous Production Facility of a Metallurgical Enterprise	181
<i>Макаева А.Р., Денисова Я.В.</i> Применение методов менеджмента качества для анализа проблем процедуры аккредитации испытательной лаборатории	190	<i>Makaeva A.R., Denisova Ya.V.</i> Application of Quality Management Methods to Analyze the Problems of the Accreditation Procedure of the Testing Laboratory	190



ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРНТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОТКРЫТОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ГОРНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Заляднов В.Ю.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В статье представлены положения концепции повышения комплексности освоения участка недр и устойчивости функционирования горнодобывающего предприятия с открытой геотехнологией. Предлагаемая концепция базируется на подходе к обоснованию, выбору и управлению параметрами горнотехнической системы, заключающемся в развитии различных направлений освоения имеющейся и формируемой ресурсной базы участка недр, включая его производственную инфраструктуру. Обеспечение устойчивости функционирования горнотехнической системы в условиях постоянно изменяющейся конъюнктуры рынка предусматривается на основе гибкого изменения объема вовлекаемых в разработку запасов, производительности, качества и номенклатуры выпускаемой продукции, представленной в том числе техногенными георесурсами, а также в виде выполнения технологических процессов для сторонних предприятий. **Цель работы.** Обоснование показателя, позволяющего определять эффективность комплексного освоения участка недр и устойчивость функционирования горнодобывающего предприятия в динамичных условиях рынка при выборе параметров горнотехнической системы. **Используемые методы.** В работе применен комплексный метод исследований, включающий: анализ и научное обобщение отечественного и зарубежного опыта эффективного освоения участка недр при использовании открытой геотехнологии с формированием и освоением техногенных георесурсов; имитационное моделирование параметров разработки месторождения с учетом формирования и освоения техногенных георесурсов; статистическую обработку результатов исследований; системный технико-экономический и структурно-функциональный анализ. **Результат.** Для оценки комплексности освоения участка недр и устойчивости функционирования горнотехнической системы предложен интегральный показатель 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 выполнение услуг сторонними предприятиями в зависимости от внешних и внутренних факторов развития горнотехнической системы.

Ключевые слова: устойчивость функционирования и производственная мощность горного предприятия, продукция горного предприятия, техногенные георесурсы, параметры горнотехнической системы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-10040, <https://rscf.ru/project/23-21-10040>.

© Заляднов В.Ю., 2024

Для цитирования

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. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-5-13>



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

ASSESSING SUSTAINABILITY OF THE OPERATION OF THE MINING SYSTEM OF OPEN GEOTECHNOLOGY BASED ON AN INTEGRAL INDICATOR OF MINING CAPABILITIES

Zalyadnov V.Yu.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The article presents the provisions of the concept of increasing an integrated approach to developing a subsoil site and sustainability of the operation of a mining enterprise with open geotechnology. The proposed concept is based on an approach to providing rationale, selecting and controlling the parameters of a mining system. It consists in the development of various areas for the exploration of the existing and emerging resource base of a subsoil site, including its production infrastructure. Ensuring sustainability of the operation of the mining system in the conditions of constantly changing market conditions is provided on the basis of flexible changes in the volume of reserves involved in the exploration, performance, quality and range of products, including man-made georesources, as well as by performing technological processes for third-party enterprises. **Objectives.** The research is aimed at providing a rationale for an indicator used to determine efficiency of the integrated exploration of a subsoil site and sustainability of the functioning of a mining enterprise in dynamic market conditions, when choosing the parameters of a mining system. **Methods Applied.** The article describes a comprehensive research method, including the analysis and scientific generalization of Russian and foreign experience in the efficient exploration of subsoil sites using open geotechnology with the formation and exploration of man-made georesources, simulation modeling of field development parameters, taking into account the formation and exploration of man-made georesources, statistical processing of research results, a system feasibility study and a structural and functional analysis. **Result.** To assess the integrated approach to the exploration of the subsoil site and sustainability of the operation of the mining system, the article proposes an integral indicator of mining capabilities. The developed indicator factors into the receipt of additional income from changes in the volume of reserves involved in the exploration, performance of the quarry, the quality of the extracted raw materials and the range of commercial products, including the provision of services to third-party enterprises depending on external and internal factors in the development of the mining system.

Keywords: sustainability of operation and production capacity of a mining enterprise, products of a mining enterprise, man-made georesources, parameters of the mining system

The research was funded by the grant of the Russian Science Foundation, No. 23-21-10040, <https://rscf.ru/project/23-21-10040>.

For citation

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, vol. 22, no. 2, pp. 5-13. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-5-13>

Введение

Обеспечение оптимального уровня производственной мощности и повышение эффективности использования этих мощностей является основной задачей большинства предприятий реального сектора российской экономики, в том числе и в горнодобывающей отрасли. В классическом представлении производственная мощность непосредственно влияет на конкурентоспособность продукции, формирует конкурентные преимущества предприятия и обеспечивает его рыночную устойчивость [1].

Научно-методической и нормативной базой, регламентирующей разработку месторождений, предусматривается наиболее полное извлечение из недр запасов основных и совместно с ними залегающих полезных ископаемых и попутных компонентов [2].

Однако для большинства горнодобывающих предприятий с открытым способом разработки резервы повышения эффективности только за счет изменения производственной мощности и комплексного освоения природных ресурсов практически исчерпаны. Кроме того, предприятия горной отрасли в современных условиях рынка, уязвимы при падении цен и спроса на добываемое сырье [3-8].

Материалы и методы исследования

Мощность горного предприятия производственная – это максимально возможная добыча полезного ископаемого установленного качества в единицу времени (сутки, год). Определяется исходя из условий производства в рассматриваемом периоде на основе наиболее полного использования средств производства, рационального режима работы, прогрессивной техноло-

гии и эффективной организации производства, учитывая передовой опыт при соблюдении требований безопасности и правил технической эксплуатации [9].

Добыча полезных ископаемых – извлечение полезных ископаемых из недр в результате разработки месторождений: твердых полезных ископаемых – подземным, открытым, комбинированным и скважинным способами [9].

Современные горнодобывающие предприятия кроме полезных ископаемых способны поставлять на рынок новые виды продукции с повышенной добавленной стоимостью, полученной в результате комплексного освоения участка недр, в том числе в виде различных техногенных георесурсов. К ним относятся техногенные месторождения, а также сооружения в виде специальных насыпей из вскрышных и вмещающих пород, используемые в качестве емкости или как строительные полигоны [10-12]. Кроме того, горнодобывающие предприятия, имея свой производственный потенциал, в регионах с развитой инфраструктурой, кроме основной деятельности, могут выполнять процессы открытой геотехнологии для внешних потребителей [13, 14]. К ним относятся выполнение буровзрывных работ, экскавация, транспортирование и др.

Систематизация продукции современного горнодобывающего предприятия, произведенная автором статьи, представлена на **рис. 1**.

Существующее понятие производственной мощности горного предприятия не позволяет в полной мере оценить потенциал и комплексность освоения преобразуемого в процессе эксплуатации участка недр. Разнонаправленность выпускаемой продукции и эффективность работы предприятия не позволяют оценить устойчивость горнодобывающего предприятия в изменяющихся горно-геологических, горнотехнических и рыночных условиях.

Эффективное функционирование горнотехнической системы открытой геотехнологии при комплексном освоении участка недр определяется не только минерально-сырьевой базой месторождения, а также используемым оборудованием, технологиями и способами организации производства, но и зависит от его территориального расположения относительно других промышленных и развитых районов страны, уровня развития транспортной и социальной инфраструктуры, рынков сбыта и других влияющих внешних факторов. Что в целом определяет потенциал развития горнодобывающего предприятия и его горных возможностей в широком смысле.

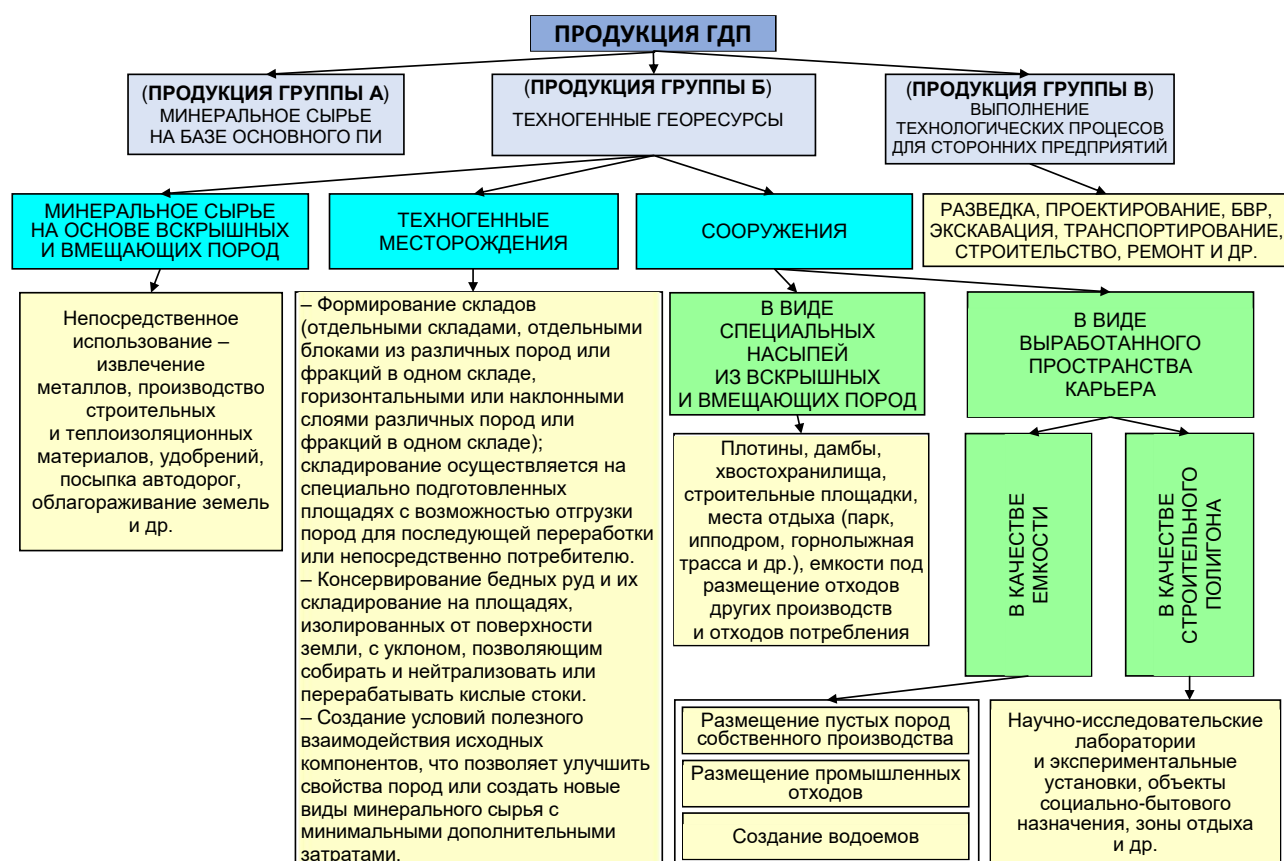


Рис. 1. Номенклатура продукции современных горнодобывающих предприятий
Fig. 1. Product range of modern mining enterprises

Несмотря на наличие факторов, ограничивающих реализацию продукции выделяемых групп (см. рис. 1), имеются многочисленные примеры горнодобывающих предприятий с расширением своей производственной деятельности и номенклатуры выпускаемой продукции. В частности, развитие производственной деятельности можно рассмотреть на примере предприятия, разрабатывающего месторождение известняков в Оренбургской области, характеристика которого в различные периоды времени представлена в табл. 1. До 2010 года на предприятии выпускался один вид продукции – флюсовый известняк, и производственная мощность по его производству была ограничена низким спросом. Развитие строительной отрасли в тот период позволило найти выход из этой ситуации, которым стало решение строительства цементного завода на базе имеющейся инфраструктуры предприятия. В результате была пересмотрена номенклатура минерально-сырьевых ресурсов предприятия и выпускаемой продукции. Глина, которая была вскрышной породой, перешла в категорию полезного ископаемого. К 2020 году на предприятии производится уже 6 видов продукции: известняк, глины, щебень и др. Также с целью снижения издержек буровзрывные работы, транспортировка горной массы переданы для выполнения сторонними организациями. Эти преобразования в целом позволили повысить комплексность осво-

ения участка недр и повысить устойчивость функционирования предприятия, что стало возможным за счет выбора различных направлений развития и изменения параметров горнотехнической системы.

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.

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

Таблица 1. Характеристика предприятия Оренбургской области, разрабатывающего месторождение известняков в различные периоды времени
Table 1. Characteristics of an enterprise in the Orenburg Region developing a limestone deposit in different periods of time

В период до 2010 года	В период 2010-2020 годов
<p><i>Производственные единицы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Центральный карьер – Северо-Западный карьер – ДСК – Известково-обжиговый цех <p><i>Продукция</i> – флюсовый известняк (объем производства – 2,5 млн т/год)</p> <p><i>Производство технологических процессов</i> – собственными силами</p> <p><i>Транспортирование горной массы</i> – комбинированный автомобильно-железнодорожный транспорт</p>	<p><i>Производственные единицы:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – Центральный карьер – Северо-Западный карьер – ДСК – Известково-обжиговый цех – Цементный завод – Цех разработки шлаковых отвалов – Отдел распространения программного продукта <p><i>Продукция:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> – флюсовый известняк (3,2 млн т/год) – легкоплавкие глины (вскрышные породы) (200 тыс. т/год) – цементная продукция в ассортименте (около 2 млн т/год) – щебень шлаковый – металлосодержащая продукция – лом огнеупорных изделий <p><i>Производство технологических процессов:</i> буровзрывные работы, транспортировка горной массы выполняются сторонними организациями, остальные процессы – собственными силами</p> <p><i>Транспортирование горной массы</i> – только автомобильным транспортом</p>

Ключевыми параметрами или характеристиками горнотехнической системы являются:

- объем вовлекаемых в разработку запасов полезного ископаемого;
- качество добываемого сырья;
- производственная мощность;
- номенклатура выпускаемой продукции.

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.

Разработанная автором статьи структурная схема элементов и параметров горнотехнической системы представлена на рис. 2.

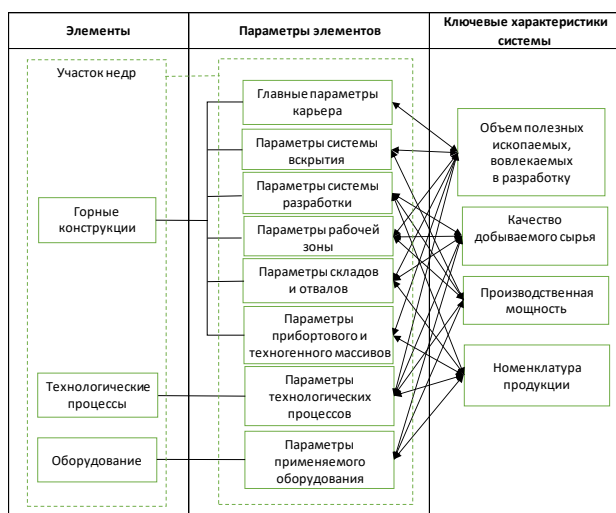


Рис. 2. Структурная схема элементов и параметров горнотехнической системы

Fig. 2. A block diagram of the elements and parameters of the mining system

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 предприятием в зависимости от внешних и внутренних факторов развития горнотехнической системы. Расчет показателя производится на основе приве-

дения 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.

Разработанный интегральный показатель горных возможностей

$$K_{ГВ} = \frac{Q_{К}^{\text{ФАКТ}} \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^n (B_i - Z_i)}{B_{\text{ПН}} - Z_{\text{ПН}}} \right)}{P_{\text{М}}} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $P_{\text{М}}$ – производственная мощность горнодобывающего предприятия, млн т/год; $Q_{К}^{\text{ФАКТ}}$ – 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.; Z_i – затраты на развитие дополнительного направления или нового вида деятельности предприятия; $B_{\text{ПН}}$ – выручка от реализации балансовых запасов полезных ископаемых, руб.; $Z_{\text{ПН}}$ – затраты на освоение балансовых запасов полезных ископаемых, руб.; n – количество новых видов деятельности горнодобывающего предприятия; i – отдельное направление или вид дополнительной деятельности горнодобывающего предприятия.

На величину производственной мощности влияет множество технических и экономических факторов [15]. В том числе:

- горно-геологические условия разработки;
- объем и ценность запасов месторождения;
- максимально возможная скорость развития горных работ, включая:
 - скорость понижения горных работ;
 - скорость подвигания фронта;
 - количество и производительность горнотранспортного оборудования;
 - провозную способность транспортных коммуникаций;
- срок отработки месторождения или эксплуатации карьера;
- потребность в добываемом сырье;
- размер и график инвестиций, условия финансово-хозяйственной деятельности предприятия.

Степень использования производственной мощности характеризуется коэффициентом использования мощности, который выражается отношением годового объема добытого полезного ископаемого к фактической мощности. Так, максимальный коэффициент использования мощности может быть равен единице [16].

Разработанный интегральный показатель горных возможностей в зависимости от комплексности освоения участка недр и развиваемой инфраструктуры может иметь значение, равное больше единицы, что определяет степень снижения зависимости горного предприятия и эффективности производства от пред-

ставленных факторов, а значит, определяет уровень его устойчивости.

Таким образом, период освоения участка недр будет зависеть не только от объема запасов и производственной мощности, но и будет иметь большее значение по сравнению с классическим представлением.

Период освоения участка недр

$$T' = \frac{3}{P_M} \cdot \frac{1-\eta}{1-\rho} \cdot K_{ГВ}, \quad (2)$$

где 3 – балансовые запасы месторождения; P_M – производственная мощность карьера; η и ρ – предельно допустимые (нормируемые) коэффициенты соответственно потерь и объемного разубоживания; $K_{ГВ}$ – интегральный показатель горных возможностей.

Полученные результаты и их обсуждение

Расчет интегрального показателя горных возможностей рассмотрен на примере железорудного месторождения, на участке недр которого накоплен большой объем строительного камня, пригодного для изготовления щебня. В работе определены технико-экономические показатели разработки данного месторождения, в том числе с учетом вовлечения техногенных георесурсов в виде реализации строительного камня из отвалов. На рис. 3 представлено поэтапное развитие горных работ железорудного карьера и отвалов. Основные горнотехнические условия и показатели разработки для каждого этапа с нарастающим итогом представлены в табл. 2.

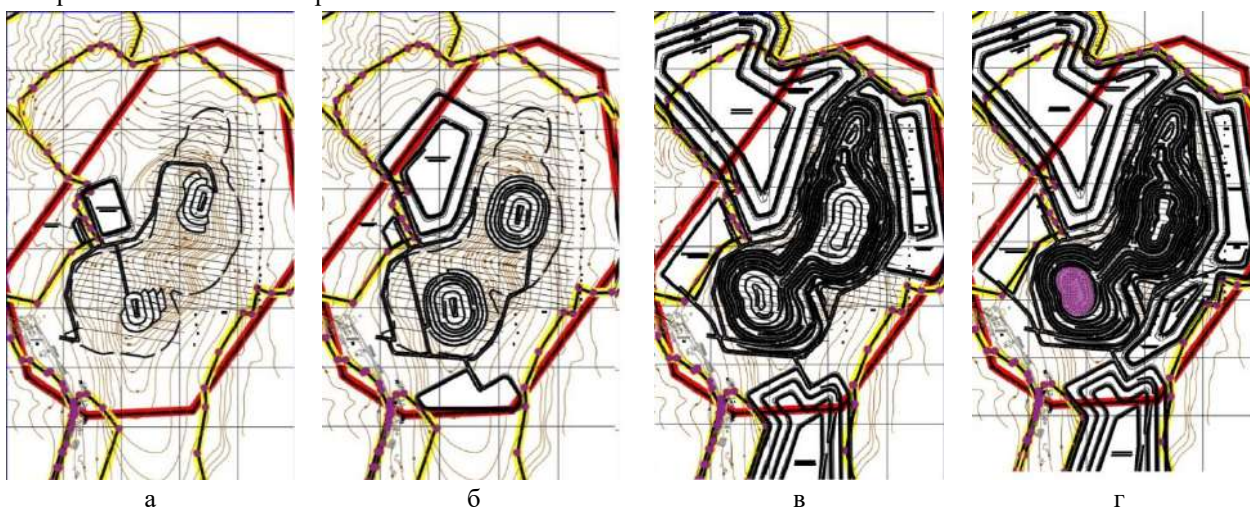


Рис. 3. Поэтапное развитие железорудного карьера и отвалов: а – I этап до отметки горизонта 500 м; б – II этап до отметки горизонта 400 м; в – III этап до отметки горизонта 300 м; г – IV этап до отметки горизонта 200 м (на конец отработки)

Fig. 3. Stage-by-stage development of an iron ore open pit and disposal areas: a is Stage I up to a horizon level of 500 m, б is Stage II up to a horizon level of 400 m, в is Stage III up to a horizon level of 300 m, г is Stage IV up to a horizon level of 200 m (at the end of mining)

Таблица 2. Горнотехнические показатели по этапам разработки железорудного месторождения с нарастающим итогом

Table 2. Mining indicators by stages of iron ore deposit development with cumulative totals

Горнотехнические показатели	Единицы измерения	I этап	II этап	III этап	IV этап
Объем горной массы	тыс. м ³	5392,1	43747,3	225053,8	255032,8
Объем железной руды	тыс. м ³	1399,6	9794,9	28854,2	38241,0
Объем вскрышных пород, в том числе:	тыс. м ³	3992,5	33952,4	196199,6	216791,8
– строительный камень	тыс. м ³	-	6019,3	97653,1	101996,7
– вскрышные породы	тыс. м ³	3834,2	27486,4	94646,6	110895,2
– почвенный грунт	тыс. м ³	158,3	446,6	3899,8	3899,8
Производительность по железной руде	тыс. м ³ /год	666,6	666,6	666,6	666,6
Производительность по вскрыше	тыс. м ³ /год	1901,7	2310,8	4533,1	3779,3
Расстояние транспортирования	км	1,7	4,5	8,5	8
Общий годовой пробег автосамосвалов	тыс. км	560,6	1700,1	5427,6	4400,8
Количество экскаваторов ЭКГ-5А	шт.	4	5	8	8
Количество автосамосвалов БелАЗ 7547	шт.	7	15	38	33
Количество буровых станков СБШ-250МН	шт.	4	5	6	6
Коэффициент вскрыши	м ³ /м ³	2,85	3,47	6,80	5,67
Срок отработки	год	2	15	43	57
Горизонт расчета экономических показателей	год	2	15	20	20

Для каждого этапа произведен расчет среднегодовой прибыли, получаемой от реализации железной руды, добываемой из карьера при производственной мощности 2,4 млн т/год и среднегодовой прибыли, получаемой от реализации строительного камня, добываемого из отвалов в объеме 1 млн т/год. Расчетные значения экономических показателей представлены в табл. 3.

Так, на основе данных, представленных в табл. 2, 3, для горнотехнических условий, соответствующих последнему этапу освоения месторождения, интегральный показатель горных возможностей будет равен 1,3:

$$K_{ГВ} = \frac{2,4 + 2,4 \cdot \left(\frac{617,3}{1954,07} \right)}{2,4} = 1,3.$$

Таким образом, реализация всех видов продукции рассматриваемого горного предприятия, включая техногенные георесурсы в виде строительного камня из отвалов, по значению прибыли сопоставима с объемом добычи балансовых запасов в объеме 3,1 млн т/год.

Для повышения интегрального показателя горных возможностей до значения, равного 2,0, потребуется увеличение добычи строительного камня из отвалов в объеме, обеспечивающем получение прибыли, сопоставимой с прибылью, получаемой от реализации железной руды. В результате моделирования построена зависимость (рис. 4), показывающая соотношение объемов добычи железной руды из карьера и строительного камня из отвалов, обеспечивающих одинаковое значение среднегодовой прибыли и интегрального показателя горных возможностей $K_{ГВ} = 2,0$ на разных этапах освоения участка недр.

Так, например из представленного графика видно, что к окончанию IV этапа разработки карьера среднегодовая прибыль, получаемая от добычи и реализация 1 млн т железной руды, сопоставима с прибылью, по-

лучаемой от добычи и реализации строительного камня из отвалов в объеме 1,5 млн т/год. Таким образом, при большем вовлечении техногенных георесурсов и всей формируемой инфраструктуры участка недр к освоению возможно получение прибыли, сопоставимой с добычей природных ресурсов. Это подтверждает, что техногенные георесурсы действительно являются одним из видов новой продукции горнодобывающего предприятия, целенаправленное формирование и освоение которой позволяет повысить устойчивость его функционирования.

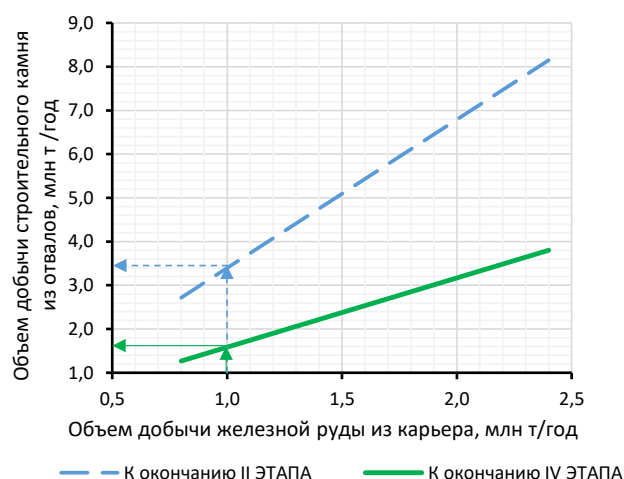


Рис. 4. Зависимость, показывающая соотношение объемов добычи железной руды из карьера и строительного камня из отвалов, обеспечивающих одинаковое значение среднегодовой прибыли

Fig. 4. Dependence showing the ratio between the volumes of production of iron ore from the open pit and building stone from disposal areas, providing the same average annual profit

Таблица 3. Расчетные значения экономических показателей при реализации железной руды, добываемой из карьера и строительного камня из отвалов, млн руб.

Table 3. Calculated values of economic indicators for the sale of iron ore extracted from the open pit and building stone from disposal areas, million rubles

Экономические показатели	I этап		II этап		III этап		IV этап	
	Руда	Камень	Руда	Камень	Руда	Камень	Руда	Камень
Капитальные затраты	292	–	429	–	803	–	752	–
Эксплуатационные затраты	2199	182	25309	1366	89206	1821	90611	6712
Валовая прибыль	11728	1547	79140	11596	50045	15446	48643	10558
Выручка от реализации железной руды	13928	–	104457	–	139275	–	139275	–
Выручка от реализации щебня из строительного камня отвалов	–	1729	–	12968	–	17291	–	17291
ЧДД	7751	1303	29627	4556	17375	5359	14293	3815
Среднегодовая чистая прибыль	4691	619	4207	618	2002	618	1954	617

Заключение

Проведенные исследования доказывают, что развитие различных направлений освоения имеющейся ресурсной базы участка недр, предусматривающих расширение ассортимента и номенклатуры выпускаемой продукции, в том числе на основе техногенных георесурсов, позволяет повысить комплексность освоения участка недр и устойчивость горнодобывающего предприятия в современных условиях рынка.

Таким образом, эффективность и устойчивость функционирования современного горнодобывающего предприятия достигается обоснованием параметров горнотехнической системы на этапе проектирования и управления этими параметрами на этапе эксплуатации с их нацеливанием на повышение комплексности освоения целенаправленно преобразуемого участка недр. Это достигается формированием оптимального и сбалансированного соответственно по доходности и затратам комплекса производственной деятельности, учитывающей выпуск расширенной номенклатуры продукции и услуг открытой геотехнологии с возможностью гибко изменять объемы их производства.

Список источников

1. Дадалова М.В. Управление производственной мощностью на промышленных предприятиях // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №4 (99). С. 242-247.
2. Закон РФ от 21.02.1992 № 2395-1 (ред. от 29.12.2022) «О недрах».
3. Выбор стратегии устойчивого развития горнотехнической системы методом МАВАС / Бурмистров К.В., Гавришев С.Е., Осинцев Н.А., Пыталев И.А. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. №4. С. 268-283.
4. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Selection of open-pit mining and technical system's sustainable development strategies based on MCDM // Sustainability. 2022, vol. 14, no. 13, p. 8003.
5. 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 // Mining Industry Journal (Gornay Promishlennost). 2019, vol. 148, no. 6, pp. 106-111.
6. 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.
7. Условия и опыт формирования промышленных комплексов на базе угольных месторождений восточных регионов России / Ческидов В.И., Гаврилов 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>

8. Palka D., Stecula K. Concept of technology assessment in coal mining // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, vol. 261, no. 1, 012038. DOI: 10.1088/1755-1315/261/1/012038
9. Горное дело: Терминологический словарь / под науч. ред. акад. РАН К.Н. Трубецкого, чл.-корр. РАН Д.Р. Каплунова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Горная книга, 2016. 635 с.
10. Заляднов В.Ю. Обоснование способов формирования техногенных георесурсов при открытой разработке железорудных месторождений: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2005. 130 с.
11. Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Пыталев И.А. Формирование и освоение техногенных георесурсов. Определение параметров карьеров и отвалов. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. 160 с.
12. Пыталев И.А. Обоснование параметров открытой геотехнологии комплексного освоения крутопадающих месторождений для устойчивого развития горнотехнических систем: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.22, 25.00.21 / Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2019. 349 с.
13. Гавришев С.Е., Заляднов В.Ю., Биктеева Н.С. Направления диверсификации деятельности горнодобывающего предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. №7. С. 5-15.
14. Обоснование стратегии развития горнодобывающих предприятий на основе анализа доходности и риска при аутсорсинге и диверсификации / Заляднов В.Ю., Гавришев С.Е., Михайлова Г.В., Кадеров С.С., Коваленко Н.В. // Горная промышленность. 2021. №4. С. 134-139. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-134-139
15. Трубецкой К.Н., Краснянский Г.Л., Хронин В.В. Проектирование карьеров: учебник для вузов: В 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. Т. 1. 519 с.: ил.
16. Ревазов М.А. Горная энциклопедия; под ред. Е.А. Козловского. М.: Советская энциклопедия. 1984-1991.

References

1. Dadalova M.V. Controlling production capacity at industrial enterprises. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2015;(4(99)):242-247. (In Russ.)
2. Law of the Russian Federation "On subsoil" No. 2395-1 dated 21.02.1992 (as revised on 29.12.2022).
3. Burmistrov K.V., Gavrishov S.E., Osintsev N.A., Pytalev I.A. Choosing a strategy for sustainable development of the mining system using the MAVAS method. *Izvestiya Tulsckogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Izvestiya of Tula State University. Earth Sciences]. 2021;(4):268-283. (In Russ.)
4. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Selection of open-pit mining and technical system's sus-

- tainable development strategies based on MCDM. Sustainability. 2022;14(13):8003.
5. 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* [Russian Mining Industry]. 2019;148(6):106-111. (In Russ.)
 6. Ryzhov S.V., Rylnikova M.V. Providing a rationale for the structure of the gold mining plant production capacity at various stages of development of open pit mining. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Izvestiya of Tula State University. Earth Sciences]. 2020;(1):458-470. (In Russ.)
 7. Cheskidov V.I., Gavrilov V.L., Reznik A.V., Nemova N.A. Conditions and experience of establishing industrial complexes based on coal deposits of 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>
 8. Palka D., Stecula K. Concept of technology assessment in coal mining. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;261(1):012038. DOI: 10.1088/1755-1315/261/1/012038
 9. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R. *Gornoe delo: Terminologicheskii slovar* [Mining: Dictionary of terms]. 5th ed., updated and revised. Moscow: Gornaya kniga, 2016. 635 p. (In Russ.)
 10. Zalyadnov V.Yu. *Obosnovanie sposobov formirovaniya tekhnogennykh georesursov pri otkrytoy razrabotke zhelezorudnykh mestorozhdeniy: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Providing a rationale for methods of forming technology-related georesources during open pit mining of iron ore deposits: PhD thesis]. Magnitogorsk, 2005. 130 p.
 11. Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Yu., Pytalev I.A. *Formirovaniye i osvoeniye tekhnogennykh georesursov. Opredeleniye parametrov karerov i otvalov* [Forming and exploration of technology-related georesources. Determining parameters of open pits and disposal areas]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011. 160 p. (In Russ.)
 12. Pytalev I.A. *Obosnovaniye parametrov otkrytoy geotekhnologii kompleksnogo osvoeniya krutopadayushchikh mestorozhdeniy dlya ustoychivogo razvitiya gornotekhnicheskikh sistem: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Providing a rationale for open geotechnology parameters of the integrated exploration of steep-grade deposits for sustainable development of mining systems: doctoral thesis]. Magnitogorsk: 2019. 349 p.
 13. Gavrishev S.E., Zalyadnov V.Yu., Bikteeva N.S. Areas of diversifying activities of a mining enterprise. *Gornyye informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2018;(7):5-15. (In Russ.)
 14. Zalyadnov V.Yu., Gavrishev S.E., Mikhaylova G.V., Kaderov S.S., Kovalenko N.V. Providing a rationale for the strategy of development of mining enterprises by analyzing profitability and risks of outsourcing and diversification. *Gornaya promyshlennost* [Russian Mining Industry], 2021;(4):134-139. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-134-139
 15. Trubetskoy K.N., Krasnyanskiy G.L., Khronin V.V. *Proektirovaniye karerov: uchebnyk dlya vuzov: V 2 t.* [Open pit design: textbook for universities. In 2 volumes]. 2nd ed., updated and revised. Moscow: Academy of Mining Sciences, 2001. Vol. 1. 519 p. (In Russ.)
 16. Revazov M.A. *Gornaya entsiklopediya* [Encyclopedia of mining]. Ed. by E.A. Kozlovsky. Moscow: Soviet encyclopedia. 1984-1991. (In Russ.)

Поступила 20.02.2024; принята к публикации 14.03.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 20/02/2024; revised 14/03/2024; published 27/06/2024

Зяляднов 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

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

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

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-14-21



РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОТВАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ОТВАЛООБРАЗОВАТЕЛЯ

Чебан А.Ю.

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

Аннотация. Актуальность исследования. В связи с увеличением потребления металлов и снижением содержания полезных компонентов в рудах объем извлекаемой из недр горной массы ускоренно возрастает. Не имеющие промышленного значения вскрышные и минерализованные вмещающие породы складываются в отвалы, площадь которых непрерывно увеличивается. Необходимо отметить, что при разработке месторождений цветных и благородных металлов вместе с минерализованными вмещающими породами в отвалы попадает и безвозвратно теряется существенное количество полезных компонентов. Исследования показывают, что мелкая фракция минерализованных вмещающих пород в ряде случаев обогащена полезным компонентом и имеет содержание металла, достаточное для рентабельной переработки методом кучного выщелачивания совместно с бедными рудами. Известные технологии бульдозерного формирования отвалов не обеспечивают возможности отделения кондиционной мелкой фракции. **Цель работы.** Обоснование ресурсосберегающей технологии формирования отвалов, обеспечивающей повышение извлечения полезного компонента при разработке месторождений цветных и благородных металлов, а также уменьшение техногенной нагрузки на окружающую среду за счет выделения из минерализованных вмещающих пород, направляемых в отвал, мелкой фракции с кондиционным содержанием полезного компонента посредством модернизированного отвалообразователя. **Результаты.** В статье предлагается технология формирования отвалов, заключающаяся в циклической перевалке горной массы из автосамосвала под откос посредством грузонесущего органа модернизированного отвалообразователя с выделением посредством просеивающих устройств кондиционной мелкой фракции в накопитель, перемещении системой пневмотранспортирования полученной мелкой фракции из накопителя в контейнер с последующим направлением на переработку, а также периодическом передвижении отвалообразователя с одновременным разравниванием бульдозерным оборудованием гребня ранее отсыпанного слоя горной массы. **Выводы.** Отделение мелкой фракции, обогащенной полезным компонентом, непосредственно во время погрузочно-разгрузочного процесса позволяет существенно уменьшить пыление отвалов, минимизировать гипергенные изменения кондиционной мелкой фракции и получить дополнительный источник сырья с сохраненным природным качеством.

Ключевые слова: отвал, большегрузные автосамосвалы, минерализованные вмещающие породы, колосники, грохот, мелкая фракция, полезный компонент, кучное выщелачивание

© Чебан А.Ю., 2024

Для цитирования

Чебан А.Ю. Ресурсосберегающая технология формирования отвалов с использованием модернизированного отвалообразователя // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 14-21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-14-21>



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

RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY FOR DUMP FORMATION USING A MODERNIZED SPREADER

Cheban A.Yu.

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

Abstract. Relevance. Due to an increase in the consumption of metals and a decrease in the content of useful components in ores, the volume of rock mass extracted from the depths increases rapidly. Overburden and mineralized host rocks of no industrial importance are stored in dumps, whose area continuously increases. It should be noted that when developing deposits of non-ferrous and noble metals, a significant amount of useful components ends up in dumps together with mineralized host rocks and is irretrievably lost. Research shows that in some cases the fine fraction of mineralized host rocks is enriched with a commercial component and has a metal content sufficient for profitable processing by heap leaching together with low-grade ores. Known technologies for bulldozer dumps do not provide for separating the standard fine fraction. **Objective.** The study aims at providing a rationale for the resource-saving technology for dump formation, ensuring an increased extraction of commercial components, when developing deposits of non-ferrous and noble metals, as well as reducing the industry-related load on the environment by separating fine fractions with the standard content of the commercial component from the mineralized host rocks delivered to the dump, using a modernized spreader. **Results.** The article proposes the technology for dump formation, which consists in the cyclic transfer of rock mass from a dump truck downhill using the load-carrying body of the modernized spreader and screening a conditioned fine fraction into a storage unit, delivering the resulting fine fraction from the storage facility into a container with a pneumatic transportation system for processing, as well as periodic movement of the spreader and simultaneous leveling of the ridge of the previously dumped layer of rock mass with bulldozer equipment. **Conclusions.** The separation of fine fractions with an enriched commercial component directly during the loading and unloading process can significantly reduce dust in dumps, minimize hypergene changes in the standard fine fraction and obtain an additional source of raw materials of the preserved natural quality.

Keywords: dump, heavy-duty dump trucks, mineralized host rocks, grate bars, screen, fine fraction, commercial component, heap leaching

For citation

Cheban A.Yu. Resource-Saving Technology for Dump Formation Using a Modernized Spreader. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 14-21. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-14-21>

Введение

Во всем мире растет добыча и потребление металлов. Так, за период с 1987 по 2014 годы добыча меди увеличилась в 2,85 раза, никеля – в 4,46 раза, свинца – в 2,48 раза, цинка – в 2,72 раза, при этом в связи с истощением наиболее качественных запасов минерального сырья в отработку вовлекаются руды со все более низким содержанием металлов [1-3]. Согласно данным работы [4], в доказанных запасах РФ среднее содержание золота за период с 1991 по 2012 годы снизилось с 4,3 до 2,4 г/т (в 1,8 раза), при этом руды крупных месторождений со средним содержанием металла 1,7-2,4 г/т составляют около 70% запасов. На Талнахском месторождении за период с 2008 по 2021 годы среднее содержание меди в руде снизилось с 3,17 до 1,24%, а содержание никеля – с 1,73 до 0,63%, при этом в 1998 году содержание меди и никеля в добываемых рудах месторождения составляло 4,15 и 2,75% соответственно [5]. Таким образом, из недр извлекаются постоянно увеличивающиеся объемы кондиционных и некондиционных руд, минерализованных вмещающих и вскрышных пород, при этом для повышения произво-

дительности и снижения себестоимости добычных работ используется все более мощная выемочная и транспортная техника. Не имеющие промышленного значения горные породы складированы в отвалы, площадь которых непрерывно возрастает, необходимо отметить, что вместе с минерализованными вмещающими породами в отвалы попадает и безвозвратно теряется существенное количество полезного компонента [6]. Повысить эффективность горного производства возможно за счет разработки и применения ресурсосберегающих технологий, направленных на повышение извлечения полезного компонента и уменьшения загрязнения окружающей среды [7-11].

Состояние вопроса и постановка проблемы

Вовлечение в переработку части минерализованных вмещающих пород в некоторых случаях позволяет существенно расширить объем минерально-сырьевой базы месторождений [12, 13]. Так, для месторождения Мурунтау рассматривается вариант вовлечения в переработку с применением метода кучного выщелачивания минерализованных вмещающих пород с содержанием золота 0,25-0,5 г/т, что позволит

увеличить выход руды с 28 до 60% с одновременным ростом количества извлекаемого золота на 14% [14]. Зачастую низкое среднее содержание металла в техногенных отходах делает их переработку нерентабельной, однако для многих руд, а также минерализованных вмещающих пород после их взрывного рыхления характерно обогащение мелкой фракции полезным компонентом [15], переработка такой фракции, в случае ее выделения из основного объема пород, может быть экономически целесообразной.

С участием автора были проведены экспериментальные исследования по определению содержания полезного компонента во взорванных минерализованных вмещающих породах одного из золоторудных месторождений, разделенных по классам крупности. Было выявлено, что в классах крупности -2+0 и -5+2 мм содержание золота составляет соответственно 0,51 и 0,31 г/т при выходе данных классов крупности по массе 7,6 и 4,9%, при этом среднее содержание золота в пробе минерализованных вмещающих пород составляло 0,15 г/т [16]. Таким образом, в объединенном классе крупности -5+0 мм при выходе по массе 12,5% и содержании 0,43 г/т находится около 36% металла, очевидно, что в минерализованных вмещающих породах со средним содержанием золота 0,2-0,3 г/т в отделенном классе крупности -5+0 мм можно ожидать более значительного содержания металла, это позволит рентабельно перерабатывать полученное техногенное сырье с применением метода кучного выщелачивания. Наиболее производительным, организационно и технически легко осуществляемым является выделение кондиционных мелких фракций в процессе отвалообразования.

Применяемые способы отвалообразования зависят от свойств горных пород, а также вида транспорта, применяемого для перемещения горной массы из карьера. Формирование отвалов из крепких горных пород осуществляется с использованием бульдозеров, драглайнов, плужных отвалообразователей и другого оборудования [17]. В настоящее время ведутся исследования, направленные на повышение эффективности процесса отвалообразования путем повышения производительности и безопасности ведения работ, уменьшения площадей, занимаемых отвалами, снижения техногенной нагрузки на окружающую среду за счет уменьшения пыления отвалов, а также выделения из минерализованной горной массы, направляемой в отвал кондиционной составляющей [18-21]. Грузоподъемность многих современных автосамосвалов составляет 110-250 т и более [17], при такой массе машина имеет высокую производительность, но оказывает большое давление на грунт, что влияет на ее проходимость и безопасность разгрузки, поскольку превышение допустимого давления может вызвать деформацию кромки отвала в виде оползней. В работе [18] для интенсификации использования большегрузных автосамосвалов в случае наличия глубоких логов и слабых подстилающих пород предлагается технологическая схема отвалообразования с

применением отвального перегружателя, выполняющего вспомогательную функцию перемещения горных пород из автосамосвала в приямок, из которого ведет черпание экскаватор-драглайн.

При бульдозерном отвалообразовании и транспортировке горной массы большегрузными автосамосвалами, во избежание оползней и опрокидывания автосамосвалов разгружаются вдали от откосов, в связи с чем растет количество задействованных бульдозеров. В работе [19] предлагается конструктивная схема вибрационного отвалообразователя для работы совместно с большегрузными автосамосвалами. Автосамосвал задним ходом заезжает в грузонесущий орган отвалообразователя, имеющего большую опорную поверхность и стоящего у кромки формируемого яруса, и разгружает горную массу. После выезда автосамосвала грузонесущий орган поднимается и посредством вибротранспортирующих устройств разгружает горную массу под откос. Вибрационный отвалообразователь своим ходом последовательно перемещается вдоль кромки яруса, а бульдозером ведется планировка площадки для его перемещения. Применение вибрационного отвалообразователя для условий Ломоносовского ГОКа ОАО «Севералмаз» при работе в комплекте с автосамосвалами грузоподъемностью 90 т согласно расчетам [19] позволит сократить парк бульдозеров на 67%; увеличить пропускную способность отвального фонда в 2,5 раза; снизить эксплуатационные расходы на 42%. В исследовании [20] для формирования отвалов предлагается механизированный комплекс, состоящий из вибрационного отвалообразователя и устройства для формирования устойчивого отвального массива, оснащенного бульдозерным отвалом и блоками для статического и динамического уплотнения складываемой горной массы. Недостатками технико-технологических решений [19, 20] являются: необходимость применения дополнительного оборудования для планирования площадки при перемещении отвалообразователя вдоль кромки отсыпаемого яруса; относительно высокие удельные давления колесной ходовой части отвалообразователя, что может затруднить его перемещение.

Известна технологическая схема отвалообразования с применением экскаватора-драглайна, автосамосвалов и отвального перегружателя, снабженного колосниками и просеивающими поверхностями, обеспечивающая выделение из минерализованных вмещающих пород мелкой фракции, обогащенной полезным компонентом [16]. Автосамосвал задним ходом подъезжает к отвальному перегружателю и разгружает горную массу на колосники, крупнокусковая горная масса по поверхности колосников сыпается в приямок, из которого черпается экскаватор-драглайном, а на просеивающих поверхностях осуществляется среднее и мелкое грохочение, в результате которого выделяется продуктивная мелкая фракция, при этом надрешетные фракции такжесыпаются в приямок. Недостатком конструктивной схемы отвального перегружателя является неравномерная подача горной массы при разгрузке автосамосва-

ла по ширине колосников и просеивающих поверхностей (в средней продольной части слой горной массы толще, а к бортам – тоньше), в связи с чем периферийная часть просеивающих поверхностей недозагружена, а в средней части возможны потери мелкой фракции вместе с более крупной горной массой, ссыпавшейся в приямок. Также необходимо отметить, что отвальный перегружатель данной конструкции имеет ограниченное применение, поскольку в настоящее время при формировании отвалов наиболее широкое применение получила бульдозерная схема.

Большие объемы накопленных вскрышных и минерализованных вмещающих пород создают серьезные экологические проблемы в горнопромышленных регионах [22-24]. Так, сульфидосодержащие техногенные отходы относятся к группе наиболее экологически опасных, при добыче и обогащении руд цветных металлов теряется до 15% меди, молибдена, свинца, до 25% цинка и никеля, присутствующие в составе отходов сульфиды этих металлов в процессе хранения окисляются, тяжелые металлы переходят в водорастворимые соли [22]. При этом гипергенные изменения техногенных продуктов протекают значительно быстрее, чем в естественных геологических условиях, одним из факторов, интенсифицирующих процессы гипергенных изменений, является активация поверхности минералов при их дроблении. Пыление отвалов также оказывает существенное отрицательное воздействие на окружающую среду. Согласно данным работы [24], удельный вклад различных источников в выброс неорганической пыли при открытой разработке железорудных месторождений составляет: пыление техногенных массивов – 80%; пыление при отвалообразовании – 12%; взрывные работы – 5%; погрузка и транспортирование горной массы – 2%; бурение скважин – 1%. Таким образом, удаление мелких фракций из минерализованных вмещающих пород при формировании отвалов, кроме получения дополнительного объема сырья для переработки, еще и позволит снизить техногенную нагрузку на окружающую среду в районе ведения горных работ.

Целью исследования является обоснование ресурсосберегающей технологии формирования отвалов, обеспечивающей повышение извлечения полезного компонента при разработке месторождений цветных и благородных металлов, а также уменьшение техногенной нагрузки на окружающую среду за счет выделения из минерализованных вмещающих пород, направляемых в отвал, мелкой фракции с кондиционным содержанием полезного компонента посредством модернизированного отвалообразователя.

Результаты исследования

В Институте горного дела ДВО РАН разработана ресурсосберегающая технология формирования отвалов с применением модернизированного отвалообразователя, в качестве прототипа для которого взята конструкция, представленная в работе [19]. Модернизированный отвалообразователь включает опорную

раму 1, грузонесущий орган 2, колосники 3, грохот 4 с вибратором 5, накопитель 6, систему пневмотранспортирования мелких фракций 7, бульдозерное оборудование 8, гусеничные механизмы передвижения 9 и гидроцилиндры управления 10-12 (см. рисунок).

Модернизированный отвалообразователь посредством механизмов передвижения 9 устанавливается у кромки 13 отвального яруса 14 на спланированной площадке, при этом грузонесущий орган 2 опущен. Автосамосвал 15 задним ходом частично заезжает в грузонесущий орган 2 до контакта задних колес с упором 16, разгрузка минерализованных вмещающих пород осуществляется на приемный участок 17 грузонесущего органа 2. В средней части приемного участка установлен конический разделитель 18, который обеспечивает более равномерное распределение горной массы по ширине грузонесущего органа 2 и позволяет снизить величину ударных нагрузок на металлоконструкцию, поскольку падающая из кузова горная масса контактирует с поверхностью разделителя 18 по касательной. Порожний автосамосвал 15 выезжает из грузонесущего органа 2, после чего посредством выдвигания гидроцилиндров 10 грузонесущий орган поворачивается на шарнирах кронштейнов 19, установленных на опорной раме 1, в процессе поворота начинается пересыпание горной массы из приемного участка 17 на колосники 3. При движении горной массы вдоль колосников 3 происходит отделение крупных кусков от остального объема горной массы, которая, в свою очередь, просеивается на грохоте 4 с получением мелкой фракции, собирающейся в качестве подрешетного продукта в накопителе 6. Надрешетные продукты перемещаются вдоль поверхности колосников 3 и грохота 4 на необходимое расстояние и ссыпаются под откос. Из накопителя 6 мелкая фракция, имеющая кондиционное содержание полезного компонента, посредством системы пневмотранспортирования 7 по гибкому трубопроводу 20 направляется в контейнер (на рисунке не показан), который после загрузки перемещается специальным транспортным средством к месту переработки. Выделенная из минерализованных вмещающих пород кондиционная мелкая фракция может быть переработана отдельно или совместно с бедной рудой с применением кучного выщелачивания [25].

Количество разгрузок, которые делает отвалообразователь с одного места установки, может быть определено по формуле

$$n = \frac{H \cdot b \cdot B \cdot k}{V \cdot \sin \alpha},$$

где H – высота яруса отвала, м; b – мощность отсыпавшего отвалообразователя слоя, м; B – ширина грузонесущего органа, м; k – коэффициент, учитывающий уменьшение объема складированной горной массы в связи с удалением мелкой фракции; V – объем горной массы в кузове автосамосвала, м³; α – угол откоса яруса отвала, град.

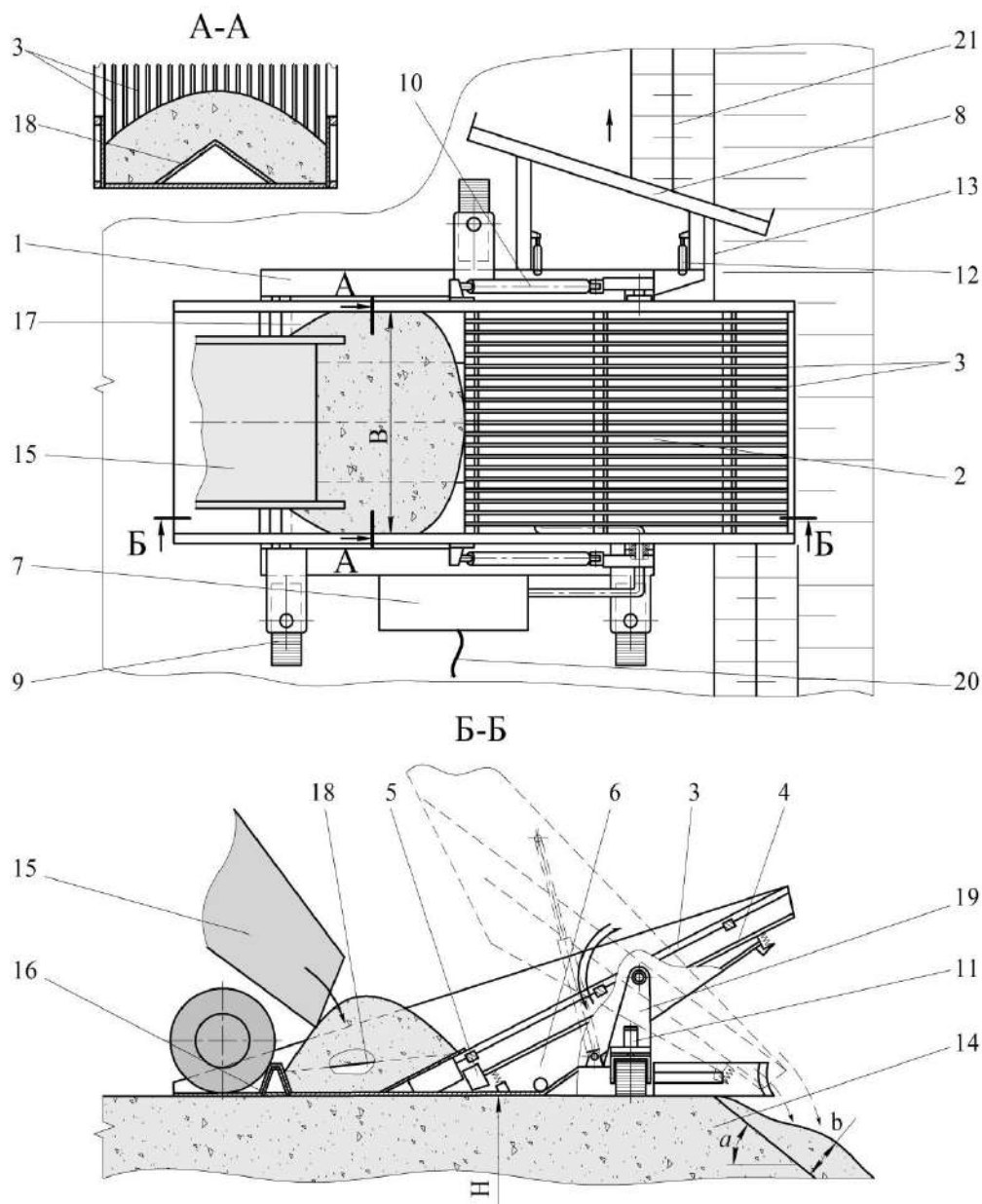


Рисунок. Схема формирования отвала с применением модернизированного отвалообразователя
 Figure. Scheme of dump formation using a modernized spreader

После отсыпки участка яруса отвала с одной остановки опорная рама 1 отвалообразователя приподнимается над поверхностью отвала гидроцилиндрами 11 гусеничных механизмов передвижения 9. Гидроцилиндрами 12 опускается бульдозерное оборудование 8 до контакта с поверхностью отвала, модернизированный отвалообразователь посредством гусеничных механизмов 9 передвижения начинает перемещение с одновременным разравниванием гребня 21 ранее отсыпанного слоя, ведя таким образом формирование отвала плужным способом. Переместившись вдоль кромки яруса на расстояние, равное ширине грузонесущего органа 2, отвалообразователь останавливается и посредством гидроцилиндров

11 опускает опорную раму на поверхность отвала, после чего цикл работы с перегрузкой горной массы из автосамосвалов повторяется.

Выводы

Автором предложена ресурсосберегающая технология формирования отвалов с применением модернизированного отвалообразователя, обеспечивающая извлечение из минерализованных вмещающих пород продуктивной мелкой фракции. Отделение мелких фракций обогащенным полезным компонентом непосредственно во время погрузочно-разгрузочного процесса позволяет минимизировать гипергенные изменения техногенного продукта и получить дополнитель-

ный источник сырья с сохраненным природным качеством. Полученный кондиционный техногенный продукт можно переработать с применением метода кучного выщелачивания. Удаление из складываемой горной массы мелких фракций обеспечит существенное уменьшение пыления отвалов и сокращение выбросов пыли непосредственно при формировании отвалов, также уменьшится миграция металлов в водную среду из пород отвалов под действием атмосферных осадков.

Оснащение приемного участка грузонесущего органа отвалообразователя коническим разделителем обеспечит снижение ударных нагрузок на конструкцию при разгрузке автосамосвала, а также более равномерное распределение горной массы по ширине грузонесущего органа, что повысит качество сортировки минерализованных вмещающих пород. Наличие в передней части отвалообразователя бульдозерного оборудования позволит вести разравнивание ранее отсыпанных пород. Применение гусеничных механизмов передвижения уменьшит удельное давление на поверхность отвала и создаст необходимое тяговое усилие для осуществления плужного отвалообразования. Внедрение предлагаемого в статье технико-технологического решения позволит увеличить коэффициент извлечения полезного ископаемого из недр при разработке месторождений цветных и благородных металлов, а также снизит отрицательную нагрузку на окружающую среду.

Список источников

1. Оганесян Л.В., Мирлин Е.Г. Проблема исчерпания минерально-сырьевых ресурсов земной коры // Горная промышленность. 2019. №6. С. 100-105.
2. A transitional perspective of global and regional mineral material flows / Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. // Resources, Conservation and Recycling. 2019, vol. 140, pp. 91-101.
3. Robben C., Wotruba H. Sensor-based ore sorting technology in mining-past, present and future // Minerals. 2019, vol. 9, no. 9, pp. 523.
4. Инновационные технологии переработки упорных и бедных руд золота как основа рационального недропользования / Б.К. Михайлов, Г.В. Седелникова, Б.И. Беневольский, А.И. Романчук // Руды и металлы. 2014. №1. С. 5-8.
5. Горбачева В.Д., Чмыхалова С.В. Оценка качества медно-никелевых руд Талнахского месторождения // Горный журнал. 2023. №6. С. 68-72.
6. World mineral loss and possibility to increase ore recovery ratio in mining production / Zhang Z.X., Hou D.F., Aladejare A., Ozoji T., Qiao Y. // International Journal Of Mining Reclamation And Environment. 2021, vol. 35, no. 9, pp. 670-691.
7. Трубецкой К.Н., Шапарь А.Г. Малоотходные и ресурсосберегающие технологии при открытой разработке месторождений. М.: Недра, 1993. 272 с.
8. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Развитие научно-методических основ устойчивости функционирования горнотехнических систем в условиях внедрения нового технологического уклада // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. №4. С. 24-39.
9. Adams M. D. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016. 980 p.
10. Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching / Robertson S.W., Van Staden P.J., Cherkaev A., Petersen J. // Hydrometallurgy. 2022, vol. 208, pp. 1-17.
11. Чеван А.Ю., Секисов Г.В. Обоснование использования комбинированной подготовки к селективной выемке руд сложноструктурных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 4-12.
12. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit // Minerals. 2021, vol. 11, no. 1, pp. 1-11.
13. Ilankoon I.M.S.K., Tang Y., Ghorbani Y. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities // Minerals Engineering. 2018, vol. 125, pp. 206-222.
14. Снитка Н.П., Наимова Р.Ш. Направления комплексного использования техногенных ресурсов при открытой разработке месторождения Мурунтау // Горный журнал. 2018. №9. С. 57-61.
15. Чеван А.Ю., Секисов А.Г. Карьерный экскаватор с рабочим оборудованием для отделения обогащенной рудной мелочи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 16-22.
16. Чеван А.Ю. Технология ведения отвалообразования с применением усовершенствованного отвального перегружателя // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. №3. С. 210-219.
17. Открытые горные работы – XXI век. Справочник. Т. 1 / под ред. К.Ю. Анистратова. М.: ООО «Система максимум», 2019. 640 с.
18. Отвальный перегружатель для мощных экскаваторно-автомобильных комплексов карьеров / С.Г. Молотилов, В.К. Норри, О.Б. Кортелев, В.Н. Власов // Известия вузов. Горный журнал. 2002. №6. С. 25-31.
19. Levenson S.Ya., Gendlina L.I. Safe dumping equipment // Journal of Mining Science. 2014, vol. 50, no. 5, pp. 938-942.
20. Куликова Е.Г., Морозов А.В. Повышение безопасности формирования автомобильных отвалов на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. №5-2. С. 91-100.
21. Кантемиров В.Д., Титов Р.С. Оптимизация параметров карьерных грохотильно-перегрузочных пунктов // Известия Уральского государственного горного университета. 2020. №3. С. 107-114.
22. Assessment of the environmental hazard of storing waste from mining and processing copper-nickel ores /

- Masloboev V.A., Seleznev S.G., Makarov V.D., Svetlov A.V. // *Journal of Mining Science*. 2014, vol. 50, no. 3, pp. 559-572.
23. Noble T.L., Parbhakar-Fox A., Berry R.F., Lottermoser B. Mineral dust emissions at metalliferous mine sites / *Environmental Indicators in Metal Mining*, Springer Int. Publish., Switzerland, 2017, pp. 281-306.
 24. Кузнецов В.С. Оценка влияния отвалов пустой породы на состояние атмосферного воздуха при открытой разработке железорудных месторождений, расположенных в северных регионах // *Записки горного института*. 2013. Т. 203. С. 182-184.
 25. Sekisov G.V., Cheban A.Y. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing // *Journal of Mining Science*. 2021, vol. 57, no. 6, pp. 978-985.
- References**
1. Oganessian L.V., Mirlin E.G. Issues of resource depletion in Earth crust. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2019;(6):100-105. (In Russ.)
 2. Baninla Y., Zhang M., Lu Y., Liang R., Zhang Q., Zhou Yu., Khan K. A transitional perspective of global and regional mineral material flows. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019;140:91-101.
 3. Robben C., Wotruba H. Sensor-based ore sorting technology in mining – Past, present and future. *Minerals*. 2019;9(9):523.
 4. Mikhailov B.K., Sedelnikova G.V., Benevolsky B.I., Romanchuk A.I. Innovative technologies for processing refractory and low-grade gold ores as the basis for rational subsoil use. *Rudy i metally* [Ores and Metals]. 2014;(1):5-8. (In Russ.)
 5. Gorbacheva V.D., Chmykhalova S.V. The quality control of copper-nickel ores of the Talnakh deposit. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2023;(6):68-72. (In Russ.)
 6. Zhang Z.X., Hou D.F., Aladejare A., Ozoji T., Qiao Y. World mineral loss and the possibility to increase ore recovery ratio in mining production. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*. 2021;35(9):670-691.
 7. Trubetskoy K.N., Shapar A.G. *Malootkhodnye i resursoberegayushchie tekhnologii pri otkrytoy razrabotke mestorozhdeniy* [Low-waste and resource-saving technologies in open pit mining]. Moscow: Nedra, 1993, 272 p. (In Russ.)
 8. Kaplunov D.R., Rylnikova M.V. Development of scientific and methodological foundations for sustainability of the functioning of mining systems in the context of introducing a new technological paradigm. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [News of Tula State University. Earth Science]. 2020;(4):24-39. (In Russ.)
 9. Adams M.D. *Gold ore processing: Project development and operations*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.
 10. Robertson S.W., Van Staden P.J., Cherkaev A., Petersen J. Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching. *Hydrometallurgy*. 2022;208:1-17.
 11. Cheban A.Yu., Sekisov G.V. Rationale for the use of a combined preparation for selective extraction of ores from complex structure deposits. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020;18(3):4-12. (In Russ.)
 12. Sekisov A., Rasskazova A. Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit. *Minerals*. 2021;11(1):1-11.
 13. Ilankoon I.M.S.K., Tang Y., Ghorbani Y. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities. *Minerals Engineering*. 2018;125:206-222.
 14. Snitka N.P., Naimova R.Sh. Areas for the integrated use of industry-realted resources during open pit mining of the Muruntau deposit. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2018;(9):57-61. (In Russ.)
 15. Cheban A.Yu., Sekisov A.G. A mining excavator with the capability to separate concentrated ore fines. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020;18(1):16-22. (In Russ.)
 16. Cheban A.Yu. Technology of dumping using an improved dump loader. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [News of Tula State University. Earth Science]. 2022;(3):210-219. (In Russ.)
 17. Anistratov K.Yu. *Otkrytye gornye raboty – XXI vek. Spravochnik* [Open pit mining – the 21st century. Handbook]. Volume 1. Moscow: LLC Sistema Maximum, 2019, 640 p. (In Russ.)
 18. Molotilov S.G., Norrie V.K., Kortelev O.B., Vlasov V.N. Dump loader for powerful excavator-vehicle complexes of quarries. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal]. 2002;(6):25-31. (In Russ.)
 19. Levenson S.Ya., Gendlina L.I. Safe dumping equipment. *Journal of Mining Science*. 2014;(50)5:938-942.
 20. Kulikova E.G., Morozov A.V. Increasing safety of formation of truck dumps in open pits. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2022;(5-2):91-100. (In Russ.)
 21. Kantemirov V.D., Titov R.S. Optimization of parameters of open pit screening and dumping stations. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of Ural State Mining University]. 2020;(3):107-114. (In Russ.)
 22. Masloboev V.A., Seleznev S.G., Makarov V.D., Svetlov A.V. Assessment of the environmental hazard of storing waste from mining and processing copper-nickel ores. *Journal of Mining Science*. 2014;50(3):559-572.
 23. Noble T.L., Parbhakar-Fox A., Berry R.F., Lottermoser

- B. Mineral dust emissions at metalliferous mine sites. Environmental Indicators in Metal Mining. Switzerland: Springer Int. Publish., 2017, pp. 281-306.
24. Kuznetsov V.S. Assessment of the influence of waste rock dumps on the state of atmospheric air during open pit mining of iron ore deposits located in the Northern regions. *Zapiski gornogo instituta* [Journal of the Mining Institute]. 2013;203:182-184. (In Russ.)
25. Sekisov G.V., Cheban A.Yu. Low-waste mining technology for structurally complex deposits with mixed-type process flows of ore extraction and processing. *Journal of Mining Science*. 2021;57(6):978-985.

Поступила 19.10.2023; принята к публикации 15.11.2023; опубликована 27.06.2024
Submitted 19/10/2023; revised 15/11/2023; published 27/06/2024

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

Anton Yu. Cheban – Lead 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.

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

УДК 622.852:622.882

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-22-32



КОНТРОЛЬ НАРУШЕННЫХ ПЛОЩАДЕЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Иванов Е.А.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Данная статья исследует влияние горнодобывающих предприятий на природный ландшафт и экологию местности. Приводятся результаты проведенных исследований, которые показывают, что нарушение земной поверхности при добыче руды разными способами имеет различные последствия. Рассматривается влияние как открытого, так и подземного способа добычи на природную среду. Особое внимание уделяется нарушению земной поверхности, образованию провалов и их влиянию на окружающую среду и жителей. Приводится конкретный пример подземного рудника, где обрушение кровли выработок привело к образованию провалов земной поверхности. Анализируются причины и последствия такого обрушения, а также пути восстановления провалившейся земной поверхности при помощи двухкомпонентных полимерных смол. Исследование нарушенных площадей земной поверхности при подземной разработке месторождений имеет большое значение по нескольким причинам. Во-первых, такие разработки являются важным источником добычи полезных ископаемых, но при этом часто сопровождаются нарушениями земной поверхности, представляющими опасность. Исследования в этой области помогут разработать методы и технологии для минимизации нарушений и обеспечения безопасности. Во-вторых, нарушение земной поверхности может негативно влиять на окружающую среду и биоразнообразие. Исследования нарушенных площадей позволят разработать меры для обеспечения экологической безопасности. В-третьих, подземная разработка месторождений требует применения новых методов и технологий. Исследования в области рекультивации улучшат технические решения, снизят затраты и воздействие на окружающую среду. Также возникает потребность в постоянном контроле и мониторинге подземных работ. Исследование на эту тему важно и может улучшить безопасность и эффективность данных процессов.

Ключевые слова: горнодобывающие предприятия, нарушение земной поверхности, провалы, подземная разработка, экологическое воздействие, рудник, природная среда

© Иванов Е.А., 2024

Для цитирования

Иванов Е.А. Контроль нарушенных площадей земной поверхности при подземной разработке месторождения // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 22-32. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-22-32>



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

MONITORING OF DISTURBED AREAS OF THE EARTH SURFACE DURING UNDERGROUND MINING

Ivanov E.A.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. This article examines the impact of mining enterprises on the natural landscape and ecology of the area. The presented results of the conducted studies show that the earth surface disturbance during ore extraction in different ways has different consequences. The article describes the influence of both open and underground mining methods on the natural environment. Special attention is paid to the earth surface disturbance, the formation of sinkholes and their impact on the environment and residents. The article contains a specific example of an underground mine, where the collapse of the roof of the workings led to the formation of sinkholes on the earth surface. The author analyzes causes and consequences of such collapse, as well as ways to restore the collapsed earth surface using two-component polymer resins. Research into the disturbed areas of the earth surface during underground mining is of great importance for several reasons. Firstly, such mining is an important source of mineral extraction, but often accompanied by disturbances of the earth surface, presenting a danger. Research into this area will help develop methods and technologies to minimize disruption and ensure safety. Secondly, land disturbance can negatively impact the environment and biodiversity. Research into the disturbed areas contributes to developing measures to ensure environmental safety. Thirdly, underground mining requires the use of new methods and technologies. Research into this area will improve technical solutions, reduce costs and environmental impact. There is also a need for constant control and monitoring of underground work. Research into this topic is important and can improve safety and efficiency of these processes.

Keywords: mining enterprises, earth surface disturbance, sinkholes, underground mining, environmental impact, mine, natural environment

For citation

Ivanov E.A. Monitoring of Disturbed Areas of the Earth Surface During Underground Mining. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 22-32. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-22-32>

Введение

При подземной разработке месторождения контроль нарушенных площадей земной поверхности играет важную роль. Этот аспект является ключевым в процессе осуществления подземных работ, поскольку он позволяет детально оценить воздействие данных работ на природную среду и проводить необходимые мероприятия по минимизации негативных последствий.

Контроль нарушенных площадей земной поверхности предполагает систематическое наблюдение и фиксацию изменений, происходящих на участках склонов, надземных территорий и других прилегающих объектов в результате подземных работ. Для этого применяются специальные геодезические и геотехнические методы, которые позволяют точно определить уровень деформаций, смещения, наклона и других параметров, связанных с процессом разработки. Полученные данные позволяют выявить потенциальные угрозы стабильности земной поверхности, такие как образование трещин, провалов, оседаний земной поверхности. Это важно для определения допустимых пределов нагрузки и принятия решений по регулированию дальнейших подземных работ.

Одним из основных аспектов контроля нарушенных площадей земной поверхности является мониторинг геологической обстановки вокруг месторождения. Это включает изучение состава горных пород, гидрогеологических условий, наличие опасных геологических процессов и других факторов, которые могут повлиять на безопасность и эффективность подземной разработки.

В связи с растущим интересом к подземной разработке месторождения вопрос контроля нарушенных площадей земной поверхности становится все более актуальным. Необходимо постоянное внимание к этому аспекту и разработка эффективных методов мониторинга, которые обеспечат безопасность подземных горных работ и устойчивость горного массива.

Таким образом, контроль нарушенных площадей земной поверхности при подземной разработке месторождения играет важную роль в обеспечении безопасности и эффективности данного процесса. Постоянное наблюдение и анализ данных мониторинга позволяют своевременно выявлять и устранять потенциальные проблемы, обеспечивая устойчивость и надежность подземной разработки.

Целью исследования является анализ контроля нарушенных площадей земной поверхности при подземной разработке месторождения.

Материалы и методы исследования

Методы исследования показаны в анализе отечественной и зарубежной литературы по теме исследования, синтез, наблюдение.

Горнодобывающие предприятия, несомненно, влияют на природный ландшафт, ухудшают структуру почвенного слоя и экологию местности в негативную сторону. В конечном итоге нарушения приводят к деградации или гибели растительного покрова, изменению водных режимов, исчезновению фауны. Большинство исследований вопроса нарушенных территорий связаны с месторождениями, разрабатываемыми открытым способом [1-3].

Горнорудная практика показывает, что воздействия на недра открытого и подземного способов разработки существенно отличаются, в первую очередь, по геометрическим параметрам. Нарушение земной поверхности недр при подземном способе определяется параметрами зон деформации горного массива [4-6].

Исследования по рассматриваемой теме ведутся в направлении выявления особенностей протекания карстовых процессов в зависимости от типов пород и характера разработок. Так, К.О. Худельких применительно к одному из месторождений строительного гипса Пермского края была определена схема организации карстологического мониторинга. Созданы базы данных геологической и карстологической информации, сформированы картографические пакеты на основе ГИС-платформы, связанные друг с другом. Указанное информационное обеспечение позволило определить две основные проблемы, с которыми сталкиваются при разработке месторождений, где полезное ископаемое представлено карстующимися породами: внезапные провалы и разубоживание. Относительно внезапных провалов предложен метод их прогнозирования, касательно разубоживания полезного ископаемого – представлена типизация карстовых форм, позволяющая принимать оперативные управленческие решения, направленные на снижение влияния данного процесса. В итоге безопасность ведения горных работ на месторождении стабилизировалась, а качество гипсового камня значительно выросло.

Представленная автором система карстологического мониторинга безусловно доказала свою работоспособность, тем не менее она постоянно подвергается анализу с целью выявления в ней недостатков и их устранения, а также внесения корректировок и новых программ наблюдений. Она может быть применена на любом месторождении в условиях открытой разработки, где полезное ископаемое представлено карстующимися породами, залегающими первыми от поверхности и осложненными карстовыми процессами [7]. Е.Ю. Ефремов рассмотрел характеристики уплотнения пород зоны обрушения Северопесчанского месторождения. В его работе исследуется развитие процесса воронкообразования при подземной разработке месторождений в условиях скальных массивов горных пород. В качестве полигона исследований используется Северопесчанское железорудное месторождение. Методика исследований базируется на анализе объемов

горных выработок и провалов с возрастом от 5 до 50 лет и определении коэффициента разрыхления обрушенных пород, по изменению которого с течением времени можно судить о возможном завершении процесса воронкообразования в горном массиве. Для определения объемов провалов земной поверхности применяется фотограмметрическая съемка с использованием беспилотных летательных аппаратов. Результаты наблюдений показывают взаимосвязь показателей уплотнения обрушенного массива и времени существования воронки. Установлено, что в течение нескольких десятилетий после появления воронки обрушения скорость деформирования массива горных пород существенно снижается [8].

В.П. Хоменко, В.С. Крашенинников исследовали возможности противокарстовой защиты и признаки подготовки провалообразования. Согласно данным авторам, обеспечение безаварийной эксплуатации объектов промышленного, гражданского и других видов строительства, возводимых на карстоопасных территориях, – одна из важнейших технических задач современности. В их работе изложены принципы рационального выбора способов инженерной защиты строительных объектов, размещаемых на карстоопасных участках, где в ходе инженерно-геологических изысканий обнаружены признаки подготовки провалообразования. Эти признаки идентифицируются по наличию в пределах участка погребенных карстовых оседаний или провалов, зон суффозионного разуплотнения несвязных горных пород, перекрывающих растворимые породы, зон разупрочнения дисперсных пород, перекрывающих карстовые полости, а также присутствию в растворимых породах незакольматированных полостей. Последовательно рассмотрена целесообразность и эффективность применения в данных условиях отдельных видов и технических приемов противокарстовой защиты, используемых в нашей стране и за рубежом. Отмечена необходимость учета признаков подготовки карстового провалообразования при назначении противокарстовых мероприятий. Практическая значимость такого учета заключается в том, что он позволяет избегать серьезных инженерных ошибок, иногда допускаемых в ходе проектирования или осуществления противокарстовой защиты [9].

Также существуют исследования по технологиям ликвидации провалов горных пород. Анализ проектов по ликвидации горных выработок, выполненных Т.А. Тюленевой, показал, что большинство аварий, связанных с повреждением поверхности земли, вызваны критическими значениями горного давления в пустующих пространствах, снижением несущей способности опор или их отсутствием, а также потерей устойчивости опорных сооружений. Оперативное удаление образовавшихся провалов не всегда обеспечивает положительные результаты, так как часто материалом для их заполнения является порода без исследования свойств земной поверхности, куда он закладывается. Данное обстоятельство приводит к тому, что провалы вновь активизируются, особенно при затоплении. В связи с этим обоснование параметров метода уstra-

нения провалов является актуальной научно-практической задачей. Проблема стабильности ликвидированных горных выработок, а следовательно, геомеханической и экологической безопасности в местах их прокладывания решается только с использованием системного подхода, предполагающего решение комплекса вопросов по минимизации влияния каждого фактора образования провалов как в пространстве, так и во времени. В её статье описаны подходы к определению технологических параметров комбинированного способа устранения провалов горных выработок, применяемого с учетом геологических характеристик горных пород и горно-технических условий их расположения, использование которого обеспечит обоснованный расчет комплекса инженерных показателей для гарантированного удаления провалов [10].

Как показывает отечественная и зарубежная практика [11-14], техногенные пустоты недр, формирующиеся при освоении месторождений твердых полезных ископаемых, являются основным источником интенсивного негативного воздействия на природную среду на всех этапах жизненного цикла освоения месторождения. Провалы земной поверхности при подземной разработке месторождения могут иметь серьезные последствия как для окружающей среды, так и для людей, проживающих вблизи района разработки. Возможные последствия таких провалов многообразны и разрушительны:

1. Уничтожение зданий и инфраструктуры: провалы могут привести к разрушению зданий, дорог, мостов и другой инфраструктуры на земной поверхности. Это может вызвать серьезные экономические потери и причинить вред жизни и здоровью людей.

2. Ущерб окружающей среде: провалы могут привести к утрате экосистем, земель и водных ресурсов. Это может привести к ухудшению качества почвы и воды, уничтожению растительности и животного мира, а также нарушению экосистемных функций.

3. Угроза безопасности: провалы могут представлять угрозу для безопасности людей, проживающих вблизи района разработки. Если провалы происходят в населенных районах, это может привести к эвакуации жителей и созданию временных убежищ. Кроме того, провалы могут привести к образованию опасных напряженно-деформированных зон, которые могут быть опасными для различных видов деятельности (например, строительства, добычи).

4. Снижение геологической стабильности: провалы могут указывать на возможные проблемы с геологической стабильностью месторождения. Это может означать, что месторождение может быть нерентабельным или может потребовать дополнительных издержек и мер безопасности для дальнейшей разработки.

5. Экономические потери: провалы, особенно если они происходят в основных центрах экономической деятельности, могут вызывать значительные экономические потери. Помимо непосредственных убытков от разрушений, провалы могут привести к упадку бизнеса, потере рабочих мест и сокращению экономической активности в регионе.

Наиболее существенные негативные последствия сопровождают открытый способ разработки полезных ископаемых и выражаются в отчуждении земельных площадей под карьеры и внешние отвалы, а также в размещении инфраструктурных объектов горнодобывающих предприятий и транспортных коммуникаций. Как правило, такие нарушения в десятки раз выше, чем при подземном способе разработки. При этом наблюдается существенная трансформация земной поверхности, а вновь образуемый рельеф местности характеризуется неустойчивостью [15].

Однако необходимо отметить, что последствия применения подземного способа разработки могут быть не менее опасными [16], что объясняется более глубоким проникновением в земные недра, а также относительной скрытостью последствий в земной толще.

На примере подземного рудника, расположенного в Забайкальском крае, согласно проведенным наблюдениям можно оценить масштаб причиненного вреда для экосистемы местности.

На участке «Южный» произведено вскрытие и подготовительные работы для очистной выемки трех верхних горизонтов: +825, +775, +725 м. Проектом предусмотрены две системы разработки: с магазинированием руды и с отбойкой руды из подэтажных штреков. После отработки нескольких блоков на горизонтах +825 – +775 м произошло обрушение кровли выработок и образовались провалы земной поверхности. Проведенные наблюдения представлены на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Провал земной поверхности над участком «Южный»

Fig. 1. The sinkhole of the earth surface above the Yuzhny site

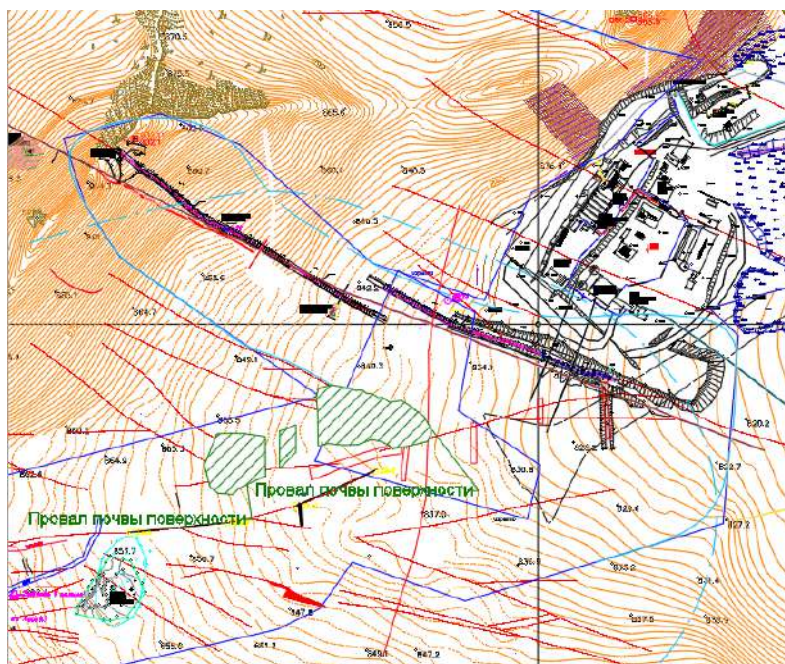


Рис. 2. Ситуационный план участка «Южный» с обозначениями площади провалов земной поверхности
 Fig. 2. The general layout of the Yuzhny site with the indicated areas of the earth surface sinkholes

Использованные для исследования провалов методы включали осмотр, геодезические замеры, наблюдения с фиксированием очертаний и площадей провалов.

Для прогнозирования динамики провалов применялся метод качественного анализа почвенного состава и особенностей геоморфологии земного массива.

Провалы в земной поверхности возникли из-за несоответствия проектных решений реальным условиям горной породы. В процессе разработки рудника произошло необратимое разрушение горных пород, что привело к образованию провалов. Также ситуацию могло усугубить недостаточное регулирование напряжений или неверный расчет мощностей целиков.

После произошедших обвалов породы отработка некоторых блоков в настоящее время на горизонте не представляется возможной. Также возникли затруднения со схемой проветривания участка горных работ и с эксплуатацией флангового восстающего, выходящего на земную поверхность, находящегося за зоной провала. С приходом весеннего сезона вследствие снеготаяния значительно увеличилась обводненность горных выработок.

Согласно проводимым наблюдениям маркшейдерской службы рудника, общая площадь провалов на декабрь 2022 года составила 4848 м². Площадь провалов земной поверхности участка «Южный» представлена на **рис. 2**.

Данная ситуация создает ряд проблем и препятствий для ведения добывающих работ в руднике:

1. Образование провалов и обвалов породы привело к невозможности отработки некоторых блоков на горизонте. Это приводит к снижению объемов добычи и потере ценной руды.
2. Затруднения с проветриванием участка озна-

чают, что воздух в подземных выработках может быть недостаточно чистым, что может негативно сказываться на безопасности рабочих и усложнять выполнение работ.

3. Обслуживание флангового восстающего, выходящего на земную поверхность за зоной провала, также стало затруднительным.

4. Обводненность подземных выработок из-за таяния снега создает новую проблему. Влажность в выработках может негативно влиять на качество работы и производительность рабочих, а также повышать риск возникновения опасных ситуаций, связанных с водой.

Общая площадь провалов, указанная в наблюдениях маркшейдерской службы, настолько велика, что также является серьезным показателем того, что ситуация требует немедленного вмешательства и принятия мер по восстановлению безопасности и нормального функционирования рудника. Данная ситуация создала необходимость проведения комплексных инженерно-геологических исследований, разработки плана восстановления земной поверхности, а также принятия меры по управлению подземными водами, проветриванию и безопасности.

При разработке плана восстановления после образования провалов, появившихся в результате работ по добыче, наблюдения за земной поверхностью являются важным этапом. Наблюдения позволяют оценить состояние земной поверхности, выявить зоны потенциальной опасности и принять необходимые меры для предотвращения возможных негативных последствий.

Для проведения наблюдений за земной поверхностью на практике предлагается использовать следующие методы:

1. Геодезические измерения: проведение геодезических измерений позволяет выявить деформации и изменения высотных отметок на земной поверхности. Это может быть осуществлено с помощью установки геодезических марок, применения спутниковой геодезии или использования современных технологий, таких как лазерное сканирование [17].

2. Геофизические методы: использование геофизических методов, таких как сейсмические, гравитационные, электромагнитные и магнитные исследования, поможет выявить изменения в подземных структурах и уровнях напряжений, которые могут быть связаны с провалами [18].

3. Аэрофотосъемка и дистанционное зондирование: использование спутниковых снимков и дистанционного зондирования позволяет получить обширную информацию о геодезической структуре и изменениях на земной поверхности, включая провалы и другие деформации.

4. Ручные методы наблюдения: проведение ручных наблюдений, включая визуальный осмотр зон потенциальной опасности и замеры деформаций, также может быть полезным для оценки состояния земной поверхности.

Порядок проведения наблюдений за земной поверхностью будет зависеть от конкретной ситуации и требований рудника. Обычно это включает в себя планирование и организацию работ, выбор методов наблюдений, сбор данных, анализ результатов и принятие решений на основе полученной информации.

Первый этап наблюдения за провалом земной поверхности и состоянием подземных горных выработок на участке «Южный» проводились на протяжении 4 месяцев с декабря по март 2023 года. К марту 2023 года площадь провалов увеличилась и составляет 5790,2 м². Затем был полевой выезд на месторождение в ноябре 2023 года, площадь провалов достигла 6210 м². Часть провалов увеличились по площади и в глубину (рис. 3).



Рис. 3. Увеличение площади и глубины провала
Fig. 3. Increasing the sinkhole area and depth

Согласно маркшейдерским наблюдениям в период декабрь 2022 года – март 2023 года, а также ноябрь 2023 года составлена зависимость площади нарушенной поверхности от времени (рис. 4).

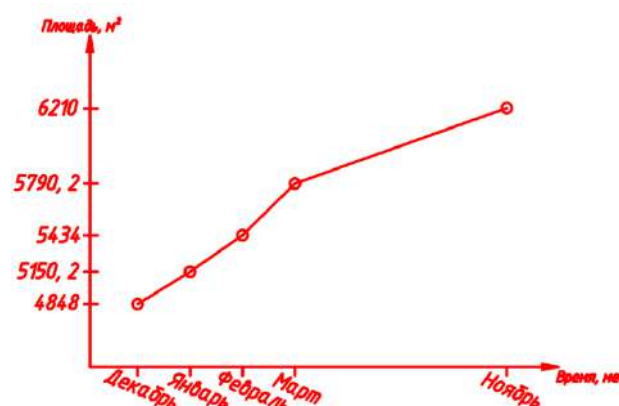


Рис. 4. Зависимость нарушенной площади поверхности от времени

Fig. 4. Relationship between the disturbed surface area and time

Согласно проведенным наблюдениям за период исследования площадь провала увеличилась на 1362 м², что в процентном соотношении составляет 22%.

Выявленная прямая зависимость площади нарушенной земной поверхности рудника от времени объясняется несколькими факторами:

1. Динамика работы рудника: поскольку рудник активно добывает полезные ископаемые в указанный период времени, площадь нарушенной поверхности рудника будет возрастать пропорционально объему добычи.

2. Негативные воздействия на окружающую среду: другим фактором, который может приводить к увеличению площади нарушенной земной поверхности, являются негативные воздействия на окружающую среду, такие как землетрясения, оползни, разрушение горных пород.

Для предотвращения развития площади провалов предлагается провести работы по инъекционному укреплению горных пород с использованием двухкомпонентных полимерных смол [8, 19, 20].

Технология инъекционного укреплению горных пород с использованием двухкомпонентных полимерных смол является методом укреплению горных пород путем введения специальных полимерных смол в его поры и трещины. Процесс укреплению горных пород начинается с осуществления предварительного анализа состояния горных пород и определения необходимости его укреплению. Далее производится предварительная подготовка горных пород. Затем происходит подготовка инъекционной смолы. Она состоит из двух компонентов – смолы и отвердителя. Компоненты смешиваются в определенных пропорциях в специальном смесительном устройстве.

В процессе инъекции смолы в горные породы используется специальное оборудование – насос и инъ-

екционное устройство. Смесь подается под давлением в специальное инъекционное оборудование, которое перемещает ее в трещиноватые породы. Далее происходит процесс реакции смолы с водой, в результате которого смола твердеет и прочно закрепляет породный массив. Этот процесс называется полимеризацией.

Инъекционное закрепление горных пород с использованием полимерных смол имеет ряд преимуществ. Во-первых, он позволяет создать прочные связи между породным массивом и смолой, увеличивая его прочностные характеристики и стабильность. Во-вторых, данный метод позволяет укреплять породы в труднодоступных местах, таких как трещины и полости. В-третьих, этот метод является относительно быстрым и малозатратным.

Для определения фактического расхода материала, радиуса закрепления, прочностных и деформационных характеристик пород необходимо было провести опытные работы по стабилизации горных пород близ площади нарушенных земель по следующей технологической схеме:

– Материалы и оборудования при проведении работ: двухкомпонентные полимерные смолы, емкости под материалы, забивные трубы-инъекторы, двухкомпонентный пневматический насос для подачи смол, трубопровод сжатого воздуха до места проведения испытаний, подвод электроэнергии, буровое оборудование.

– Схема закрепления пород: первый опытный участок расположить за границей возможного обрушения пород – для безопасного расположения оборудования и материалов. Последующие участки стабилизации пород подвигать в направлении обрушенного массива горных пород.

На рис. 5 изображена расчетная схема опытного участка закрепления пород.

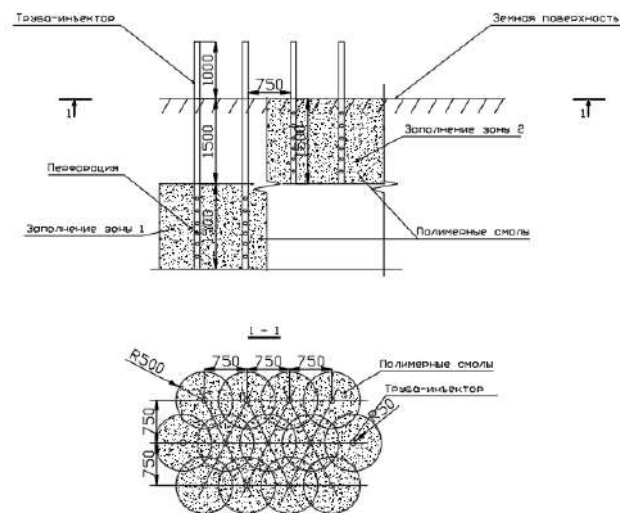


Рис. 5. Расчетная схема опытного участка закрепления пород

Fig. 5. Design diagram of the experimental rock consolidation site

Вышеуказанная двухкомпонентная смола производится российской компанией, что упрощает возможность ее применения в связи с географической и экономической доступностью.

После отработки подземных блоков, попадающих в зоны обрушения, появляется возможность провести горнотехническую рекультивацию посредством заполнения провалов пустой породой, ранее полученной при проведении подземных горных выработок с помощью имеющегося технологического оборудования на производстве. Этап горнотехнической рекультивации местности, нарушенной от горнодобывающих работ, с использованием двухкомпонентных полимерных смол и с помощью заполнения провалов пустой породой осуществляется по следующей технологии:

1. Предварительная подготовка: перед началом рекультивации необходимо провести предварительную оценку состояния закрепленного массива, провести анализ качества и состава пустой породы для заполнения провалов. Также может потребоваться удаление лишних материалов или разрушенных участков массива горных пород.

2. Определение объема пустой породы: на основе геологической информации и размеров провалов определяется необходимый объем пустой породы, который будет использован для заполнения провалов.

3. Подготовка пустой породы: используя имеющееся горнотехническое оборудование и материалы, пустая порода готовится для дальнейшего использования. Это может включать дробление негабаритов, сортировку и промывку материала.

4. Наполнение провалов: пустая порода загружается в готовые провалы с использованием горнотехнического оборудования, такого как экскаваторы, телескопические погрузчики. Материал равномерно распределяется по всей поверхности провалов, чтобы создать плотное и стабильное заполнение.

5. Укладка и утрамбовка: после наполнения провалов пустой породой материал трамбуется при помощи специальной техники, такой как виброплиты, катки. Это делается, чтобы обеспечить достаточную плотность материала и устойчивость заполнения.

6. Завершающие работы: после завершения наполнения и утрамбовки можно провести дополнительные мероприятия по рекультивации, такие как восстановление рельефа, посев растительности или проведение других мероприятий по озеленению.

Важно отметить, что этап горнотехнической рекультивации должен быть проведен с применением соответствующих технологий и соблюдением экологических стандартов. Также рекультивационные мероприятия могут быть уникальными для каждого конкретного месторождения и должны быть адаптированы в соответствии с данными условиями и требованиями.

Далее необходимо проводить биологический этап рекультивации по природоохранному направлению. В период данного этапа со склада почвенно-раститель-

ного слоя (ПРС), имеющегося на руднике, следует разместить на месте бывших провалов ПРС, провести посев трав и кустарников. Также, учитывая, что вокруг нарушенных земель произрастают травы, кустарники и деревья, в дальнейшем будет происходить самозарастание рекультивированных площадей [21, 22].

Примеры крупнейших провалов массива горных пород при проведении горнодобывающих работ на рудниках в различных странах мира также свидетельствуют о возможности проведения восстановления земной поверхности:

1. Рудник Omai, Гайана: в 1995 году на руднике Omai произошел крупнейший провал, когда бассейн хвостохранилища обрушился, вызвав разлив токсичного химического раствора в окружающие водоемы. Устранение последствий провала потребовало чрезвычайных усилий по очистке воды и восстановлению экологического равновесия.

2. Рудник Panguna, Букуа-Торо, Папуа-Новая Гвинея: в 1989 году на руднике Panguna произошел провал земной поверхности после многолетних горнодобывающих работ. Обрушение вызвало затопление долины реки Жваривари и загрязнение окружающих водных и экосистем. Устранение провала включало в себя дренаж и очистку воды, а также меры по восстановлению затронутых зон.

3. Рудник Hamne и Bisha, Эритрея: в 2018 году на рудниках Hamne и Bisha в Эритрее произошли провалы земной поверхности, в результате которых образовалась большая трещина, проникающая в массив горных пород. Устранение разрушений включало укрепление стенок трещин с помощью специальных технологий и методов.

В каждом из этих случаев провалы горного массива на горнодобывающих объектах привели к серьезным экологическим катастрофам и требовали сложных и масштабных работ по ликвидации последствий [23-25].

На основании проведенного обзора можно сделать следующие выводы:

1. Горнодобывающие предприятия оказывают негативное влияние на природный ландшафт, структуру почвы и экологию местности.

2. Провалы земной поверхности при горнодобывающих работах могут иметь серьезные последствия для окружающей среды и людей.

3. Несоответствие проектных решений реальным условиям рудника и недостаточное наблюдение за состоянием напряжений массива могут вызывать провалы земной поверхности.

4. Провалы могут значительно затруднить дальнейшую работу на руднике и стать причиной обводнения подземных выработок.

5. Площадь провалов может увеличиваться со временем, что требует принятия мер по устранению и предотвращению их распространения.

6. Рекомендуется использовать инъекционное закрепление горных пород с помощью полимерных

смолов для предотвращения развития провалов. Аналогичная технология запатентована и применяется на горнодобывающих предприятиях [26].

На основании полученных выводов сформулируем рекомендации по работе с провалами земной поверхности, образующимися при проведении горнодобывающих работ:

1. Активное контролирование и мониторинг провалов: постоянное наблюдение за провалами и их распространением. Установка системы раннего предупреждения для своевременного реагирования на возможные угрозы. Если существует опасность дальнейшего распространения провала, принятие необходимых мер для его предотвращения.

2. Использование жидких полимерных растворов: для стабилизации массива в местах обрушений и провалов целесообразно применять жидкие полимерные растворы. Они помогут укрепить горные породы, что позволит предотвратить дальнейшее разрушение и распространение провалов.

3. Засыпка провалов пустой породой: чтобы предотвратить дальнейший рост площади провала, рекомендуется производить засыпку провалов пустой породой. Это можно сделать с помощью имеющейся техники на производстве. Однако перед этим необходимо провести детальное исследование и обеспечить безопасность и стабильность заменяемой породы.

Добычные работы могут иметь серьезные последствия для экосистемы и требуют тщательного анализа условий горных пород и принятия соответствующих мер для предотвращения провалов и минимизации негативных последствий. Важно помнить, что каждая ситуация уникальна, поэтому рекомендуется провести детальное исследование перед разработкой плана конкретных действий по восстановлению конкретной местности.

Заключение

В результате обзора горнодобывающих работ можно сделать следующие выводы. Горнодобывающие предприятия оказывают негативное влияние на природный ландшафт, почву и экологию. Провалы земной поверхности, возникающие при работах, могут иметь серьезные последствия для окружающей среды и людей, что видно в приведенных примерах в статье. Несоответствие проектных решений и недостаток контроля также способствуют возникновению провалов. Это может затруднить работу на руднике и привести к обводнению выработок. Площадь провалов может увеличиваться со временем, требуя принятия мер для их устранения и предотвращения распространения. Рекомендуется активно контролировать и мониторить провалы, проводить оценку запасов и состояния залежей. В качестве первого этапа технической рекультивации использовать полимерные растворы для стабилизации горных пород. Следующим этапом провалы следует засыпать пустой породой после детального исследования и обеспечения без-

опасности. Далее проводить мероприятия по биологической рекультивации. Важно проводить тщательный анализ условий и принимать соответствующие меры для предотвращения провалов и минимизации последствий. Каждая ситуация требует уникального подхода и детального исследования местности.

Список источников

1. Бондалетова Л.И. Промышленная экология: учеб. пособие / Томский политехн. ун-т. Томск, 2002. 168 с.
2. Васильченко А.В. Рекультивация нарушенных земель: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 2. Оренбург: ОГУ, 2017. 158 с.
3. Должиков П.Н., Фурдей П.Г., Ивлиева Е.О. Ресурсосберегающие технологии ликвидации подземных пустот закладочными смесями на основе отходов производства: сб. науч. тр. ДонГТУ. Алчевск: ИПЦ «Ладо», 2012. Вып. 37. С. 217-224.
4. Облицов Д.С., Опрышко А.Ю. Современные подходы к горнотехнической рекультивации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. №10. С. 191-194.
5. Должиков П.Н., Прокопов А.Ю. Геодинамические процессы в гидроактивизированных подработанных горных массивах: монография. Ростов-н/Д.: РГСУ, 2015. 149 с.
6. Должиков П.Н., Легостаев С.О., Хамидуллина Н.В. Методы стабилизации деформационных процессов земной поверхности на подработанных территориях // Перспективы развития строительных технологий: матер. междунар. науч.-практ. конф. Днепро: НГУ, 2018. С. 41-43.
7. Ефремов Е.Ю. Характеристики уплотнения пород зоны обрушения Северопесчанского месторождения // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений. Уральская горнопромышленная декада: сб. докл. X Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2021. С. 179-186.
8. Худельких К.О. Мониторинг развития карстовых процессов при разработке месторождений строительного гипса // Известия Уральского государственного горного университета. 2021. №4(64). С. 116-129.
9. Хоменко В.П., Крашенинников В.С. Противокарстовая защита и признаки подготовки провалообразования // Промышленное и гражданское строительство. 2020. №9. С. 54-58.
10. Тюленева Т.А. Совершенствование технологии ликвидации провалов над горными выработками // Техника и технология горного дела. 2021. №1(12). С. 4-26.
11. Sadykov V.B., Baygurin Z.D., Altayeva A.A. New approach to zone division of surface of the deposit by the degree of sinkhole risk // Scientific Bulletin of National Mining University. 2019, no. 6, pp. 31-35.
12. Sinkhole occurrence monitoring over shallow abandoned coal mines with satellite-based persistent scatterer interferometry / Malinowska A.A., Witkowski W.T., Hejmanowski R. et al. // Engineering geology. 2019, vol. 262, pp. 105336.
13. Должиков П.Н., Прокопова М.В., Хамидуллина Н.В. Натурные исследования провалов над горными выработками закрытых шахт // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2018. №4. С. 3-11.
14. Прокопов А.Ю., Гридневский А.В., Хамидуллина Н.В. Обеспечение безопасной эксплуатации здания в условиях влияния негативных геологических и техногенных факторов // Строительство. Архитектура. Экономика: материалы Междунар. форума «Победный май 1945 года». Ростов-н/Д.: ДГТУ, 2018. С. 64-67.
15. Абдибаитов Ш.А., Ганиев Ж.М., Эрматов М.А. Методы погашения подземных пустот на рудниках // Горный журнал. 2020. Т. 1. С. 142-146.
16. Айнбиндер И.И., Каплунов Д.Р. Риск-ориентированный подход к выбору геотехнологий подземной разработки месторождений на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. №4. С. 5-19.
17. Храмцов Б.А., Былин И.П., Корнеев П.В. Методика определения напряжений в массиве горных пород с использованием высокоточных геодезических измерений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. №8. С. 125-129.
18. Ботиров Ш. Разработка мероприятий по обеспечению устойчивости массива горных пород с использованием современных маркшейдерских приборов // Академические исследования в современной науке. 2022. №1(13). С. 162-166.
19. Костромин М., Панина Т. Влияние разработки месторождений полезных ископаемых Забайкалья на окружающую и геологическую среду // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений: Уральская горнопромышленная декада: сб. докл. X Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 2021. С. 212-218.
20. Славиковская Ю.О. Техногенные пустоты недр как фактор негативного воздействия на окружающую среду при разработке месторождений твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. №2. С. 33-44.
21. Шеломенцев И.Г., Славиковская Ю.О. Классификация техногенных пустот недр с учетом направления использования ресурсного потенциала для целей экологической реабилитации территорий горнопромышленного комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. №12. С. 127-140.
22. Экзарьян В.Н. Оценка экологических последствий в районах разработки месторождений полезных ископаемых // Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых: материалы годичной сессии Научного

совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии в рамках Года экологии в России. Москва, 2017. Т. 19. С. 81-86.

23. Marian D.P., Onica I. Analysis of the geomechanical phenomena that led to the appearance of sinkholes at the lupeni mine, Romania, in the conditions of thick coal seams mining with longwall top coal caving // Sustainability. 2021, vol. 13, no. 11, pp. 6449.
24. 3D geostatistical modelling for identifying sinkhole disaster potential zones around the Verkhnekamskoye potash deposit (Russia) / Royer J.J., Litaudon J., Filippov L.O. et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2017, vol. 679, no. 1, pp. 12018.
25. Stacey T.R. Addressing the consequences of dynamic rock failure in underground excavations // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016, no. 49, pp. 4091-4101.
26. Пат. RU 2 171 894 с2 Российская Федерация, МПК е21d 9/00. Способ проходки горных выработок в сложных горно-геологических условиях/ Понасенко Л.П.; заявитель и патентообладатель ОАО «Кузбасский научно-исследовательский институт шахтного строительства "Кузниишахтострой"». Заявка: 99110655/03, 1999.05.21.

References

1. Bondaletova L.I. *Promyshlennaya ekologiya: ucheb. posobie* [Industrial ecology: study guide]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2002, 168 p. (In Russ.)
2. Vasilchenko A.V. *Rekultivatsiya narushennykh zemel: ucheb. posobie: v 2-kh ch. Ch. 2* [Land rehabilitation: study guide: in 2 parts. Part 2]. Orenburg: Orenburg State University, 2017, 158 p. (In Russ.)
3. Dolzhikov P.N., Furdey P.G., Ivlieva E.O. Resource-saving technologies of filling underground voids with backfill blend based on industrial waste: collection of research papers of Donbas State Technical University. Alchevsk: Lado, 2012, no. 37, pp. 217-224. (In Russ.)
4. Oblitsov D.S., Opryshko A.Yu. Currently used approaches to mining reclamation. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2011;(10):191-194. (In Russ.)
5. Dolzhikov P.N., Prokopov A.Yu. *Geodinamicheskie protsessy v gidroaktivirovannykh podrabotannykh gornyykh massivakh: monografiya* [Geodynamic processes in hydro-activated subsided rock massifs: monograph]. Rostov-on-Don: Rostov State University of Civil Engineering, 2015, 149 p. (In Russ.)
6. Dolzhikov P.N., Legostaev S.O., Khamidullina N.V. Methods of stabilizing deformation processes of the earth surface on subsided areas. *Perspektivy razvitiya stroitelnykh tekhnologiy: mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf* [Prospects of development of construction technologies: proceedings of the international scientific and practical conference]. Dnipro: NGU, 2018, pp. 41-43. (In Russ.)
7. Efremov E.Yu. Characteristics of compacting rocks of the caving zone on the Severopeschansky deposit. *Innovatsionnye geotekhnologii pri razrabotke rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniy. Uralskaya gornopromyshlennaya dekada: sb. dokl. X Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Innovative geotechnologies, when developing ore and non-metalliferous deposits. Ural mining decade: collection of research paper of the 10th International Scientific and Technical Conferences]. Yekaterinburg, 2021, pp. 179-186. (In Russ.)
8. Khudelkikh K.O. Monitoring of karst processes development, when mining gypsum fields. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of Ural State Mining University]. 2021;(4(64)):116-129. (In Russ.)
9. Khomenko V.P., Krashennikov V.S. Sinkhole protection and indicators of prepared sinkholes. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and Civil Construction]. 2020;(9):54-58. (In Russ.)
10. Tyuleneva T.A. Improving technology for elimination of voids above mining workings. *Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela* [Engineering and Technology of Mining]. 2021, no. 1(12), pp. 4-26. (In Russ.)
11. Sadykov B.B., Baygurin Z.D., Altayeva A.A. New approach to zone division of surface of the deposit by the degree of sinkhole risk. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2019;(6), 31-35.
12. Malinowska A.A., Witkowski W.T., Hejmanowski R. et al. Sinkhole occurrence monitoring over shallow abandoned coal mines with satellite-based persistent scatterer interferometry. *Engineering Geology*. 2019;262:105336.
13. Dolzhikov P.N., Prokopova M.V., Khamidullina N.V. Field studies on sinkholes above mine workings of closed mines. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle* [News of Tula State University. Earth sciences]. 2018;(4):3-11. (In Russ.)
14. Prokopov A.Yu., Gridnevskiy A.V., Khamidullina N.V. Ensuring a safe operation of a building in conditions of influence of negative geological and industry-related factors. *Stroitelstvo. Arkhitektura. Ekonomika: materialy Mezhdunar. foruma «Pobednyi may 1945 goda»* [Construction. Architecture. Economics: proceedings of the International Forum "Victorious May of 1945"]. Rostov-on-Don: Don State Technical University, 2018, pp. 64-67. (In Russ.)
15. Abdibaitov Sh.A., Ganiev Zh.M., Ermatov M.A. Methods of filling sinkholes on mines. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2020;1:142-146. (In Russ.)
16. Ainbinder I.I., Kaplunov D.R. A risk-oriented approach to choosing geotechnologies of underground mining of deposits at great depths. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2019;(4):5-19. (In Russ.)
17. Khramtsov B.A., Bylin I.P., Korneev P.V. A procedure for determining stresses in rock massif, using

- high-accuracy geodetic measurements. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Shukhov Belgorod State Technological University]. 2017;(8):125-129. (In Russ.)
18. Botirov Sh. Development of measures aimed at ensuring stability of rock massif, using modern mine surveying instruments. *Akademicheskie issledovaniya v sovremennoy nauke* [Academic Studies in Modern Science]. 2022;(1(13)):162-166. (In Russ.)
 19. Kostromin M., Panina T. Influence of mining of the Transbaikal mineral deposits on ecological and geological environment. *Innovatsionnye geotekhnologii pri razrabotke rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniy: Uralskaya gornopromyshlennaya dekada: sb. dokl. X Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Innovative geotechnologies in the development of ore and non-metallic deposits. Ural Mining Decade: proceedings of the 10th International Scientific and Technical Conference]. Yekaterinburg, 2021, pp. 212-218. (In Russ.)
 20. Slavikovskaya Yu.O. Industry-related voids of subsoil as a factor of negative environmental impact, when developing deposits of solid minerals. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2021;(2):33-44. (In Russ.)
 21. Shelomentsev I.G., Slavikovskaya Yu.O. Classification of industry-related voids of subsoil, factoring into an area of using resource potential for the purposes of ecological rehabilitation of mining areas. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2019;(12):127-140. (In Russ.)
 22. Ekzaryan V.N. Assessment of environmental consequences in areas of mining mineral deposits. *Sergeevskie chteniya. Geoekologicheskaya bezopasnost razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh: materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geokologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii v ramkakh Goda ekologii v Rossii* [The Sergeev Readings. Geocological safety of mineral deposit mining: proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences for problems of geocology, engineering geology and hydrogeology as part of the Year of Ecology in Russia]. Moscow, 2017, vol. 19, pp. 81-86. (In Russ.)
 23. Marian D.P., Onica I. Analysis of the geomechanical phenomena that led to the appearance of sinkholes at the Lupeni mine, Romania, in the conditions of thick coal seams mining with longwall top coal caving. *Sustainability*. 2021;13(11):6449.
 24. Royer J.J., Litaudon J., Filippov L.O. et al. 3D geostatistical modelling for identifying sinkhole disaster potential zones around the Verkhnekamskoye potash deposit (Russia). *Journal of Physics: Conference Series*. 2017;679(1):12018.
 25. Stacey T.R. Addressing the consequences of dynamic rock failure in underground excavations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016;(49):4091-4101.
 26. Ponasenko L.P. *Sposob prokhodki gornyykh vyrabotok v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh* [Method of driving of mine workings under complicated geological conditions]. Patent RU, no. 2171894C2, 1999.

Поступила 31.01.2024; принята к публикации 03.06.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 31/01/2024; revised 03/06/2024; published 27/06/2024

Иванов Евгений Александрович – аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия.
Email: ugienjohnn@mail.ru. ORCID 0009-0009-6401-3357

Evgeny A. Ivanov – postgraduate student of the Department of Mineral Deposits Development, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.
Email: ugienjohnn@mail.ru. ORCID 0009-0009-6401-3357

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.673.1-28:62-192
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-33-40



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПОДЪЕМНЫХ МАШИН, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ ПРОХОДКИ СТВОЛОВ И ПРИ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Куручкин А.И.¹, Габбасов Б.М.¹, Подболотов С.В.¹, Усов И.Г.¹, Пикалов В.А.², Гавришев С.Е.¹

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

² ООО «Научно-технический центр “Геотехнология”», Челябинск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Представлен анализ надежности подъемных машин, оснащенных различными системами приводов, используемых при подземном способе добычи полезных ископаемых и проходке стволов строящихся шахт, что является, несомненно, актуальной задачей в связи с постоянно увеличивающимися глубинами и протяженностью подземных выработок, связанными со снижением концентрации полезного компонента в рудах. **Цель работы.** Анализ возможных решений для модернизации системы привода шахтного подъема путем предварительного анализа его надежности и долговечности эксплуатации. **Используемые методы.** В работе использованы методы численного расчета надежности, интенсивности отказов элементов подъемных установок, графический анализ основных параметров надежности, который позволяет судить о рациональном выборе системы привода подъема. **Новизна.** Разработан метод расчета надежности приводов подъемных установок и ее основных параметров, проведен поэлементный анализ интенсивности отказов, представлены рекомендации. **Результат.** Разработанная методика будет полезна при проектировании шахтного подъема для больших глубин разработки и проходки недр. Изучена проблема надежности основных систем приводов шахтных подъемных машин, решение которой позволит более тщательно продумать и организовать безопасную эксплуатацию шахтного подъема при добыче полезных ископаемых на больших глубинах и проходке вертикальных стволов строящихся шахт. **Практическая значимость.** Изучение параметров надежности подъемных установок при эксплуатации на больших глубинах имеет важнейшую практическую значимость, так как возникающие динамические нагрузки на привод подъемной установки соизмеримы с весом груза и свиваемого на всю глубину шахты тягового органа, не учитывая возможные аварийные режимы торможения.

Ключевые слова: шахтная подъемная установка, асинхронный привод, тиристорный привод, надежность, интенсивность отказов, полезные ископаемые

© Куручкин А.И., Габбасов Б.М., Подболотов С.В., Усов И.Г., Пикалов В.А., Гавришев С.Е., 2024

Для цитирования

Повышение эффективности работы подъемных машин, эксплуатируемых на больших глубинах проходки стволов и при добыче полезных ископаемых / Куручкин А.И., Габбасов Б.М., Подболотов С.В., Усов И.Г., Пикалов В.А., Гавришев С.Е. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 33-40. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-33-40>



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

INCREASING EFFICIENCY OF PERFORMANCE OF HOISTING UNITS OPERATING AT GREAT DEPTHS OF SHAFT SINKING AND IN MINING OPERATIONS

Kurochkin A.I.¹, Gabbasov B.M.¹, Podbolotov S.V.¹, Usov I.G.¹, Pikalov V.A.², Gavrishev S.E.¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² LLC Scientific and Technical Center Geotechnology, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The article presents an assessment of reliability of mine hoisting machines equipped with various drive systems used in underground mining and drilling of shafts of mines under construction, which is undoubtedly a currently relevant task due to constantly increasing depths and length of underground workings associated with a decrease in the concentration of a useful component in ores. **Objectives.** The study aims at analyzing possible solutions applied to modernize the shaft hoisting drive system by a preliminary analysis of its reliability and lifetime. **Methods Applied.** The research uses methods of numerical calculation of reliability, failure rate of elements of hoisting units, a graphical analysis of main parameters of reliability to assess a reasonable selection of a lift drive system. **Originality.** The authors developed a method for calculating reliability of drives of hoisting units and their main parameters, carried out an element-by-element analysis of the failure rate, and gave recommendations. **Result.** The developed methodology will be useful in designing headframes for great depths of development and penetration of subsoil. The authors have studied a problem of reliability of the main drive systems of mine hoisting machines, whose solution will make it possible to more carefully consider and organize the safe operation of headframes for mining at great depths and penetrating vertical shafts of mines under construction. **Practical Relevance.** The study on the reliability parameters of hoisting units during operation at great depths is of practical importance, since the resulting dynamic loads on the drive of the hoisting unit are commensurate with weight of the load and the pulling element descending to the entire depth of the shaft, not taking into account the possible emergency braking modes.

Keywords: shaft hoisting unit, asynchronous drive, thyristor drive, reliability, failure rate, minerals

For citation

Kurochkin A.I., Gabbasov B.M., Podbolotov S.V., Usov I.G., Pikalov V.A., Gavrishev S.E. Increasing Efficiency of Performance Of Hoisting Units Operating at Great Depths of Shaft Sinking and in Mining Operations. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 33-40. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-33-40>

Введение

Процесс шахтного подъема отличается высоким уровнем трудоемкости в период эксплуатации. Основным функциональным требованием установки является повышение надежности. Надежность определяется известными показателями, главными из которых являются безотказность и долговечность. В процессе работы подъема отказы недопустимы, приводят к простоям горного производства и аварийным ситуациям.

Увеличения показателей надежности подъемных машин возможен путем анализа каждого элемента (детали) подъема на предмет снижения интенсивности его отказов.

Несомненно, инновации и модернизация в области шахтного подъема должны быть сосредоточены на рациональном подборе системы его привода, отличающейся высокой надежностью.

На сегодняшний день самым распространенным типом привода подъемных машин является электро-механический асинхронный привод [2], система управления которым показана на **рис. 1**. Электро-

механический асинхронный привод подъема зарекомендовал себя положительными качествами, такими как: ремонтпригодность и упрощенная конструкция; приемлемость КПД при номинальной нагрузке и скорости; низкая цена по сравнению с другими типами приводов; взаимозаменяемость деталей и узлов системы управления.

Сигнал к началу движения поступает из узла команд и технологического контроля УКТ, анализирующего информацию о ходе процессов разгрузки и загрузки подъемных сосудов. УКТ задействует подъемный двигатель ПД контактором В или Н к питающей сети и через аппарат АУС подает команду на растормаживание машины. Выбор требуемых реостатных характеристик ПД в процессе движения производится с помощью аппарата управления контакторами цепи ротора АУК, на входы которого поступают сигналы действительной скорости от тахогенератора ТГ и тока i_c статора ПД от трансформатора тока ТТ. Кроме того, в АУК поступают команды от этажных выключателей путевого командоаппарата ПК. АУК выполняет включение контакторов У1-У8 в период вывода подъемного сосуда из разгрузочных кривых по скорости и ускорению, в период разгона – по ускорению с отсечкой по

току, в период основного замедления в режиме динамического торможения – по скорости.

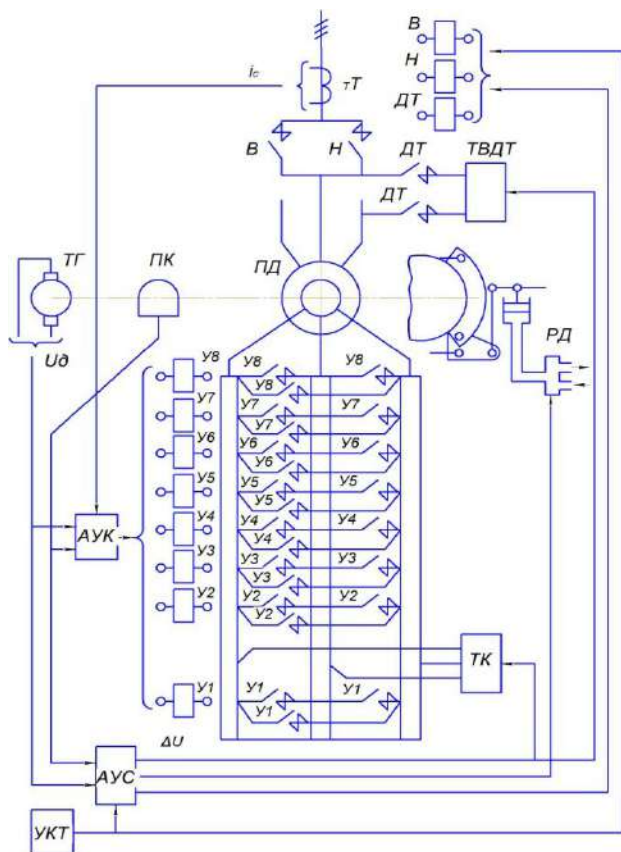


Рис. 1. Система управления асинхронным приводом подъема

Fig. 1. Asynchronous hoisting drive control system

Несмотря на то, что асинхронный двигатель достаточно распространен в приводах горных машин, он не отвечает всем предъявляемым требованиям. Так, при работе в неустановившихся и переходных режимах у двигателей этого типа возникают некоторые проблемы: осуществление проектной диаграммы скорости, исключая механический тормоз; жесткое реагирование двигателя на скачки напряжения в электрической сети; серьезные потери мощности при запуске и, как следствие, невыгодная работа при низкой скорости; невозможность поддержки минимальных скоростей при нагрузке ниже номинальной; малые моменты двигателя и тормоза; внушительные размеры и вес двигателя наряду с редуктором.

Существует опыт применения частотного регулирования асинхронного привода для шахтного подъема, что обосновывается обеспечением генераторного торможения установки и возврат энергии в электрическую сеть. Однако из-за высоких цен на реверсивные схемы и инверторы тока, позволяющие выполнять вышеуказанное достоинство, частотное регулирование не получило широкого распространения в шахтных подъемных машинах.

Наиболее подходящим типом привода для шахт-

ных подъемных машин является привод постоянного тока [1] или система тиристорный преобразователь – двигатель (ТП-Д) (рис. 2), который используется в однодвигательном и многодвигательных исполнениях с нереверсивным силовым тиристорным преобразователем в якорной цепи и реверсированием по цепи возбуждения.

В тиристорных преобразователях электропривода рудничных подъемных установок используются схемы шестиупольного и двенадцатиупольного выпрямления, выполненные на последовательном или параллельном соединении трехфазных выпрямительных мостов, запитанных от разных трансформаторов или от многообмоточного трансформатора с группами соединения обмоток, реализующих соответствующий сдвиг по фазе вторичных напряжений.

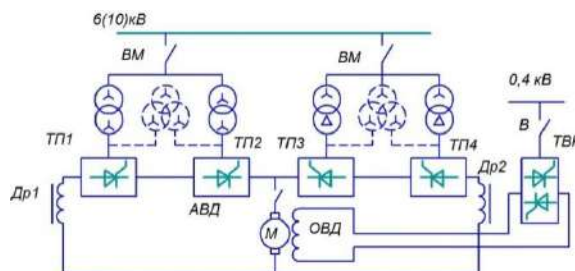


Рис. 2. Силовая схема однодвигательного электропривода ТП-Д шахтной подъемной установки

Fig. 2. Power diagram of TP-D single-engine electric drive of the shaft hoisting unit

И всё-таки представленная система привода, характеризующаяся отличным КПД, высоким быстродействием, небольшой мощностью управления и рядом других преимуществ, имеет ряд отрицательных качеств, связанных с малым коэффициентом мощности, низкой возможной перегрузкой тиристорных преобразователей, колоссальными размерами и весом привода. Вдобавок никак не избежать размещения двух тиристоров для реверса двигателя, что усложняет схему с точки зрения функциональности и надежности эксплуатации.

Обобщая вышеизложенное, особенно в части отрицательных качеств электропривода для шахтного подъема, можно выделить один главный его недостаток, приводящий к неизбежности использования редуктора – при низких крутящих моментах очень высокая быстроходность двигателя. Опираясь на проведенные ранее исследования [3, 4], можно сделать вывод о том, что вес редуктора составляет порядка 25-35% от веса подъемной установки в целом. В конечном итоге это приводит к большим динамическим нагрузкам на всю установку, особенно при работе на больших глубинах [8].

Следовательно, выбор типа привода для шахтного подъема должен быть осуществлен исходя из значительной эксплуатационной надежности, приемлемой стоимости двигателя и условиями работы на горном предприятии [3].

Правила безопасности ведения горных работ предъявляют требования к надежности перечисленных систем приводов. Необходима их оценка с помощью вероятностной модели надежности. Опираясь на ранее рассмотренные законы распределения отказов элементов приводов и их аналогов [5, 6], можно подобрать методы расчета надежности.

Материалы и методы исследования

Существует несколько методик численного расчета надежности и ее параметров. В конечном итоге все они достаточно схожи и дают явное представление о необходимых численных параметрах надежности.

Опираясь на работу уважаемых коллег [7], можно констатировать, что вероятность отказов во времени приводов и шахтной аппаратуры управления подчиняется экспоненциальному закону. Данная методика и тип подсчета надежности предполагает незначительным старение элемента, а отказы узлов и деталей машины – событиями случайными, а поломка одного элемента системы приравнивается к выходу из строя всей системы [6].

Если необходимо получить численные значения параметров надежности по экспоненциальному закону распределения, то нужно определить λ отказов каждого элемента системы. Вероятность безотказной работы $P(t)$ включает в себя ряд критериев, оказывающих влияние на надежность машины, и по экспоненциальному закону распределения вычисляется по формуле [5, 7]

$$P(t) = e^{-\lambda_{\Sigma}t}, \tag{1}$$

где λ_{Σ} – общая интенсивность отказов системы; t – время; e – основание натурального логарифма.

Стоит обратить внимание еще на один параметр – запас надежности $S(t)$ [5], являющийся достаточно информативным, который рассчитывается по формуле

$$S(t) = e^{-\lambda_{\Sigma}t} (1 + \lambda_{\Sigma}t). \tag{2}$$

Весьма характерна вероятность отказа $F(t)$ и сводится в следующую зависимость:

$$F(t) = 1 - P(t). \tag{3}$$

В итоге весь подсчет характеристик надежности подходит к установлению общей интенсивности отказов системы λ_{Σ} [4], которую можно найти, зная интенсивности отказов всех элементов системы.

Проведя необходимый анализ типов приводов подъемных машин [9, 11], мы выделяем для себя следующие: асинхронный электромеханический привод с фазным ротором [2] и тиристорный привод постоянного тока (ТП-Д) [1].

В табл. 1 и 2 представлены интенсивности отказов элементов рассматриваемых выше приводов [5, 7] и, сложив их средние показатели, получаем результаты: для асинхронного привода $\lambda_{\Sigma} = 516,5 \cdot 10^{-6}$ 1/ч; для тиристорного привода $\lambda_{\Sigma} = 596,9 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Таблица 1. Интенсивности отказов элементов тиристорного привода постоянного тока подъемной установки
Table 1. Failure rates of elements of the hoisting unit DC thyristor drive

Наименование элемента	Количество элементов, шт.	Интенсивность отказа элемента $\lambda_{\text{эп}} \cdot 10^{-6}$, 1/ч	Интенсивность отказов группы элементов $\lambda_{\text{гр}} \cdot 10^{-6}$, 1/ч
Силовой трансформатор	2	1,04	2,08
Тиристорный преобразователь	2	8,3	16,6
Система импульсного фазового управления	1	12,4	12,4
Подъемный электродвигатель (ДП)	1	12,36	12,36
Силовой сглаживающий дроссель	2	0,175	0,35
Автомат силовой в якорной цепи	1	10	10
Тиристорные возбудители (ТВ-В и ТВ-Н)	2	10,1	20,2
Блок управления возбудителями	1	15	15
Суммирующий магнитный усилитель	1	5,65	5,65
Преобразователь частоты возбудителя	1	15	15
Трансформатор преобразователя частоты	1	1,09	1,09
Датчики тока	2	15	30
Шунты	2	0,087	0,174
Диоды	50	3,2	10
Разъединители в цепи трансформаторов	2	2,4	4,8
Автоматы силовые	4	10	40
Редуктор	1	1,2	1,2
Муфты сцепления	10	0,06	0,6
Плавкие предохранители	20	0,5	10
Трансформатор напряжения	1	1,04	1,04
Трансформатор тока	2	1,04	2,08

Таблица 2. Интенсивности отказов элементов электромеханического асинхронного привода
Table 2. Failure rates of electromechanical asynchronous drive elements

Наименование элемента	Количество элементов, шт.	Интенсивность отказа элемента $\lambda_{\text{ср}} \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$	Интенсивность отказов группы элементов $\lambda_{\text{гр}} \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}$
Разъединитель	2	2,4	4,8
Трансформатор напряжения	1	1,04	1,04
Трансформатор тока	1	1,04	1,04
Масляный выключатель	1	0,38	0,38
Электродвигатель асинхронный с фазным ротором	1	9,36	9,36
Реверсор	1	40,0	40,0
Командоаппарат	1	40,2	40,2
Ящики сопротивлений	50	0,3	20,3
Концевые выключатели	6	12,0	72,0
Датчики начала замедления	2	15	30,0
Кремниевые диоды	20	0,2	4,0
Автоматы	2	10	20
Универсальный переключатель	2	12	24
Кнопка пусковая	5	4,2	21
Насосы маслосмазки	2	13,5	27
Электродвигатели генераторов	1	5,24	5,24
Генераторы питания роторной станции	1	12,4	12,4
Реле ускорений	6	3,2	19,2
Контакты роторной станции	6	10	60
Реле контроля напряжений	2	3,2	6,4
Реле блокировочное	1	0,75	0,75
Сопротивления экономические	15	0,09	1,35
Двигатель генератора динамического торможения	1	5,24	5,24
Генератор динамического торможения	1	12,36	12,36
Максимальные реле	4	1,2	4,8
Токовые реле	1	3,2	3,2
Тахогенератор	1	12,36	12,36
Реле дуговой блокировки	1	3,2	3,2
Реле контроля тока	1	3,2	3,2
Реле контроля скорости	1	3,2	3,2
Регулятор ограничения скорости	1	15	15
Редуктор подъемной машины	1	1,2	1,2
Муфты	10	0,06	0,6

Полученные результаты и их обсуждение

Проведя последовательные вычисления вероятности безотказной работы и запаса надежности, которые выполнялись по формулам (1) и (2), заносим итоговые значения в **табл. 3**.

Сведя в общую систему числовые значения параметров надежности, строятся графики в зависимости от времени (**рис. 3 и 4**) и определяется среднее время безотказной работы системы: для асинхронного привода $T_{\text{ср}} = 1940$ ч, для тиристорного привода $T_{\text{ср}} = 1680$ ч.

Исходя из проведенных исследований и выявленных результатов подсчета параметров надежности приводов подъемных машин, делаем вывод о том, что асинхронный привод с фазным ротором обладает улучшенными показателями в сравнении с тиристорным приводом и по вероятности безотказной работы

и запасу надежности в промежутке времени работы 1000 до 6000 ч на 16% эффективнее.

Таблица 3. Итоговые значения критериев надежности приводов

Table 3. Final values of drive reliability criteria

$t, \text{ч}$	1000	2000	3000	4000	5000	6000
Асинхронный привод						
$P(t)$	0,6	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1
$S(t)$	0,9	0,7	0,5	0,4	0,3	0,9
$F(t)$	0,4	0,6	0,7	0,9	0,9	0,9
Тиристорный привод						
$P(t)$	0,5	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1
$S(t)$	0,8	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1
$F(t)$	0,4	0,6	0,8	0,9	0,9	0,9

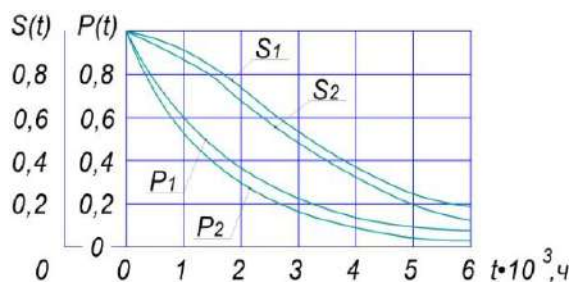


Рис. 3. Изменение параметров вероятности безотказной работы $P(t)$ и запаса надежности $S(t)$ систем приводов подъемных машин:

1 – асинхронного; 2 – тиристорного

Fig. 3. Changes in the parameters of probability of a failure-free operation $P(t)$ and safety margin $S(t)$ for hoisting machine drive systems:

1 is an asynchronous drive; 2 is a thyristor drive

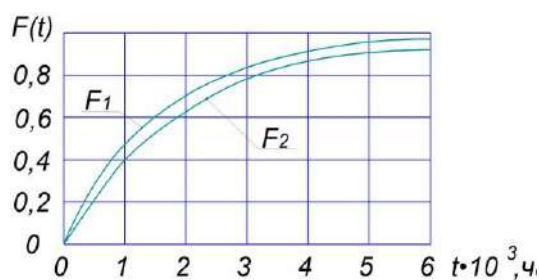


Рис. 4. Изменение параметра вероятности отказа $F(t)$ для систем приводов: 1 – асинхронного; 2 – тиристорного

Fig. 4. Changes in the parameter of probability of failure $F(t)$ for drive systems: 1 is an asynchronous drive; 2 is a thyristor drive

Заключение

Проведенный в работе подробный анализ систем приводов шахтного подъема, оценка их показателей надежности свидетельствует о том, что подъемные установки, оснащенные асинхронным приводом, имеют более высокую надежность, меньшую стоимость привода и в конечном итоге более эффективны в эксплуатации.

Изучена проблема надежности основных систем приводов шахтных подъемных машин, решение которой позволит более тщательно продумать и организовать безопасную эксплуатацию шахтного подъема при добыче полезных ископаемых на больших глубинах и проходке вертикальных стволов строящихся шахт.

Список источников

1. Бабакин В.И., Кондрашова О.Г., Зайдуллин А.Р. Сравнительный анализ энергетической эффективности электроприводов лебедок по системам тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока и преобразователь частоты – асинхронный двигатель // Нефтегазовое дело. 2012. Т. 10. №1. С. 136-139.

2. Трифанов Г.Д., Кошкин А.П. Новая редакция Руководства по ревизии, наладке и испытанию шахтных подъемных установок // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. 2014. Т. 1. С. 19-24.
3. Горнопроходческие подъемные машины в технологических процессах разработки месторождений на больших глубинах / А.И. Курочкин, С.В. Подболотов, Б.М. Габбасов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. №S38. С. 3-15. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-38-3-15
4. Вагин В.С. Совершенствование проходческого подъема // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. №5. С. 214-217.
5. Вагин В.С., Гуров М.Ю., Виноградова А.В. Оценка надежности систем приводов передвижных подъемных установок // Процессы и оборудование металлургического производства. 2004. Вып. 6. С. 77-86.
6. Курочкин А.И., Филатов А.М., Подболотов С.В. Оптимизация динамических процессов проходческих подъемных машин, оснащенных дисковыми тормозными устройствами // Естественные и технические науки. 2020. №3(141). С. 212-214.
7. Кантович Л.И., Вагин В.С. Влияние системы привода на динамические нагрузки передвижных проходческих подъемных установок // Горное оборудование и электромеханика. 2012. №6. С. 26-33.
8. Kuskildin R.B., Kryuchkova Y.V. Methods of estimating dynamic loads on ropes of mine winding plants // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th conference of the Russian-German Raw Materials, 2018: 11th, Potsdam, 07-08 ноября 2018 года. Potsdam, 2019, pp. 283-286.
9. Карпеш А.А., Вагин В.С. Оценка возможности применения следящих систем управления гидроприводом подъемной машины при проходке стволов шахт по добыче природного камня // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. Междунар. техн. конф., Екатеринбург, 24-26 апреля 2018 года / под ред. Г.Д. Першина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. С. 179-182.
10. Курочкин А.И., Габбасов Б.М., Подболотов С.В. Переход к новому способу конструирования подвесных устройств канатов подъемных установок для глубоких шахт // Современные достижения университетских научных школ: сб. докл. нац. науч. школы-конференции, 23-24 ноября 2023 г. Магнитогорск. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. Вып. 8. С. 182-185.
11. Повышение надежности и безопасности шахтных подъемных установок / А.П. Дворник, Ю.В. Калинин, В.Л. Клемба, Н.И. Березовский // Горная механика и машиностроение. 2021. №1. С. 13-20.

References

1. Babakin V.I., Kondrashova O.G., Zaydullin A.R. A comparative analysis of energy efficiency of electric drives of winches by systems of a thyristor converter – a DC motor and a frequency converter – an asynchronous motor. *Neftegazovoe delo* [Petroleum Engineering], 2012;10(1):136-139. (In Russ.)
2. Trifanov G.D., Koshkin A.P. A revised version of the Guidelines for the Audit, Adjustment and Testing of Shaft Hoisting Units. *Aktualnye problemy povysheniya effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii gornoshakhtnogo i neftepromyslovogo oborudovaniya* [Current problems of increasing efficiency and safety of the operation of mining and oilfield equipment]. 2014;1:19-24. (In Russ.)
3. Kurochkin A.I., Podbolotov S.V., Gabbasov B.M. et al. Mine hoisting machines in the technological processes of deposit development at great depths. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2020;(S38):3-15. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-38-3-15
4. Vagin V.S. Improvement of tunneling hoists. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2011;(5):214-217. (In Russ.)
5. Vagin V.S., Gurov M.Yu., Vinogradova A.V. Assessment of reliability of drive systems of mobile hoisting machines. *Protsessy i oborudovanie metallurgicheskogo proizvodstva* [Processes and Equipment of Metallurgical Production]. 2004;(6):77-86. (In Russ.)
6. Kurochkin A.I., Filatov A.M., Podbolotov S.V. Optimization of dynamic processes of tunneling hoisting machines equipped with disc braking devices. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Technical Sciences]. 2020;(3(141)):212-214. (In Russ.)
7. Kantovich L.I., Vagin V.S. The influence of the drive system on dynamic loads of mobile tunneling hoisting machines. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics]. 2012;(6):26-33. (In Russ.)
8. Kuskildin R.B., Kryuchkova Y.V. Methods of estimating dynamic loads on ropes of mine winding plants. *Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects. Proceedings of the 11th Russian-German Raw Materials Conference, November 7-8, 2018, Potsdam. Potsdam, 2019, pp. 283-286.*
9. Karpesh A.A., Vagin V.S. Assessment of the possibility of using tracking control systems for the hydraulic drive of a hoisting machine when drilling shafts of mines for the extraction of natural stone. *Dobycha, obrabotka i primenenie prirodnogo kamnya: sb. nauch. tr. Mezhdunar. tekhn. konf.* [Mining, working and use of natural stone: Collection of research papers of the International Technical Conference]. Yekaterinburg, April 24-26, 2018. Edited by G.D. Pershin. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2018, pp. 179-182. (In Russ.)
10. Kurochkin A.I., Gabbasov B.M., Podbolotov S.V. Transition to a new method of designing suspended ropes of hoisting machines for deep mines. *Sovremennye dostizheniya universitetskikh nauchnykh shkoly: sb. dokl. nats. nauch. shkoly-konferentsii* [Modern achievement of university research schools: Collection of reports of the National Scientific Workshop-Conference]. Magnitogorsk, November 23-24, 2023. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2023, vol. 8, pp. 182-185. (In Russ.)
11. Dvornik A.P., Kalintsev Yu.V., Klemba V.L., Berezovsky N.I. Improving reliability and safety of mine hoisting machines. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie* [Mining Mechanics and Mechanical Engineering]. 2021;(1):13-20. (In Russ.)

Поступила 25.03.2024; принята к публикации 18.04.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 25/03/2024; revised 18/04/2024; published 27/06/2024

Курочкин Антон Иванович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой горных машин и транспортно-технологических комплексов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Email: a.kurochkin@magtu.ru. ORCID 0000-0003-3287-4653

Габбасов Булат Маратович – кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: bulatg74@mail.ru. ORCID 0000-0003-3811-0697

Подболотов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: podbolotov_sergey@mail.ru. ORCID 0000-0002-7870-7183

Усов Игорь Геннадьевич – кандидат технических наук, старший преподаватель, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: usov_ig@list.ru. ORCID 0000-0002-7642-3603

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

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

Anton I. Kurochkin – PhD (Eng.), Head of the Department of Mining Machinery and Transport and Technological Complexes, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: a.kurochkin@magtu.ru. ORCID 0000-0003-3287-4653

Bulat M. Gabbasov – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: bulatg74@mail.ru. ORCID 0000-0003-3811-0697

Sergey V. Podbolotov – PhD (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: podbolotov_servey@mail.ru. ORCID 0000-0002-7870-7183

Igor G. Usov – PhD (Eng.), Senior Lecturer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: usov_ig@list.ru. ORCID 0000-0002-7642-3603

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

Sergei E. Gavrishev – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Development of Mineral Deposits, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: ormi-cg@mail.ru.



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

УДК 622.221:658.5

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-41-48

ОЦЕНКА ПОДГОТОВЛЕННОСТИ УСЛОВИЙ ДЛЯ АВТОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ НА УГОЛЬНОМ РАЗРЕЗЕ

Черских О.И.¹, Минаков В.С.², Довженок А.С.³¹ ООО «Солнцевский угольный разрез», Шахтерск, Россия² Восточная горнорудная компания, Шахтерск, Россия³ Челябинский филиал Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Челябинск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Затраты на автотранспорт в себестоимости добычи угля достигают 30-40%. Существенное влияние на расход ресурсов оказывают условия транспортирования. Для принятия своевременных и рациональных управленческих решений необходима оперативная, достаточно простая и корректная оценка текущего состояния условий, а также определение их целевых характеристик в осязаемых категориях. Эти обстоятельства определили актуальность разработки соответствующей методики оценки подготовленности условий для автотранспортирования. **Цель работы.** Разработка и опробование методического инструментария, обеспечивающего оперативную качественную и количественную оценку условий транспортирования по следующим объектам: отвал, основная дорога, забой и площадка для пересменки по 4-м уровням качества. **Используемые методы.** В статье используются методы системного и структурно-функционального анализа, научного обобщения, экспертных оценок и производственного эксперимента. Использование представленных методов позволило с участием руководителей и специалистов Солнцевского угольного разреза разработать шкалу оценки подготовленности условий транспортирования, организовать производственный эксперимент без сбоев в действующем производстве, поэтапно провести опробование шкалы посредством экспертной оценки условий с ее применением, выполнить критический анализ подготовки условий эксплуатации и разработать меры по ее эффективному применению. **Новизна.** Представлена авторская методика проведения оценки подготовленности условий на угольном разрезе. **Практическая значимость.** Освоение предлагаемой методики позволяет в режиме мониторинга определять уровень качества состояния условий эксплуатации самосвалов с использованием соответствующей 4-уровневой шкалы, выявлять резервы улучшений и намечать пути по их использованию с приемлемыми затратами ресурсов. По мере освоения методики и получения навыков в ее применении, обеспечивающих устранение очевидных отклонений в состоянии всех объектов условий транспортирования, целесообразно рассмотреть переход к более точным, но и более затратным инструментальным способам оценки условий.

Ключевые слова: угольный разрез, автотранспортирование, подготовленность условий, шкала оценки

© Черских О.И., Минаков В.С., Довженок А.С., 2024

Для цитирования

Черских О.И., Минаков В.С., Довженок А.С. Оценка подготовленности условий для автотранспортирования на угольном разрезе // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 41-48. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-41-48>



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

ASSESSMENT OF PREPAREDNESS OF CONDITIONS FOR TRANSPORTATION AT THE OPENCAST COAL MINE

Cherskikh O.I.¹, Minakov V.S.², Dovzhenok A.S.³

¹ Solntsevsky Coal Mine LLC (East Mining Company), Shakhtersk, Russia

² East Mining Company, Shakhtersk, Russia

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

Abstract. Relevance. The expenses for motor transport in the cost of coal mining reach 30-40%. Transportation conditions have a significant impact on resource consumption. In order to make timely and rational management decisions, it is necessary to use an operational, fairly simple, and correct assessment of the current state of conditions, as well as the determination of their target characteristics in tangible categories. These circumstances have determined the relevance of developing an appropriate methodology for assessing preparedness of conditions for motor transport. **Objectives.** The study is aimed at developing and testing methodological tools that provide for a prompt qualitative and quantitative assessment of transportation conditions for the following facilities: a dump, a main road, a face and a platform for shift change, at 4 quality levels. **Methods Applied.** The article describes used methods of systemic and structural-functional analysis, scientific generalization, expert assessments and industrial experiment. The use of the presented methods, and managers and specialists of the Solntsevsky Coal Mine contributed to developing a scale for assessing preparedness of transportation conditions, organizing a production experiment without failures in the existing production, conducting a step-by-step testing of the scale through an expert assessment of the conditions, performing a critical analysis of the preparation of operating conditions and developing measures for its efficient application. **Originality.** The paper presents the authors' methodology for assessing preparedness of conditions at the opencast coal mine. **Practical Relevance.** Mastering of the proposed methodology contributes to determining the quality level of the operating conditions of dump trucks in a monitoring mode, using the appropriate 4-level scale, identifying reserves for improvements and outlining ways to use them with acceptable resource consumption. As soon as the methodology is mastered and skills in its application are gained to ensure the elimination of obvious deviations in the condition of all objects of transportation conditions, it is advisable to consider a transition to more accurate, but also more expensive instrumental methods of assessing conditions.

Keywords: opencast coal mine, transportation, preparedness of conditions, assessment scale

For citation

Cherskikh O.I., Minakov V.S., Dovzhenok A.S. Assessment of Preparedness of Conditions for Transportation at the Opencast Coal Mine. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 41-48. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-41-48>

Введение

Основными факторами, значительно влияющими на величину затрат на автотранспорт и его производительность, являются условия транспортирования, качество загрузки самосвалов, скоростной режим машин и качество их технического обслуживания и ремонта [1].

На горнодобывающих предприятиях широко распространено отношение к карьерному автотранспорту как к технике, предназначенной для работы в тяжелых условиях, что закономерно приводит к низкой их подготовленности для эффективной и безопасной эксплуатации. В результате значительно недоиспользуется технический потенциал машин, их узлов и агрегатов, допускается существенный перерасход материально-технических и энергетических ресурсов на выполнение транспортной работы. Так, например, на одном и том же предприятии из-за разных дорожных условий ходимость высококачественных сверхкрупногабаритных шин одной марки может отличаться до 5 раз и находится в диапазоне 33-155 тыс. км пробега. Аналогичные примеры и по удельному расходу топлива – диапазон 80-170 г/ткм, по ходимости рамы автосамосвалов – диапазон 20-60 тыс. км [2].

Забойные и отвальные участки дорог в разрезе наиболее часто подвержены изменению, что формирует отношение бесполезности поддержания их в надлежащем состоянии. Нередко такое отношение заканчивается необходимостью «подталкивания» самосвала в забое к началу движения с помощью экскаватора либо другого оборудования. Терпимое отношение к крупным кускам породы на площадках, где осуществляется погрузка-выгрузка породы на дорогах, приводит к глубоким порезам шин, сокращающим срок их службы.

Невыдержанные параметры макро- и микропрофиля автодороги обуславливают повышенные нагрузки на элементы ходовой части, трансмиссии и двигателя, что преждевременно выводит их из строя. Наличие многочисленных «бугорков и ямок» на дорогах ведет к повышенному расходу времени и топлива на их преодоление. В целом некачественная автодорога может приводить к перерасходу ресурсов до 30% и увеличению рисков аварий и травм персонала при эксплуатации машин [1, 3].

Важным компонентом подготовки условий для безопасного процесса транспортирования является наличие удобной и освещенной площадки для пере-

сменки, позволяющей качественно и безопасно провести ежедневный осмотр техники и смену экипажа.

Значительный диапазон изменений состояния условий транспортирования и существенное их влияние на расход ресурсов обуславливают необходимость их корректной оценки для принятия своевременных и рациональных управленческих решений по приведению условий транспортирования в надлежащее состояние [4, 5].

Методика оценки условий транспортирования

Предлагаемая методика предусматривает качественную и количественную оценку условий транспортирования по следующим объектам: отвал, основная дорога, забой и площадка для пересменки по 4-м уровням качества [6]. Уровни качества представлены в табл. 1.

Таблица 1. Уровни качества подготовленности условий автотранспортирования
Table 1. The quality levels of preparedness of the transportation conditions

Номер уровня	Уровень качества условий	Характеристика условий
4	Высокий	Условия соответствуют нормативам
3	Средний	Условия незначительно отклоняются от нормативов
2	Низкий	Условия значительно отклоняются от нормативов
1	Неприемлемый	Условия недопустимо отклоняются от нормативов

Под надлежащим состоянием (качеством) условий понимаются известные характеристики – параметры забоя должны соответствовать паспорту ведения горных работ. Забой должен быть удобен для безопасных маневров и постановки самосвала под погрузку, заезд и выезд из него не вызывать затруднений у водителя.

Дорога должна иметь ширину, позволяющую безопасно двигаться большегрузному транспорту и вспомогательной технике во встречном движении, ее профиль – выдержан и соответствовать паспорту на строительство карьерных автодорог. Просыпи горной массы на дороге, могущие привести к порезам автошин, должны своевременно убираться.

Отвалы необходимо хорошо спланировать и обозначить знаками. В их основание целесообразно укладывать скальный грунт. Зона выгрузки должна быть удобной, иметь обратный уклон, предохранительный вал и хорошее освещение.

На площадках для пересменки должны удобно и безопасно размещаться большегрузные карьерные самосвалы. Площадки должны иметь хорошее освещение в соответствии со СНиП.

Перечисленные характеристики подготовленности условий являются нормой для безопасной и эффективной эксплуатации карьерных автосамосвалов. Отклонения от них снижают качество условий, что приводит к существенным потерям различных видов ресурсов [7, 8].

Исходя из изложенного подхода, была разработана шкала для оценки подготовленности условий транспортирования на Солнцевском угольном разрезе (табл. 2).

Таблица 2. Шкала оценки подготовленности условий транспортирования на Солнцевском угольном разрезе
Table 2. The assessment scale of preparedness of transportation conditions at the Solntsevsky Coal Mine

Забой		Дорога		Отвал		Площадка для пересменки	
Параметры забоя соответствуют паспорту. Забой удобен для постановки автосамосвала под погрузку и маневров, подъезд – для заезда и выезда из забоя	4 балла	Ширина позволяет нормально двигаться большегрузному транспорту и вспомогательной технике. Профиль выдержанный, соответствует паспорту	4 балла	Устойчивый (скальный грунт), хорошо спланированный и обозначенный знаками. Удобная зона выгрузки с предохранительным валом и хорошим освещением	4 балла	Удобно размещается весь транспорт, хорошее освещение	4 балла
Параметры забоя соответствуют паспорту, но для постановки автосамосвала под погрузку требуются излишние маневры. Подъезд с незначительными отклонениями от паспорта, требующими от водителя излишнего внимания	3 балла	Позволяет нормально двигаться большегрузному транспорту. Профиль вызывает излишнюю нагрузку на автосамосвала	3 балла	Достаточно устойчивый (скальный грунт и др.) и спланированный. Зона выгрузки с предохранительным валом, но требует дополнительных маневров. Освещение удовлетворительное	3 балла	Размещается весь транспорт, но скученно. Удовлетворительное освещение	3 балла
Параметры забоя отклоняются от паспорта, что значительно затрудняет подъезд, постановку под погрузку и выезд автосамосвала. Подъезд требует повышенного внимания водителя при заезде и выезде из забоя	2 балла	Узкая дорога, требующая значительного замедления скорости. Профиль вызывает значительную нагрузку на автосамосвала	2 балла	Неустойчивый (глина), удовлетворительно спланированный. Зона выгрузки с продавливаниями, слабым или ослепляющим освещением, требует значительного ожидания для выгрузки автосамосвала	2 балла	Не размещается весь транспорт, часть пересменки осуществляется в забое, есть частичное освещение	2 балла
Узкий забой, стесненные условия, много неровностей на площадке. Узкий и неудобный подъезд, требует особого внимания водителя при заезде и выезде с погрузки	1 балл	Узкая проезжая часть, требующая остановки транспортных средств для пропуска встречного транспорта. Невыдержанный профиль с максимальными уклонами	1 балл	Неустойчивый (глина), плохо спланированный. Зона выгрузки неудобная с продавливаниями, отсутствием освещения и предохранительного вала, с постоянными ожиданиями самосвалов для выгрузки	1 балл	Нет специальной площадки, пересменка осуществляется в забое, на отвале, дороге, нет освещения	1 балл

Применение шкалы оценки условий транспортирования

Разработанная шкала опробована при оценке подготовленности условий на Солнцевском угольном разрезе. Общая протяженность карьерных автодорог разреза составляет около 64 км. Количество забоев варьирует в диапазоне от 25 до 34. Автосамосвалами перевозится более 140 млн м³ горной массы. Вскрышные породы размещаются на трех отвалах.

На первом этапе оценки условий транспортирования для получения общего представления о состоянии их подготовленности был проведен опрос экспертов: 4 руководителя участков технологического автотранспорта («эксплуатируют» дороги забойные, отвальные, основные), 3 руководителя участков открытых горных работ (отвечают за состояние забойных дорог), руководитель дорожного участка (отвечает за строитель-

ство и поддержание основных дорог), заместитель директора разреза по ОТ, ПБ и ЧС (отвечает за состояние системы обеспечения безопасности на разрезе). Результаты опроса представлены на рис. 1.

На высоком и среднем уровнях качества, по оценкам экспертов, находится от 30 до 78% забоев (отличие 2,6 раза), от 37 до 78% – основных дорог (отличие 2,1 раза), от 10 до 68 % – отвалов (отличие 6,8 раза), от 15 до 30% – площадок для пересменки (отличие 2,0 раза). Значительный разброс мнений руководителей, деятельность подразделений которых связана с состоянием подготовленности условий транспортирования, могут свидетельствовать об отсутствии единого представления об уровне качества подготовленности этих условий, что может привести к рискам принятия некорректных управленческих решений [9, 10].

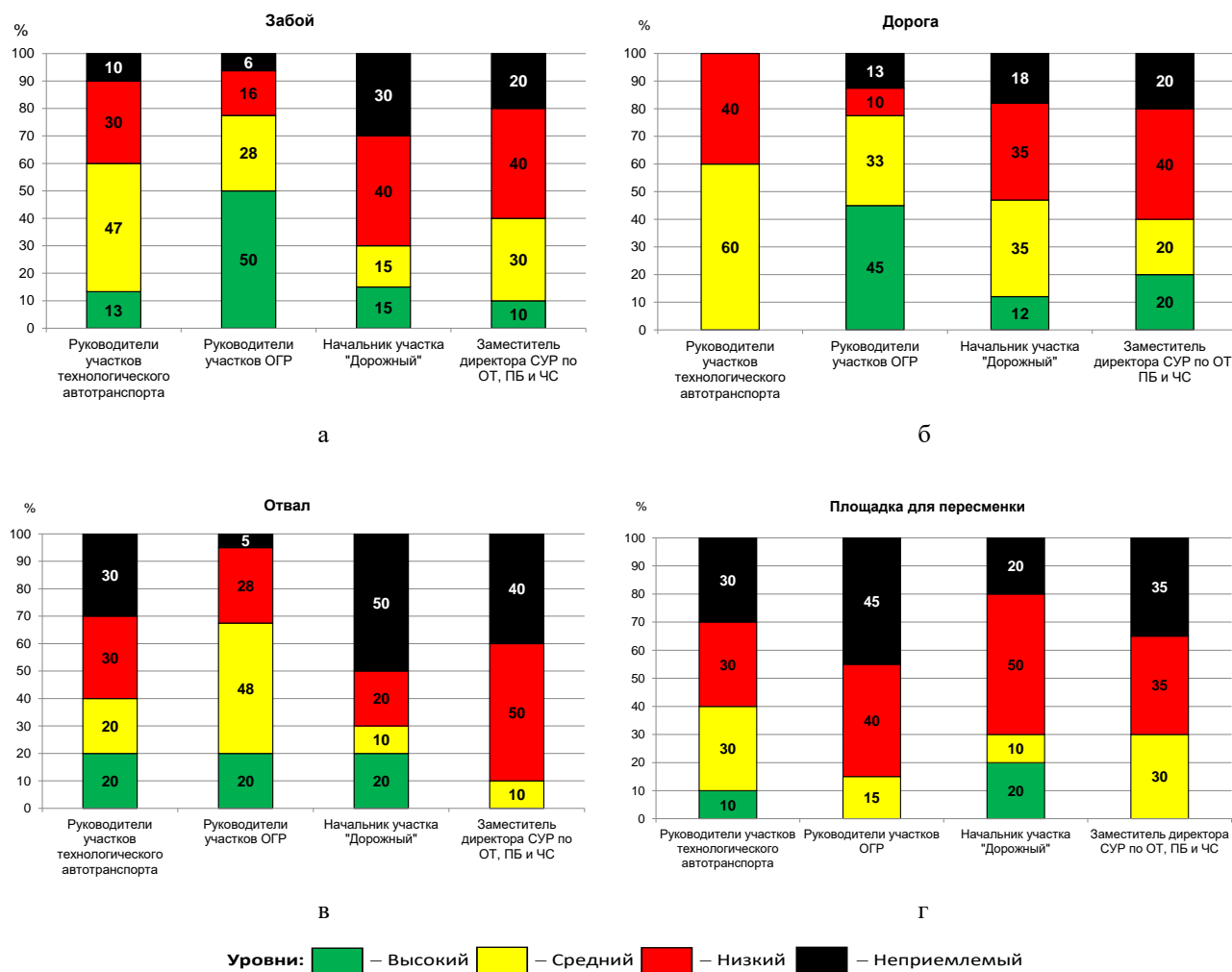


Рис. 1. Результаты экспертной оценки подготовленности условий транспортирования
 Fig. 1. An expert assessment of preparedness of transportation conditions

На втором этапе для получения конкретных данных был организован выезд в разрез руководителей и специалистов СУР и института НИИОГР. Для оценки были выбраны характерные забои, дороги, отвалы. В процессе определения состояния условий проводилась видеосъемка процессов погрузки, транспортирования и разгрузки, которая необходима для предметного анализа. Каждый участник, имея на ру-

ках табл. 1, записывал в нее свои оценки. Эти оценки между собой значительно отличались, что потребовало проведения процедуры соотнесения и согласования результатов с использованием видео.

Итоговые согласованные результаты оценки забоев, основных дорог, отвалов и площадок для пересменки представлены в табл. 3 и на рис. 2.

Таблица 3. Результаты экспертной оценки подготовленности условий транспортирования на объектах Солнцевского угольного разреза (25-27 мая 2023 г.)

Table 3. An expert assessment of preparedness of transportation conditions at the facilities of the Solntsevsky Coal Mine (May 25-27, 2023)

Забой	Дорога	Отвал	Площадка для пересменки
	От ДСК до поворота на п. Полтавка		
	Много таких участков	«Федора»	
РС-3000 N 90 вскр., РС-1250 N 17 уголь; РС-2000 N 4 уголь	Немало таких участков, особенно на крутых поворотах, на подъём	Внутренний «Верхний»	Поворот на п. Полтавка
Либхер 9400 N7, вскр., РС 2000 N 43 вскр., EX 1200 N15 уголь	В районе экскаваторов N 4, 15, 17, 90	Внутренний «Нижний»	

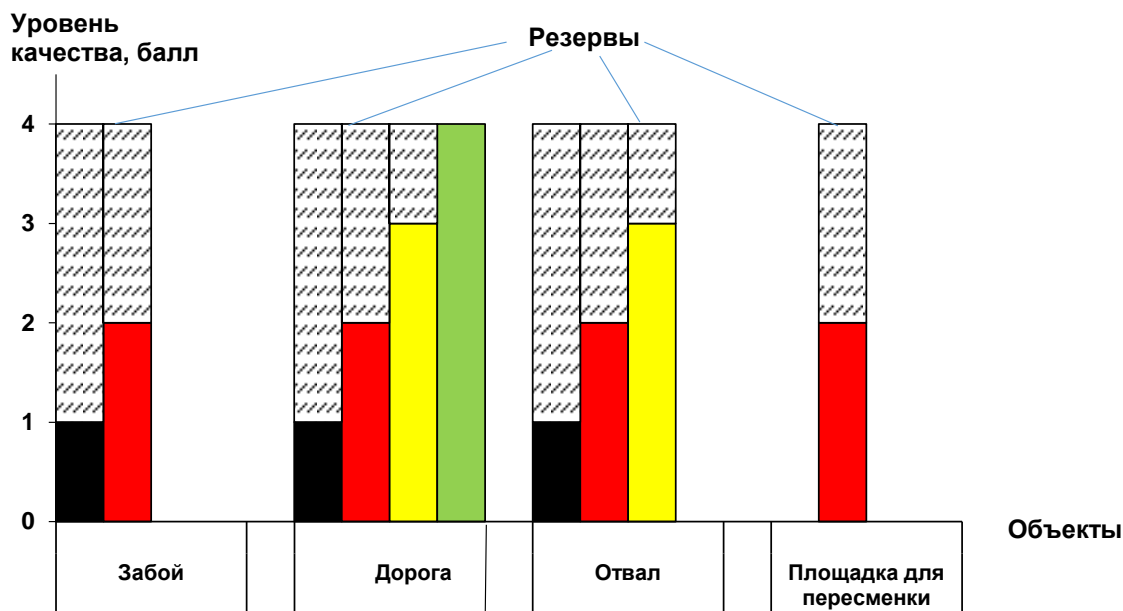


Рис. 2. Резервы повышения качества условий транспортирования на Солнцевском угольном разрезе (по результатам оценки на 25-27 мая 2023 г.)

Fig. 2. Reserves for improving the quality of transportation conditions at the Solntsevsky Coal Mine (based on the results of the assessment as of May 25-27, 2023)

На третьем этапе оценки условий транспортирования выполнен анализ полученных результатов. Из рис. 2 видно, что наиболее существенные резервы в части повышения качества условий, а следовательно, и снижения потерь имеются в подготовленности забоев. Дороги и отвалы характеризуются широким спектром условий – от неприемлемого до высокого уровня качества. Это свидетельствует не только о резервах производства, но и о том, что на предприятии имеется опыт достижения высокого качества условий для транспортирования в рамках текущей деятельности с приемлемыми затратами. Его необходимо закрепить в планировании, организации и проектировании производственной деятельности [11, 12].

Результаты применения методики

Результаты разработки и опробования методики оценки условий позволили сформулировать ряд взаимосогласованных задач, решение которых позволяет планомерно улучшать условия транспортирования:

- руководителям и специалистам, осуществляющим эксплуатацию карьерных автосамосвалов, необходимо обучиться и освоить методику оценки состояния подготовленности условий транспортирования;
- организовать и наладить ежесменный учет в форме «Светофор» состояния: забоев, дорог, отвалов, мест пересменки;
- наладить систему предоставления информации о состоянии условий транспортирования службам, задействованным в организации и мониторинге погрузки и перевозки горной массы карьерными автосамосвалами;
- наладить систематическое рассмотрение на производственных совещаниях с персоналом служб, задействованных в подготовке и использовании этих условий, результатов работы по повышению их качества.

Выводы

Значительная стоимость карьерных автосамосвалов, а следовательно, и их ремонта обуславливают необходимость более тщательной подготовки условий эксплуатации. Опробование методики оценки качества условий эксплуатации карьерного автотранспорта показало необходимость проведения процедуры согласования оценок экспертов для обеспечения единого представления об уровне качества подготовленности условий, что является позитивным импульсом, обеспечивающим согласованную и корректную выработку рациональных и эффективных управленческих решений.

Освоение предлагаемой методики позволяет в режиме мониторинга достаточно просто и корректно определять уровень качества состояния условий эксплуатации самосвалов с использованием соответствующей 4-уровневой шкалы, выявлять резервы улучшений и намечать пути по их использованию с приемлемыми затратами ресурсов.

По мере освоения предлагаемой методики и по-

лучения навыков в ее применении, обеспечивающих устранение очевидных отклонений в состоянии всех объектов условий транспортирования, целесообразно рассмотреть возможность закономерного перехода к более точным и объективным, но и более затратным инструментальным способам оценки условий.

Список источников

1. Довженок А.С. Развитие теории и методов управления автотранспортной системой горнодобывающего предприятия: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2002. 229 с.
2. Кулешов А.А., Зырянов Н.В. Оценка ресурса базовых узлов карьерных автосамосвалов // Цветная металлургия. 1994. №11/12. С. 30-32.
3. Кулешов А.А. Влияние ровности карьерных дорог на эффективность эксплуатации автосамосвалов особо большой грузоподъемности // Горный журнал. 1995. №6. С. 14-16.
4. Самойленко А.Г., Черкасов В.Б., Пронин А.С. Влияние профиля автодороги на производительность автосамосвала // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. №S50. С. 230-236. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-50-216-236. EDN VWDBHK
5. Enhanced mine road monitoring using unmanned aerial vehicles and deep-learning approach / Zola Saputra, Anjar Dimara Sakti, Ardila Firmana, Marulitua Ignatius, Arie Naftali Hawu Hede, Asep Saepuloh // Remote Sensing Applications: Society and Environment. November 2023, vol. 32, 101080, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101080>
6. Методика повышения качества трудовых процессов / В.Н. Кулецкий, С.В. Жунда, А.С. Довженок, А.В. Галкин, М.Н. Полещук // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. №9 (специальный выпуск 42). 40 с.
7. Килин А.Б. Научное обоснование системы непрерывного совершенствования производственного процесса открытой угледобычи: дис. ... д-ра техн. наук. Спец.: 05.02.22 / Килин Алексей Богданович. Екатеринбург, 2021. 296.
8. К вопросу применения принципов бережливого производства в процессе эксплуатации карьерных автосамосвалов на угольных разрезах / А.В. Кудреватых, М.В. Дадонов, А.С. Ащеулов, Н.В. Кудреватых // Уголь. 2024. №1. С. 64-69. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-64-69
9. Галкин А.В., Смолин А.В., Неволлина Е.М. Управление производственным риском как элемент проектирования системы обеспечения безопасности труда горнодобывающего предприятия, обеспечивающий надежность ее функционирования // Горная промышленность. 2022. №S1. С. 86-94. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-S1-86-94
10. Nguembi Ines Pamela, Yang Li, Appiah Vincentia Serwah. Safety and risk management of Chinese enterprises in Gabon's mining industry // Heliyon. 2023,

vol. 9, iss. 10, e20721, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20721>

11. Черских О.И., Минаков В.С., Макаров А.М. Повышение качества трудовых процессов – средство планомерного снижения рисков травмирования персонала угольного разреза // *Безопасность труда в промышленности*. 2023. №2. С. 28-32. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-2-28-32
12. Кравчук И.Л., Смолин А.В. О целесообразности проектирования системы обеспечения безопасности труда на угледобывающем предприятии // *Проблемы недропользования-1: Спецвыпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня*. 2021. №5-1. С. 316-325. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_316
1. Dovzhenok A.S. *Razvitie teorii i metodov upravleniya avtotransportnoy sistemoy gornodobyvayushchego predpriyatiya: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Development of theory and methods of management of the motor vehicle system of a mining enterprise. Doctoral thesis]. Saint Petersburg, 2002. 229 p.
2. Kuleshov A.A., Zyryanov N.V. Assessment of the resource of the basic nodes of quarry dump trucks. *Tsvetnaya metallurgiya* [Non-Ferrous Metallurgy]. 1994;(11/12):30-32. (In Russ.)
3. Kuleshov A.A. The influence of quarry road smoothness on efficiency of the operation of dump trucks with especially high load capacity. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 1995;(6):14-16. (In Russ.)
4. Samoylenko A.G., Cherkasov V.B., Pronin A.S. The influence of the highway profile on the performance of dump trucks. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2018;(S50):230-236. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-50-216-236. EDN: VWDBHK.
5. Zola Saputra, Anjar Dimara Sakti, Ardila Firmana, Marulitua Ignatius, Arie Naftali Hawu Hede, Asep Saepuloh. Enhanced mine road monitoring using unmanned aerial vehicles and deep-learning approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2023;32:101080. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101080>
6. Kuletsky V.N., Zhunda S.V., Dovzhenok A.S., Galkin A.V., Poleshchuk M.N. Methods of improving the quality of labor processes. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2018;(9 (special issue 42)). Moscow: Gornaya kniga, 2018, 40 p. (In Russ.)
7. Kilin A.B. *Nauchnoe obosnovanie sistemy nepreryvnogo sovershenstvovaniya proizvodstvennogo protsessa otkrytoy ugledobychi: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific rationale for the system of continuous improvement of the open-pit coal mining production process. Doctoral thesis]. Yekaterinburg, 2021. 296 p.
8. Kudrevatykh A.V., Dadonov M.V., Ashcheulov A.S., Kudrevatykh N.V. On the issue of applying the principles of lean production in the operation of quarry dump trucks at opencast coal mines. *Ugol* [Coal]. 2024;(1):64-69. (In Russ.) DOI: 10.18796/0041-5790-2024-1-64-69
9. Galkin A.V., Smolin A.V., Nevolina E.M. Production risk management as an element of the design of the occupational safety system of a mining enterprise, ensuring reliability of its functioning. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2022;(S1):86-94. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-86-94
10. Nguembi Ines Pamela, Yang Li, Appiah Vincentia Serwah. Safety and risk management of Chinese enterprises in Gabon's mining industry. *Heliyon*. 2023;9(10):e20721. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20721>
11. Cherskikh O.I., Minakov V.S., Makarov A.M. Improving the quality of labour processes is a means of a gradual mitigation of risks of injuries of coal mine personnel. *Bezopasnost truda v promyshlennosti* [Occupational Safety in the Industry]. 2023;(2):28-32. (In Russ.) DOI: 10.24000/0409-2961-2023-2-28-32
12. Kravchuk I.L., Smolin A.V. On feasibility of designing a labour safety system at a coal mining enterprise. *Problemy nedropolzovaniya-1: Spets. vypusk Gornogo informatsionno-analiticheskogo byulletenya* [Problems of Subsoil Use-1: a special issue of Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2021;(5-1):316-325. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_316

Поступила 23.01.2024; принята к публикации 20.03.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 23/01/2024; revised 20/03/2024; published 27/06/2024

Черских Олег Иванович – кандидат технических наук, директор, ООО «Солнцевский угольный разрез», Шахтерск, Россия. Email: cherskikhoi@eastmining.ru

Минаков Василий Сергеевич – директор по ОТ и ПБ, Восточная горнорудная компания, Шахтерск, Россия. Email: minakovvs@eastmining.ru

Довженок Александр Сергеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Челябинский филиал Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Челябинск, Россия. Email: dovgenok@bk.ru. ORCID 0000-0001-9725-4733

Oleg I. Cherskikh – PhD (Eng.), Director, Solntsevsky Coal Mine LLC, Shakhtersk, Russia.

Email: cherskikhoi@eastmining.ru.

Vasilii S. Minakov – Occupational and Industrial Safety Director, East Mining Company, Shakhtersk, Russia.

Email: minakovvs@eastmining.ru.

Aleksandr S. Dovzhenok – DrSc (Eng.), Chief Researcher, Chelyabinsk Branch of the Institute of Mining,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Chelyabinsk, Russia.

Email: dovgenok@bk.ru. ORCID 0000-0001-9725-4733



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

УДК 622.765

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-49-57

ОБОСНОВАНИЕ СВЯЗИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ МЕЖФАЗНОЙ ПЛЕНКИ СО СКОЛЬЖЕНИЕМ ЖИДКОСТИ

Евдокимов С.И.¹, Герасименко Т.Е.¹, Горлова О.Е.², Орехова Н.Н.³

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

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

³ Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Работа направлена на обоснование связи предельной толщины смачивающей пленки со скольжением жидкости и разработку выражения для поправки на термическое скольжение жидкости на гидрофобной поверхности к силе гидродинамического сопротивления утончению смачивающей пленки. **Цель работы.** Получение новых знаний в области устойчивости смачивающих пленок, осложненной учетом скольжения жидкости, имеет целью разработку эффективной технологии извлечения микродисперсий золота методом флотации. **Используемые методы.** Выражение для поправки к силе гидродинамического сопротивления утончению смачивающих пленок получено путем совместного решения уравнения Навье-Стокса, записанного для исследуемых условий, и уравнения неразрывности для несжимаемой жидкости. **Натурные эксперименты** по флотации выполнены на пробах руд двух участков Березняковского золоторудного месторождения. В опытах по флотации использовали лабораторную установку на основе флотомашинного типа квадратного сечения размером 47×47 мм. **Новизна.** Выявлено, что влияние скольжения жидкости на снижение предельной толщины смачивающей пленки заключается в уменьшении силы гидродинамического сопротивления удалению жидкости из межфазного зазора термокапиллярным, термоосмотическим и капиллярно-концентрационным поверхностным течением. **Результат.** Получено выражение для поправки на скольжение к силе гидродинамического сопротивления в процессе взаимодействия частицы с пузырьком. С целью использования эффекта скольжения флотацию выполняют термонагруженными пузырьками, смешивая воздух, поступающий во флотомашину, с горячим водяным паром. В этом случае температура воды в граничных слоях пузырьков увеличивается за счет теплоты конденсации пара, что интенсифицирует эффект скольжения. **Практическая значимость.** Проведены натурные испытания разработанной технологии на двух пробах золотосодержащей руды, результаты которых доказывают ее эффективность.

Ключевые слова: флотация, межфазная пленка, скольжение, поправка, сила гидродинамического сопротивления, паровоздушная смесь, золотосодержащая руда, натурные эксперименты

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения №23-27-00093 «Теоретическое и экспериментальное обоснование механизма поверхностных сил в процессах коагуляции и флотации в условиях теплового воздействия на смачивающие пленки для создания и промышленного освоения технологических процессов эффективного извлечения микродисперсий золота из руд и россыпей».

© Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н., 2024

Для цитирования

Обоснование связи предельной толщины межфазной пленки со скольжением жидкости / Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е., Горлова О.Е., Орехова Н.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 49-57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-49-57>



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

PROVIDING A RATIONALE FOR THE RELATIONSHIP BETWEEN LIMIT INTERFACIAL FILM THICKNESS AND SLIP OF LIQUID

Evdokimov S.I.¹, Gerasimenko T.E.¹, Gorlova O.E.², Orekhova N.N.³

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

³ Melnikov Institute of Comprehensive Subsoil Development, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The research is aimed at providing rationale for the relationship between limit thickness of a wetting film and slip of liquid and developing an expression to correct for the thermal slip of liquid on a hydrophobic surface to force of hydrodynamic resistance to thinning of the wetting film. **Objectives.** Obtaining new knowledge in the field of stability of wetting films complicated by taking into account the slip of liquid aims at developing an efficient technology for the extraction of gold microdispersions by flotation. **Methods Applied.** The expression for the correction to force of hydrodynamic resistance to thinning of wetting films is obtained by solving simultaneous equations, namely the Navier-Stokes equation, written for the conditions under study, and the continuity equation for incompressible liquid. In-situ flotation experiments were performed on ore samples from two sections of the Berezhnyakovskoe gold deposit. The experiments on flotation were carried out on a laboratory unit based on a column-type flotation machine of a square cross-section, 47x47 mm. **Originality.** It has been revealed that the influence of slip of liquid on reduction of limit thickness of the wetting film consists in reduced force of hydrodynamic resistance to liquid removal from the interfacial gap by thermocapillary, thermoosmotic and capillary concentration surface flows. **Result.** The authors obtained an expression for the correction for slip to hydrodynamic resistance force in the process of the interaction between a particle and a bubble. In order to use the effect of sliding, flotation is performed by thermally loaded bubbles, mixing air entering the flotation machine with hot water vapor. In this case, water temperature in the boundary layers of bubbles increases due to steam condensation heat, which intensifies the slip effect. **Practical Relevance.** Field tests of the developed technology were conducted on two samples of gold-bearing ore, and their results prove its efficiency.

Keywords: flotation, interfacial film, slip, correction, hydrodynamic resistance force, steam-air mixture, gold-bearing ore, full-scale experiments

The study was supported by the Russian Science Foundation under agreements No.23-27-00093 “Theoretical and experimental rationale for the mechanism of surface forces in the processes of coagulation and flotation under conditions of thermal effect on wetting films to create and learn industrial technological processes for the efficient recovery of gold microdispersions from ores and placers”.

For citation

Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E., Gorlova O.E., Orekhova N.N. Providing a Rationale for the Relationship Between Limit Interfacial Film Thickness and Slip of Liquid. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 49-57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-49-57>

Введение

Флотация остается основным процессом, применяемым при обогащении руд, что объясняется высокой эффективностью разработанных и применяемых технологий, основанных на результатах исследований процессов разделения минералов по смачиваемости на микро- и молекулярном уровнях [1-3]. Причем уменьшение размеров флотационной дисперсной фазы является причиной роста влияния поверхностных сил [4-7], баланс которых определяет селективность разделения мелких (безынерционных) частиц [8-12]. Очевидными решениями проблемы флотации мелких частиц [13-15] является применение нанопузырьков [16-21] или предварительная агрегация мелких частиц [22, 23].

При взаимодействии гидрофобных частиц снижению гидродинамического сопротивления течению жидкости в зазоре между частицами способствует

скольжение жидкости [24-26].

То, что флотация малых частиц – качественно новый процесс, доказывает применение при обсуждении результатов ее исследования специальной терминологии: «микрофлотация» [22] и флотация «безынерционных» частиц [27]. В терминах современной физикохимии экспериментальные данные по агрегации гидрофильных частиц осуществляют с привлечением теории ДЛФО. Однако в случае агрегации и флотации гидрофобных частиц для согласования теории и эксперимента необходимо применять новые механизмы далекодействующих поверхностных сил, объединенных в литературе общим названием «не-ДЛФО»-силы [28-30], учитываемых расширенной теорией ДЛФО (XDLVO [5, 31, 32]).

Было показано, что для дополнения сил, участвующих в разделении минералов, поверхностными силами, отличающимися высокой чувствительностью

к температуре, достаточно нагреть вблизи пузырька слой воды толщиной от 4 до 8 нм, внутри которого локализовано действие поверхностных сил. В настоящей работе нагрев воды в граничных слоях пузырьков осуществляют, выполняя аэрацию пульпы смесью воздуха с горячим ($\geq 104^\circ\text{C}$) водяным паром (паровоздушной смесью).

Цель работы – разработка поправки на термическое скольжение вязкой жидкости на гидрофобной поверхности при гидродинамическом взаимодействии частицы и пузырька в процессах флотации микродисперсий золота с применением режима аэрации пульпы паровоздушной смесью.

Теоретические положения

При флотации значение адсорбции Γ вдоль поверхности пузырьков непрерывно изменяется так, что адсорбция на периферии межфазной пленки оказывается выше, чем в тот же момент в центре пленки (рис. 1):

$$\Gamma(0,t) < \Gamma(a,t). \quad (1)$$

Разница $\delta\Gamma(r,t) = \Gamma(r,t) - \Gamma(a,t)$ является причиной появления напряжений сдвига и связанных с ними поверхностных течений Марангони – движущей силы процесса стабилизации межфазной пленки.

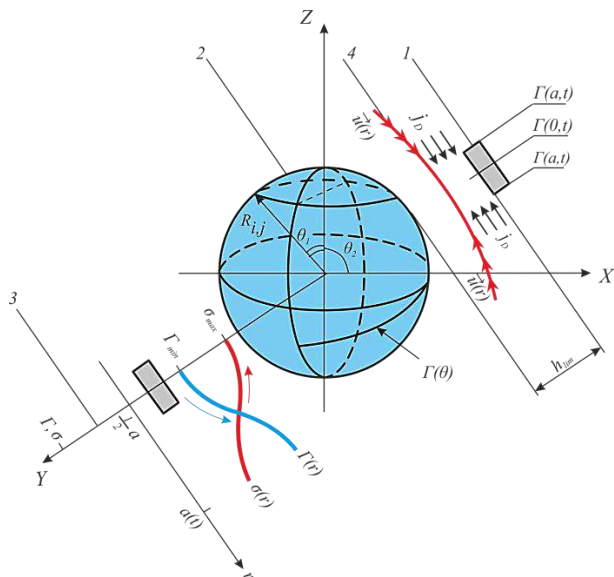


Рис. 1. Схема появления поверхностных течений Марангони при гидродинамическом взаимодействии твердой частицы (1) и пузырька воздуха (2): 1 – твердая частица; 2 – пузырек газа; 3 – распределение адсорбции $\Gamma(r)$ и поверхностного натяжения $\sigma(r)$; 4 – втекание жидкости в межфазный зазор

Fig. 1. Scheme of the surface Marangoni currents at a hydrodynamic interaction of a solid particle (1) and an air bubble (2): 1 is a solid particle, 2 is a gas bubble, 3 is a distribution of adsorption $\Gamma(r)$ and surface tension $\sigma(r)$, 4 is liquid inflow into the interfacial gap

Взаимодействие частицы с поверхностью пузырька завершается формированием между ними пленки жидкости, предельная толщина которой h_{lim} может быть найдена из условия равенства нулю потока жидкости через любое цилиндрическое сечение пленки [33]:

$$h_{\text{lim}} = \pi R_b \cdot \frac{9}{48} \cdot \frac{\gamma}{\eta} \cdot \frac{a}{b} \cdot \text{tg}^2 \cdot \frac{\theta}{2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\mu_n^2 (1 + \mu_n^2 \chi) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где γ – коэффициент торможения поверхности пузырька, связанный с динамической вязкостью жидкости η соотношением $\gamma/\eta = 0,3$; μ_n – корни функции Бесселя первого рода; $a/b = 3$ – коэффициент уплотнения зерна золота; τ_b – время ближнего гидродинамического взаимодействия частицы с пузырьком;

$\tau_D = \frac{b}{v_\Gamma} + \frac{b}{v_T} + \frac{b}{v_\chi}$ – время релаксации к состоянию

нового равновесия пленки (время, в течение которого объем вытекающей жидкости отличается не более чем на 1% от полного изменения объема при переходе пленки из одного состояния равновесия в другое); $\chi = \tau_b/2\tau_D$; $v_\Gamma = R_b \cdot \eta^{-1} (\partial\sigma/\partial C) \Delta C$ – скорость капиллярно-концентрационного потока [48, 49]; $v_T = R_b \cdot \eta^{-1} (\partial\sigma/\partial T) \Delta T$ – скорость термокапиллярного потока; $v_\chi = 2h \cdot \zeta \cdot R_b \cdot T / (\partial T/\partial R_b)$ – скорость термоосмотического потока; ΔT , ΔC – перепад по длине межфазной пленки температуры и концентрации ПАВ; $\zeta = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$ – коэффициент термоосмоса для воды.

Выведем выражение для поправки на термическое скольжение к силе, оказывающей гидродинамическое сопротивление удалению жидкости из межфазного зазора между частицей и пузырьком.

Для описания гидродинамического процесса в исследуемых условиях уравнение Навье-Стокса запишем в следующем виде [34]:

$$\mu \left(\left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} \right) e_r + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) e_z \right) - \frac{\partial p}{\partial r} e_r - \frac{\partial p}{\partial z} e_z = 0. \quad (3)$$

Тогда для компоненты e_r получается следующее уравнение:

$$\mu \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{\partial p}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости $\nabla \cdot v = 0$ в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (r v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Откуда для осесимметричных течений $v_\theta = 0$ следует

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rv_r)}{\partial r} = 0. \quad (6)$$

Интегрированием уравнения (4) получим соотношение для радиальной составляющей скорости потока жидкости:

$$v_r = \int \frac{\partial v_r}{\partial z} dz = \frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial r} \cdot \int (z + C_1) dz = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \left(\frac{1}{2} z^2 + C_1 z + C_2 \right). \quad (7)$$

Постоянные интегрирования даются соотношениями

$$z = 0, \quad \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \cdot C_2 - h_{\text{lim}} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \cdot C_1 = 0, \quad C_2 = h_{\text{lim}} \cdot C_1; \quad (8)$$

$$z = h, \quad \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \left(\frac{1}{2} h^2 + C_1 h + C_2 \right) = 0, \quad (9)$$

$$\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \neq 0, \quad \frac{1}{2} h^2 + C_1 h + C_2 = 0.$$

С учетом соотношений (8) и (9) несложно найти величины постоянных интегрирования

$$C_1 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{h^2}{h + h_{\text{lim}}}, \quad C_2 = -\frac{h_{\text{lim}}}{2} \cdot \frac{h^2}{h + h_{\text{lim}}}, \quad (10)$$

подстановкой которых в уравнение (7) оказывается возможным получить в удобной форме уравнения радиальной составляющей скорости потока

$$v_r = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \left(z^2 - \frac{h^2}{h + h_{\text{lim}}} \cdot z - \frac{h^2}{h + h_{\text{lim}}} \right) \quad (11)$$

и производной радиальной скорости потока

$$\frac{\partial v_r}{\partial z} = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \left(2z - \frac{h^2}{h + h_{\text{lim}}} \right). \quad (12)$$

Тогда интегрированием уравнения неразрывности (6) по z получим

$$\int_0^h \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \right) dz = \frac{h^3}{6\mu} \cdot \frac{h + 4h_{\text{lim}}}{h + h_{\text{lim}}} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2 (rp)}{\partial r^2}. \quad (13)$$

Обозначив через $K = \frac{h^3}{6\mu} \cdot \frac{h + 4h_{\text{lim}}}{h + h_{\text{lim}}}$, уравнение для давления в дифференциальной форме запишем в виде

$$K \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) = Ur. \quad (14)$$

Выражение для давления

$$p = \frac{U}{4K} \cdot r^2 + C_1 \ln(r) = C_2 \quad (15)$$

получим интегрированием дифференциального уравнения (14):

$$K \int \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) dr = \frac{U}{K} \int r dr. \\ r \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{U}{K} \cdot \frac{r^2}{2} + C_1, \quad (16) \\ \int \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{U}{2K} \int r dr + C_1 \int \frac{dr}{r}.$$

Для определения силы гидродинамического сопротивления, тормозящей движение твердой частицы, проинтегрируем выражение (16) по ее поверхности и после подстановки значения K получим:

$$F^* = -F \cdot \Phi = -\frac{3}{2} \pi \mu \cdot \frac{UR^4}{h^3} \cdot \Phi, \quad (17)$$

где Φ – искомая поправка на тепловое скольжение жидкости по гидрофобной поверхности, дается выражением

$$\Phi = \frac{h + h_{\text{lim}}}{h + 4h_{\text{lim}}}. \quad (18)$$

Поскольку поправка на скольжение (18) всегда меньше единицы, то ее влияние на эффективность образования флотокомплекса проявляется в снижении абсолютной величины h_{lim} (2) в результате уменьшения силы гидродинамического сопротивления (17) удалению жидкости из межфазного зазора между частицей и пузырьком. Если связать структуру воды в граничных слоях пузырьков (за слоем «связанной» воды размещены противоионы слоя Штерна [35]) с их «гидрофобностью», то для использования эффекта скольжения достаточно нагреть воду в слое толщиной 4-8 нм. С этой целью в качестве газовой фазы при флотации используют смесь воздуха с горячим водяным паром, теплота конденсации которого затрачивается на повышение температуры воды в граничных слоях пузырьков.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты расчета (в среде Maple 2021) значений предельной толщины межфазной пленки h_{lim} приведены на **рис. 2**.

Как следует из данных **рис. 2, а**, высокая вероятность осаждения мелких частиц на поверхность пузырька существует только вблизи его верхнего полюса. При перемещении частицы по поверхности пузырька к экватору сила гидродинамического сопротивления удалению жидкости из межфазного зазора увеличивается за счет выравнивания встречных потоков, образованных скольжением жидкости и конвекцией Марангони, и эффективность захвата становится ничтожно малой (**рис. 2, б**). Только при условии $\chi \gg 1$ (где χ – комплексный параметр, учитывающий различные механизмы скольжения – термокапиллярный, термоосмотический и капиллярно-концентрационный) движущей силой уменьшения предельной толщины смачивающей пленки h_{lim} является течение, направленное от ее центра к периферии (**рис. 2, в**).

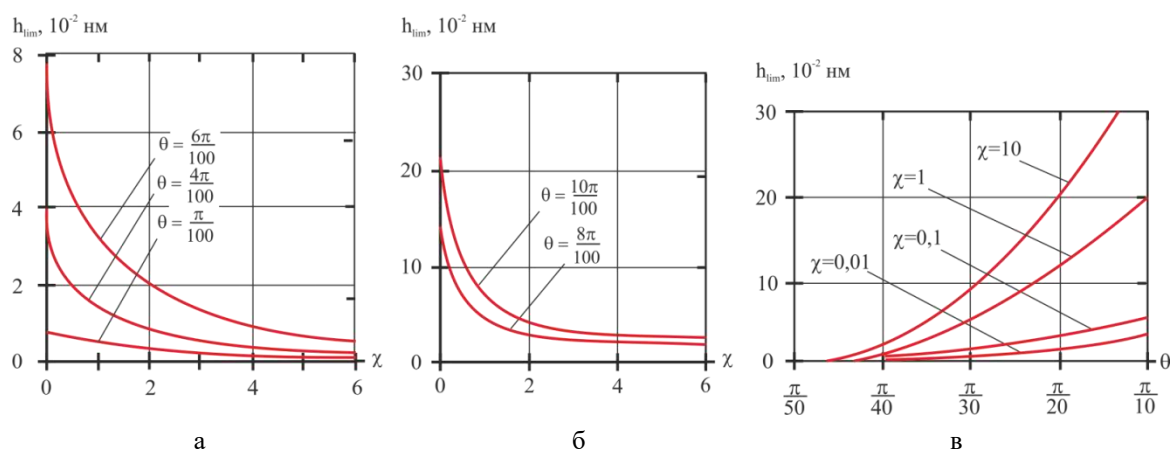


Рис. 2. Результаты анализа зависимости предельной толщины межфазной пленки h_{lim} от факторов флотации: зависимость h_{lim} от величины поправки на стабилизацию межфазной пленки $\chi = \tau_b/2\tau_D$ (при угле встречи θ частицы с пузырьком от $\pi/100$ до $6\pi/100$) (а) и при угле встречи θ от $8\pi/100$ до $10\pi/100$) (б) и от угла встречи θ частицы с пузырьком (при изменении величины поправки на стабилизацию межфазной пленки χ от 0,01 до 10) (в)

Fig. 2. Results of the analysis of the dependence between limit interfacial film thickness h_{lim} and flotation factors: dependence between h_{lim} and interfacial film stabilization correction $\chi = \tau_b/2\tau_D$ (at impact angle θ of the particle with the bubble from $\pi/100$ to $6\pi/100$) (a) and at impact angle θ from $8\pi/100$ to $10\pi/100$) (б) and impact angle θ of the particle with the bubble (when changing interfacial film stabilization correction χ from 0.01 to 10) (в)

Изменение предельной толщины межфазной пленки h_{lim} в координатах $\frac{\tau_b}{\tau_D} - \theta$ приведено на рис. 3. Гра-

фики рис. 3 не противоречат графикам рис. 2. Таким образом, следствием нагрева воды в граничных слоях пузырьков является высокая скорость ее удаления из смачивающих пленок интенсивным скольжением.

При флотации руд пробы-1 по технологической схеме, принятой на действующей золотоизвлекательной фабрике, в товарный концентрат извлечено 82,93% золота при выходе концентрата 3,07% и содержании 20,80 г/т золота. Эксперименты выполнены по принципу непрерывного процесса.

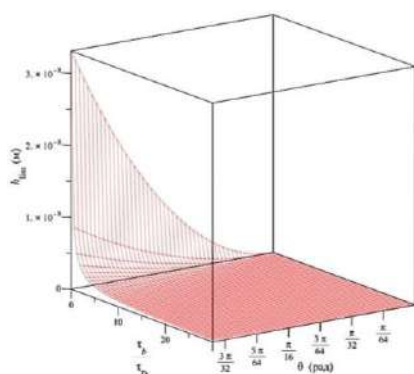


Рис. 3. Результаты анализа h_{lim} в координатах $\frac{\tau_b}{\tau_D} - \theta$

Fig. 3. Results of h_{lim} analysis in coordinates $\frac{\tau_b}{\tau_D} - \theta$

При флотации по схеме рис. 4 использован режим флотации паровоздушной смесью: при каждом смешении черного концентрата с исходной рудой в течение короткого периода времени (15-20% от общего) в качестве газовой фазы использовали паровоздушную смесь. В этом случае достигался максимум синергетического эффекта – от увеличения содержания Au от 0,77 до 1,22 г/т (при первом смешении черного концентрата с исходной рудой) и до 1,62 г/т при втором смешении (то есть на 58,4 и 110,4 отн.% по отношению к исходной руде) и аэрации пульпы паровоздушной смесью. При этом операционное извлечение Au увеличивалось от 83,74 до 91,28 и 94,40% соответственно. В опыте, выполненном в замкнутом цикле (7 параллельных навесок), извлечение Au в товарный концентрат составило 87,62% при содержании 27,65 г/т Au при уменьшении выхода концентрата $\Delta\gamma$ на 20,52 отн.%.

При флотации руд пробы-2 (0,96 г/т Au в руде) при сохранении достигнутого по базовой технологии уровня извлечения Au (74,95%) применение режима флотации пузырьками воздуха, заполненными горячим водяным паром, при двукратном смешении черного концентрата с исходным питанием позволяет получить прирост содержания золота в черном концентрате с 4,97 до 6,29 г/т (степень концентрации золота увеличивается с 5,199 до 6,579) при снижении выхода концентрата.

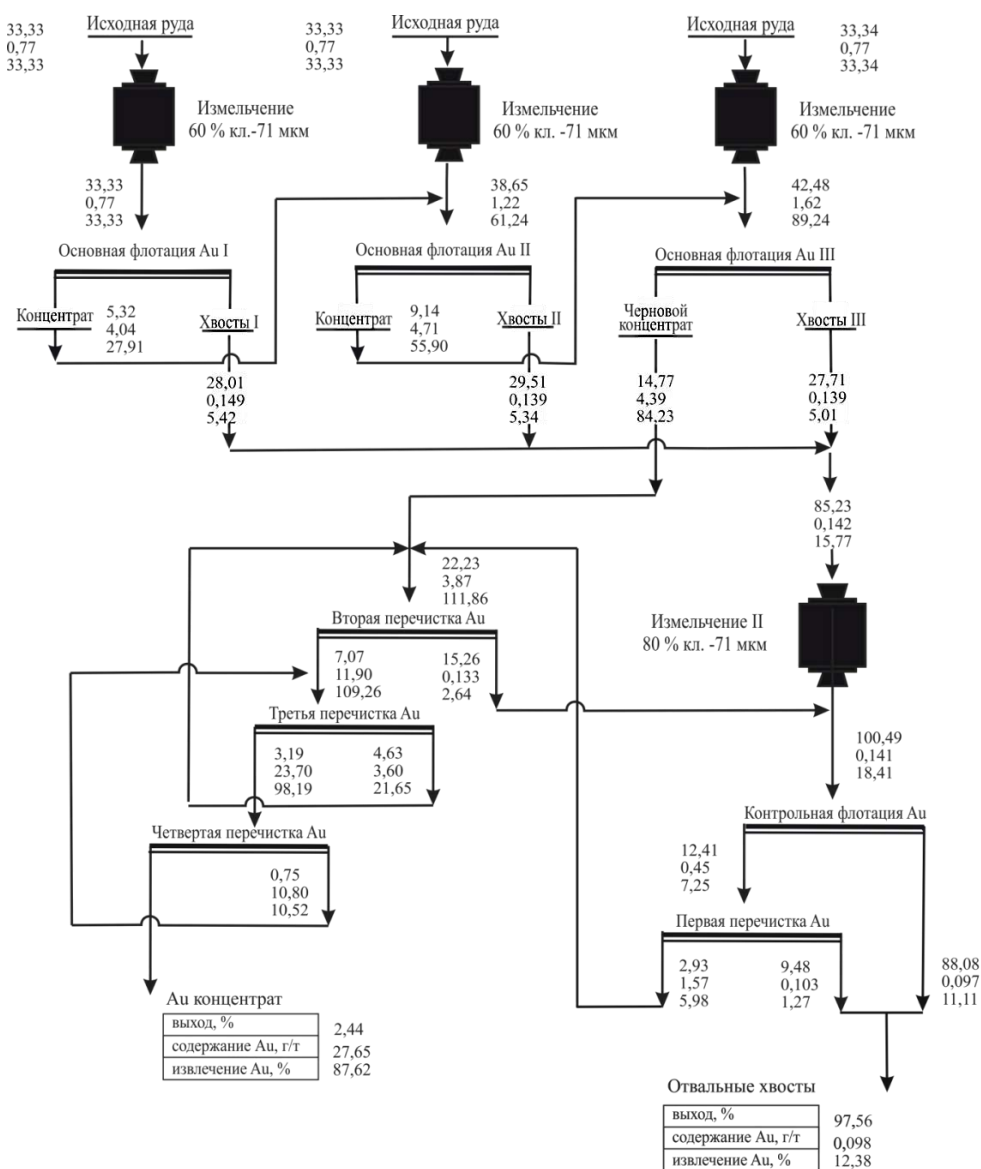


Рис. 4. Результаты обогащения пробы-1 в опыте, моделирующем замкнутый цикл
 Fig. 4. Results of sample 1 enrichment in the experiment simulating the closed cycle

Заключение

Получено выражение для поправки на термическое скольжение к гидродинамической силе сопротивления утончению смачивающей пленки. Величина поправки выражается в долях критической толщины смачивающей пленки: на этих расстояниях между частицей и пузырьком начинает проявляться действие поверхностных сил структурного происхождения – сил гидрофобного притяжения и гидрофильного отталкивания. Поправка, абсолютная величина которой меньше единицы, учитывает три механизма поверхностных течений жидкости в межфазном зазоре – термокапиллярный, термоосмотический и капиллярно-концентрационный.

С целью использования эффекта скольжения для повышения эффективности разделения минералов в качестве газовой фазы при флотации используют

смесь воздуха с горячим водяным паром. В этом случае температура воды в граничных слоях пузырьков увеличивается за счет теплоты конденсации пара, что интенсифицирует эффект скольжения.

При выполнении натуральных экспериментов на руде пробы-1 технологический эффект от использования разработанной технологии заключался в уменьшении выхода концентрата на 20,52 отн.% и увеличении извлечения золота на 4,69 абс.% в сравнении с базовой технологией.

Эффективность разработанной технологии при флотации руд пробы-2 (0,96 г/т Ау в руде) проявлялась в том, что при сохранении достигнутого по базовой технологии уровня извлечения Ау (74,95%) степень концентрации золота в операции основной флотации увеличивалась с 5,199 до 6,579 при снижении выхода концентрата.

Список источников

1. Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives / Xie L., Wang J., Lu Q., Hu W., Zeng H. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 295, 102491.
2. Determination and modulation of the typical interactions among dispersed phases relevant to flotation applications / Li D., Wang H., Li C., Liang Y., Yan X., Zhang H. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 288, 102359.
3. Flotation surface chemistry of water-soluble salt minerals: from experimental results to new perspectives / Sun K., Nguyen C.V., Nguyen N.N., Nguyen Anh V. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2022, vol. 309, 102775.
4. Enhancing flotation separation of fine copper oxide from silica by microbubble assisted hydrophobic aggregation / Long Q., Wang H., Jiang F., Tan W., Xu Z. // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 189, 107863.
5. Li Z., Yoon R.-H. AFM force measurements between gold and silver surface treated in ethyl xanthatesolutions: Effect of applied potentials // *Minerals Engineering*. 2012, vol. 36-38, pp. 126-131.
6. Attraction between hydrophobic surface studied by atomic microscopy / Nguyen A.V., Nalaskowski J., Miller J.D., Butt H.-J. // *International Journal of Mineral Processing*. 2003, vol. 72, iss. 1-4, pp. 215-225.
7. Hu P., Liang L. The role of hydrophobic interaction in the heterocoagulation between coal and quartz particles // *Mineral Engineering*. 2020, vol. 154, 106421.
8. Understanding the hetero-aggregation mechanism among sulfide and oxide minerals particles driven by bifunctionalsurfactants: Intensification flotation of oxide minerals / Liu S., Xie L., Liu G., Zhong H., Zeng H. // *Minerals Engineering*. 2021, vol. 169, 106928.
9. Krasowska M., Malysa K. Wetting films in attachment of the colliding bubble // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2007, vol. 134-135, pp. 138-150.
10. Gillies G., Kappl M., Butt H.-J. Direct measurements of particle-bubble interactions // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2005, vol. 114-115, pp. 165-172.
11. Attard P. Nanobubbles and hydrophobic attraction // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2003, vol. 104, iss. 1-3, pp. 75-91.
12. Skvarla J. Hydrophobic interaction between macroscopic and microscopic surfaces. Unification using surface thermodynamics // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2001, vol. 91, iss. 3, pp. 335-390.
13. Column rougher flotation of fine niobium-bearing particles assisted with micro and nanobubbles / Capponi F., Azevedo A., Oliveira H., Rubio J. // *Minerals Engineering*. 2023, vol. 199, Article 108119.
14. Wang D., Lin Q. Hydrodynamics of froth flotation and mics of froth flotation and its effects on fine and ultrafine mineral particle flotation // *Minerals Engineering*. 2021, vol. 173, Article 107220.
15. Zhang Z., Ren L., Zhang Y. Role of nanobubbles in the flotation of fine rutile particles // *Minerals Engineering*. 2021, vol. 172, Article 107140.
16. Column rougher flotation of fine niobium-bearing particles assisted with micro and nanobubbles / Capponi F., Azevedo A., Oliveira H., Rubio J. // *Minerals Engineering*. 2023, vol. 199, 108119.
17. Zhang Z., Ren L., Zhang Y. Role of nanobubbles in the flotation of fine rutile particles // *Minerals Engineering*. 2021, vol. 172, 107140.
18. Recent advances for understanding the role of nanobubbles in particles flotation / Zhang F., Sun L., Yang H., Gui X., Xing Y. // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021, vol. 291, 102403.
19. Li C., Li D., Zhang H. Surface nanobubbles on the hydrophobic surface and their implication to flotation // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022, vol. 29, iss. 8, pp. 1491-1492.
20. Han H., Liu An., Wang H. Flotation kinetics performance of different coal size fractions with nanobubbles // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022, vol. 29, iss. 8, pp. 1502-1510.
21. Jadhav A.J., Barigou M. Bulk nanobubbles: that is the question // *Langmuir*. 2020, vol. 36, iss. 7, pp. 1699-1708.
22. Свиридов В.В., Свиридов А.В., Никифоров А.Ф. Физико-химические основы процессов микрофлотации. СПб.: Лань, 2018. 416 с.
23. Bryk P., Bryk M. Effective interactions in polydisperse colloidal suspensions investigated using Ornstein-Zernike integral equations // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2009, vol. 338, iss. 1, pp. 92-98.
24. Reassessing water slippage in hydrophobic nanostructures / Zuo H., Javadpour F., Deng S., Jiang X., Li Z., Li H. // *Journal Chem. Phys*. 2020, vol. 153, 191101.
25. Malkin A. Ya., Patlazhan S.A. Wall slip for complex liquids – Phenomenon and its causes // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2018, vol. 257, pp. 42-57.
26. Slip flow of diverse liquids on robust superomniphobic surface / Wu Y., Cai M., Li Z., Song X., Wang H., Pei X., Zhou F. // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2014, vol. 414, pp. 9-13.
27. Евдокимов С.И., Панышин А.М., Солоденко А.А. Минералургия. В 2-х т. Т. 2. Успехи флотации. Владикавказ: ООО НПКП «МАВР», 2009. 992 с.
28. Bal V. Stability characteristics of nanoparticles in a laminar linear shear flow in the presence of DLVO and non-DLVO forces // *Langmuir*. 2019, vol. 35, no. 34, pp. 11175-11187.
29. A review of non-DLVO interactions in environmental colloidal systems / Grasso D., Subramaniam K., Butkus M., Strevett K., Bergendahl J. // *Environmental Science and Biotechnology*. 2002, vol. 1, pp. 17-38.
30. Atomic force microscopy study of non-DLVO interactions between drops and bubbles / Li K., Wang W., Xiao F., Ge Y., Jin H., Yu Z., Gong J., Gao W., Peng Z. // *Langmuir*. 2021, vol. 37, no 22, pp. 6830-6837.

31. Wall function model for particulate fouling applying XDLVO theory / Ojaniemi U., Riihimäki M., Manninen M., Patikangas T. // *Chemical Engineering Science*. 2012, vol. 84, pp. 57-69.
32. Brant J.A., Childress A.E. Membrane-colloid interactions: comparison of extended DLVO predictions with AFM force measurements // *Environmental Engineering Science*. 2002, vol. 19, no 6, pp. 413-427.
33. Духин С.С. Динамический адсорбционный слой и эффект Марангони-Гиббса // *Современная теория капиллярности: к 100-летию теории капиллярности Гиббса* / под ред. А.И. Русанова, Ф.Ч. Гудрича. Л.: Химия, 1980. 344 с.
34. Comparison of attachment process of particles to air and oily bubbles in flotation / Chen S., Zhou Y., Liu R., Zhou A., Qu J., Liu L., Zhang N., Yu Y., Zhu Z., Chang J., Tao X., Yuan X., Li Z. // *Advanced Powder Technology*. 2023, vol. 34, iss. 7, 104059.
35. Belyaev A.V., Vinogradova O.I. Hydrodynamic interaction with super-hydrophobic surfaces // *Soft Matter*. 2010, vol. 6, pp. 4563-4570.
10. Gillies G., Kappl M., Butt H.-J. Direct measurements of particle-bubble interactions. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2005;114-115:165-172.
11. Attard P. Nanobubbles and hydrophobic attraction. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2003;104(1-3):75-91.
12. Skvarla J. Hydrophobic interaction between macroscopic and microscopic surfaces. Unification using surface thermodynamics. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2001;91(3):335-390.
13. Capponi F., Azevedo A., Oliveira H., Rubio J. Column rougher flotation of fine niobium-bearing particles assisted with micro and nanobubbles. *Minerals Engineering*. 2023;199:108119.
14. Wang D., Lin Q. Hydrodynamics of froth flotation and its effects on fine and ultrafine mineral particle flotation: A literature review. *Minerals Engineering*. 2021;173:107220.
15. Zhang Z., Ren L., Zhang Y. Role of nanobubbles in the flotation of fine rutile particles. *Minerals Engineering*. 2021;172:107140.
16. Capponi F., Azevedo A., Oliveira H., Rubio J. Column rougher flotation of fine niobium-bearing particles assisted with micro and nanobubbles. *Minerals Engineering*. 2023;199:108119.
17. Zhang Z., Ren L., Zhang Y. Role of nanobubbles in the flotation of fine rutile particles. *Minerals Engineering*. 2021;172:107140.
18. Zhang F., Sun L., Yang H., Gui X., Xing Y. Recent advances for understanding the role of nanobubbles in particles flotation. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;291:102403.
19. Li C., Li D., Zhang H. Surface nanobubbles on the hydrophobic surface and their implication to flotation. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022;29(8):1491-1492.
20. Han H., Liu An., Wang H. Flotation kinetics performance of different coal size fractions with nanobubbles. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022;29(8):1502-1510.
21. Jadhav A.J., Barigou M. Bulk nanobubbles: that is the question. *Langmuir*. 2020;36(7):1699-1708.
22. Sviridov V.V., Sviridov A.V., Nikiforov A.F. *Fiziko-khimicheskie osnovy protsessov mikroflotatsii* [Physical and chemical bases of microflotation processes]. Saint Petersburg: Lan, 2018, 416 p. (In Russ.)
23. Bryk P., Bryk M. Effective interactions in polydisperse colloidal suspensions investigated using Ornstein-Zernike integral equations. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2009;338(1):92-98.
24. Zuo H., Javadpour F., Deng S., Jiang X., Li Z., Li H. Reassessing water slippage in hydro-phobic nanostructures. *Journal Chem. Phys*. 2020;153:191101.
25. Malkin A. Ya., Patlazhan S.A. Wall slip for complex liquids – Phenomenon and its causes. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2018; 257:42-57.
26. Wu Y., Cai M., Li Z., Song X., Wang H., Pei X., Zhou F. Slip flow of diverse liquids on robust superomniphobic surface. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2014;414:9-13.

References

1. Xie L., Wang J., Lu Q., Hu W., Zeng H. Surface interaction mechanisms in mineral flotation: Fundamentals, measurements, and perspectives. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;295:102491.
2. Li D., Wang H., Li C., Liang Y., Yan X., Zhang H. Determination and modulation of the typical interactions among dispersed phases relevant to flotation applications: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021;288:102359.
3. Sun K., Nguyen C.V., Nguyen N.N., Nguyen Anh V. Flotation surface chemistry of water-soluble salt minerals: from experimental results to new perspectives. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2022;309:102775.
4. Long Q., Wang H., Jiang F., Tan W., Xu Z. Enhancing flotation separation of fine copper oxide from silica by microbubble assisted hydrophobic aggregation. *Minerals Engineering*. 2020;189:107863.
5. Li Z., Yoon R.-H. AFM force measurements between gold and silver surface treated in ethyl xanthate solutions: Effect of applied potentials. *Minerals Engineering*. 2012;36-38:126-131.
6. Nguyen A.V., Nalaskowski J., Miller J.D., Butt H.-J. Attraction between hydrophobic surface studied by atomic microscopy. *International Journal of Mineral Processing*. 2003;72(1-4):215-225.
7. Hu P., Liang L. The role of hydrophobic interaction in the heterocoagulation between coal and quartz particles. *Mineral Engineering*. 2020;154:106421.
8. Liu S., Xie L., Liu G., Zhong H., Zeng H. Understanding the hetero-aggregation mechanism among sulfide and oxide minerals particles driven by bifunctional surfactants: Intensification flotation of oxide minerals. *Minerals Engineering*. 2021;169:106928.
9. Krasowska M., Malysa K. Wetting films in attachment of the colliding bubble. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2007;134-135:138-150.

27. Evdokimov S.I., Panshin A.M., Solodenko A.A. *Mineralurgiya v 2-kh t. T. 2. Uspekhi flotatsii* [Minerallurgy. In 2 volumes. Vol. 2. Success of flotation]. Vladikavkaz: LLC NPKP MAVR, 2009, 992 p. (In Russ.)
28. Bal V. Stability characteristics of nanoparticles in a laminar linear shear flow in the presence of DLVO and non-DLVO forces. *Langmuir*. 2019;35(34):11175-11187.
29. Grasso D., Subramaniam K., Butkus M., Strevett K., Bergendahl J. A review of non-DLVO interactions in environmental colloidal systems. *Environmental Science and Biotechnology*. 2002;1:17-38.
30. Li K., Wang W., Xiao F., Ge Y., Jin H., Yu Z., Gong J., Gao W., Peng Z. Atomic force microscopy study of non-DLVO interactions between drops and bubbles. *Langmuir*. 2021;37(22):6830-6837.
31. Ojaniemi U., Riihimäki M., Manninen M., Pattikan-gas T. Wall function model for particulate fouling applying XDLVO theory. *Chemical Engineering Science*. 2012;84:57-69.
32. Brant J.A., Childress A.E. Membrane-colloid interactions: comparison of extended DLVO predictions with AFM force measurements. *Environmental Engineering Science*. 2002;19(6):413-427.
33. Dukhin S.S. *Dinamicheskiiy adsorbtsionnyi sloi i jefekt Marangoni-Gibbsa* [A dynamic adsorption layer and the Marangoni-Gibbs effect]. Leningrad: Khimiya, 1980, 344 p. (In Russ.)
34. Chen S., Zhou Y., Liu R., Zhou A., Qu J., Liu L., Zhang N., Yu Y., Zhu Z., Chang J., Tao X., Yuan X., Li Z. Comparison of attachment process of particles to air and oily bubbles in flotation. *Advanced Powder Technology*. 2023;34(7):104059.
35. Belyaev A.V., Vinogradova O.I. Hydrodynamic interaction with super-hydrophobic surfaces. *Soft Matter*. 2010;6:4563-4570.

Поступила 10.04.2023; принята к публикации 26.04.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 10/04/2023; revised 26/04/2024; published 27/06/2024

Евдокимов Сергей Иванович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: eva-ser@mail.ru. ORCID 0000-0002-2960-4786

Герасименко Татьяна Евгеньевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

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

Орехова Наталья Николаевна – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия. Email: n_orehova@mail.ru.

Sergey I. Evdokimov – PhD (Eng.), Lead Researcher, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: eva-ser@mail.ru. ORCID 0000-0002-2960-4786

Tatiana E. Gerasimenko – PhD (Eng.), Lead Researcher, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: gerasimenko_74@mail.ru. ORCID 0000-0001-7048-4379

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

Natalia N. Orekhova – DrSc (Eng.), Associate Professor, Lead Researcher, Melnikov Institute of Comprehensive Subsoil Development, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Email: n_orehova@mail.ru.

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

УДК 622.794.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-58-70



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ ПРОДУКТОВ ОБОГАЩЕНИЯ УГЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФЛОКУЛЯНТОВ

Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю.

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

Аннотация. Применение синтетических полимерных флокулянтов является одним из перспективных направлений интенсификации процессов разделения тонкодисперсных суспензий, в том числе в водно-шламовых системах углеобогащительных фабрик. Цель работы заключается в анализе теории и практики и выявлении перспективных направлений совершенствования технологий разделения суспензий продуктов обогащения углей с применением флокулянтов. Приведены сведения о современном состоянии теории взаимодействия флокулянтов с минеральными частицами, свойствах флокуляционных структур. Рассмотрены технологические аспекты применения флокулянтов в таких процессах разделения суспензий тонкодисперсных продуктов обогащения углей, как флокуляционное кондиционирование, сгущение, обезвоживание на вакуум-фильтрах и ленточных фильтр-прессах, центрифугирование. Приведены сведения по значениям расходов флокулянтов. Указаны значения технологических показателей сгущения отходов флотации и шламов. Отмечено, что для процессов обезвоживания фильтрованием под вакуумом характерно применение индивидуальных флокулянтов с расходом до 100 г/т и снижение удельного объёмного сопротивления осадка в 1,5-3 раза, для обезвоживания на ленточных фильтр-прессах – комбинаций анионоактивного и катионоактивного флокулянтов с суммарным расходом до 1000 г/т, что обусловлено необходимостью получения осадка с предельным статическим напряжением сдвига не менее 90 Па и удельным объёмным сопротивлением порядка $3 \cdot 10^{10} - 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}$. Показано, что перспективными направлениями совершенствования технологий сгущения и обезвоживания продуктов обогащения углей с применением флокулянтов являются: оптимизация расходов флокулянтов и режимов их перемешивания с суспензиями; разработка способов и средств для контроля остаточного содержания флокулянтов в осветлённой воде; дробная подача флокулянтов; предварительная обработка суспензий коагулянтами, содержащими многозарядные катионы.

Ключевые слова: флокуляция, флокулянты, коагулянты, разделение суспензий, угольный флотационный концентрат, отходы флотации углей, сгущение, обезвоживание, фильтрование

© Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., 2024

Для цитирования

Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю. Современное состояние и направления совершенствования процессов разделения суспензий продуктов обогащения углей с применением флокулянтов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 58-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-58-70>



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

CURRENT STATE AND AREAS OF IMPROVING SEPARATION PROCESSES FOR SUSPENSIONS OF COAL ENRICHMENT PRODUCTS USING FLOCCULANTS

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu.

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

Abstract. The use of synthetic polymer flocculants is one of the promising areas for intensifying separation processes for fine suspensions, including in the water-slurry systems of coal processing plants. The objective of the research is to analyze theory and practice and identify promising areas for improving technologies for separating suspensions of coal enrichment products using flocculants. The article describes the current state of the theory of interaction between flocculants and mineral particles, and the properties of flocculation structures. The authors describe technological aspects of using flocculants in processes of separating suspensions of fine coal enrichment products, such as flocculation conditioning; thickening; dehydration on vacuum filters and belt filter presses; centrifugation. The article contains values of flocculant flow rates, technological indicators for thickening of flotation waste and slurry. It has been noted that the processes of dehydration by filtration under vacuum are characterized by using individual flocculants with a flow rate of up to 100 g/t and a decrease in the volume resistivity of the sediment by 1.5-3 times, for dehydration on belt filter presses – combinations of anionic and cationic flocculants with a total flow rate of up to 1000 g/t, which is attributed to the need to obtain the sediment with a maximum static shear stress of at least 90 Pa and a volume resistivity of about $3 \cdot 10^{10}$ - $2 \cdot 10^{11}$ m⁻². It has been shown that promising areas for improving technologies for thickening and dehydration of coal enrichment products using flocculants are optimization of flocculant flow rates and modes of their mixing with suspensions; development of methods and means for controlling the residual content of flocculants in clarified water; a fractional supply of flocculants; pretreatment of suspensions with coagulants containing polyvalent cations.

Keywords: flocculation, flocculants, coagulants, separation of suspensions, coal flotation concentrate, coal flotation waste, thickening, dehydration, filtration

For citation

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu. Current State and Areas of Improving Separation Processes for Suspensions of Coal Enrichment Products Using Flocculants. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 58-70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-58-70>

Введение

Существующие технологии обогащения углей как для коксохимического производства, так и для энергетики требуют применения в качестве разделительной среды значительного количества воды, поэтому в технологических схемах обогащения углей важную роль играют водно-шламовые процессы, назначение которых заключается в обеспечении выделения тонкодисперсной твёрдой фазы, получении и циркуляции чистой оборотной воды. Интенсификация разделения твёрдой и жидкой фаз суспензий в этих процессах насущно необходима и обусловлена требованиями по технологической, экономической и экологической эффективности технологии обогащения. Одним из основных направлений решения этой проблемы является применение синтетических полимерных флокулянтов. Эти реагенты выпускаются химической промышленностью с середины XX века и получили широкое распространение в качестве реагентов для интенсификации разделения твёрдой и жидкой фаз в различных технологиях: переработке минерального сырья, очистке сточных вод, нефтедобыче и др. [1, 2]. В углеобогадательной подотрасли, для которой характерно ис-

пользование значительных объёмов воды (в среднем 3-4 м³ на тонну перерабатываемого угля), весьма существенное значение имеет рациональное использование воды. Для этого на обогатительных фабриках (ОФ) все более широкое распространение получают технологии с замкнутым водно-шламовым циклом, исключающие сброс загрязнённых вод в наружные илوناкопители. В настоящее время технологии сгущения и обезвоживания продуктов обогащения углей, в том числе с применением флокулянтов, постоянно совершенствуются, увеличивается доля ОФ с замкнутым водно-шламовым циклом. Это предусмотрено в «Программе развития угольной промышленности на период до 2035 г.».

Цель настоящей работы заключается в анализе теории и практики и выявлении перспективных направлений совершенствования технологий разделения суспензий продуктов обогащения углей с применением флокулянтов.

В качестве флокулянтов применяют полимеры линейного строения, растворимые в воде, содержащие полярные функциональные группы. Получили широкое распространение следующие полимеры:

– анионоактивные и неионогенные: полиакрила-

мид, полиметакриламид и их производные; полиэтиленоксид и ряд других;

– в качестве катионоактивных – полимеры аммониевых, пиридиновых оснований, аминов и иминов.

Важнейшими параметрами, характеризующими флокулянты, являются молярная масса (ММ) и содержание заряженных функциональных групп. Значения этих параметров для выпускаемых в настоящее время анионоактивных флокулянтов составляют соответственно до $2,5 \cdot 10^7$ кг/кмоль и 0-80%; для катионоактивных флокулянтов – соответственно до $9 \cdot 10^6$ кг/кмоль и 0-90%. Таким образом, ассортимент выпускаемых флокулянтов весьма широк и позволяет выбрать эффективные реагенты для реализации процессов разделения разнообразных по свойствам суспензий. Согласно [3], флокулянты в широком ассортименте выпускаются отечественными и зарубежными химическими предприятиями, в том числе ЗАО «Соленис Технолоджис МСП» (ранее ЗАО «Ашленд МСП», г. Пермь); «SNF SA Floerger» (Франция); «BASF» (Германия); «Kemira» (Финляндия) и др.

Исследование теории процесса флокуляции

Теории процесса флокуляции посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных авторов [4-7].

При добавлении к суспензии раствора флокулянта протекают следующие процессы:

- гомогенизация, заключающаяся в равномерном распределении макромолекул в объеме суспензии;
- адсорбция полимера на частицах твердой фазы;
- собственно флокуляция, заключающаяся в образовании мостиковых связей между частицами, росте флокул (возможно также образование агрегатов 2-го и более высоких порядков), изменении структуры флокул, механической деструкции и восстановлении разрушенных флокул, причем скорости двух последних процессов через определенный промежуток вре-

мени выравниваются, иными словами устанавливается динамическое равновесие.

Притяжение к поверхности частиц твердой фазы для неионогенных полимеров обусловлено действием сил Ван-дер-Ваальса, гидрофобными взаимодействиями и образованием водородных связей; для ионогенных полимеров – прежде всего силами электростатического взаимодействия. Исследования, выполненные в Университете Новой Англии (Австралия), показали, что в зависимости от знака заряда поверхности и полимера последний может притягиваться либо потенциалопределяющими ионами поверхности, либо противоионами двойного электрического слоя, как это видно на рис. 1 [7].

В случае отталкивания сильных одноименных зарядов частицы и макромолекулы закрепление флокулянта на поверхности затруднено из-за потенциального барьера [5]. Этот эффект может быть использован для разделения системы из двух и более минералов различной природы методом селективной флокуляции.

Суммарное время протекания процессов гомогенизации, адсорбции и собственно флокуляции зависит от крупности частиц твердой фазы. Согласно [5], для частиц диаметром свыше 1 мкм определяющим является ортокINETический вариант процесса, по которому взаимное перемещение частиц и макромолекул происходит за счет конвективного массопереноса; при развитом турбулентном режиме расчетное время протекания процессов – несколько секунд. Для субмикронных частиц характерен перикинетический вариант: частицы и макромолекулы перемещаются относительно друг друга под действием броуновского движения. В этом случае характерное время указанных процессов существенно больше – несколько сотен секунд. Детальному изучению строения агрегатов частиц посвящен ряд работ, опубликованных в последние годы, например [7-9].

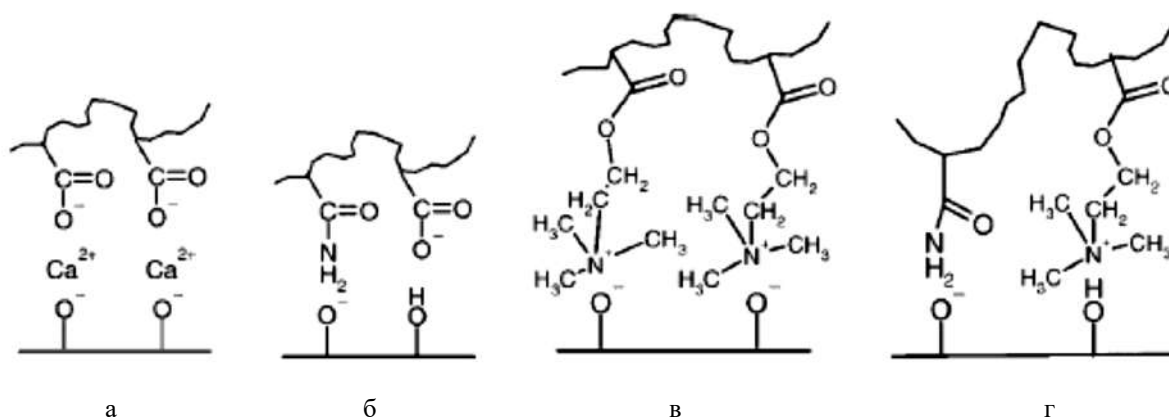


Рис. 1. Взаимодействие заряженных функциональных групп флокулянтов с твердой фазой, на поверхности которой преобладают гидроксильные группы [7]: а, б – анионоактивных; в, г – катионоактивных

Fig. 1. The interaction between charged functional groups of flocculants and solids, whose surface contains mostly hydroxyl groups [7]: а, б is anionic; в, г is cationic

Для эффективной реализации процессов перемешивания суспензий с флокулянтами и последующего транспортирования суспензий к аппаратам для сгущения и обезвоживания важно обеспечить сохранность флокул, другими словами, свести их механическую деструкцию к минимуму. Известно, что разрушение агрегатов происходит вследствие сдвиговых усилий, возникающих под действием турбулентных пульсаций среды, причём масштаб пульсаций сопоставим с диаметром флокул [10]. В работе [11] показано, что величина предельного динамического напряжения сдвига $\tau_{\text{п}}$, характеризующая прочность флокул, прямо пропорциональна расходу флокулянта в интервале от 25 до 300 г/т. С увеличением диаметра частиц твёрдой фазы значение $\tau_{\text{п}}$ снижается, но при значениях свыше 10-15 мкм практически не изменяется и при указанных значениях расхода флокулянта составляет 0,5-3,5 Па. Также в этой работе приведены уравнения для расчёта рационального значения скорости течения суспензии, обработанной флокулянтами, для обеспечения минимальной механической деструкции флокул.

Свойства флокул оказывают существенное влияние на результаты процессов разделения суспензий. По нашему мнению, наиболее важны крупность флокул, их прочность и содержание внутренней влаги.

Влажность флокул обусловлена тем, что в процессе флокуляции часть воды из объёма суспензии иммобилизуется в пространстве между частицами [12]. Согласно [5], некоторая часть этой воды может быть удалена за счёт неразрушающих механических воздействий. Это достигается при течении суспензии, обработанной флокулянтами, по криволинейной траектории; в результате на флокулы действует неуравновешенная система сил, приводящая к уменьшению расстояния между частицами с вытеснением части воды. Это, в свою очередь, позволяет снизить влажность осадка в процессах обезвоживания.

Данные, приведенные в работе [9], указывают на то, что зависимость среднего диаметра агрегатов частиц отходов флотации углей от расхода флокулянта – монотонно возрастающая, с насыщением. Также очевидно, что агрегирование частиц твёрдой фазы улучшает структуру образующихся осадков, так как удельное объёмное сопротивление осадка α_0 (величина, обратная проницаемости) обратно пропорциональна квадрату диаметра частиц (агрегатов). По нашему предположению, структура осадка зависит от структуры флокул, определяемой комбинированием применяемых флокулянтов, следующим образом (рис. 2):

- осадок индивидуальных частиц (рис. 2, а) имеет диаметр пор, сопоставимый с диаметром частиц (несколько микрон), значение α_0 находится в пределах от $5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}$ (угольный флотационный концентрат) до 10^{16} м^{-2} (отходы флотации углей);
- осадок из флокул первого порядка (рис. 2, б): применение одного флокулянта снижает значение α_0 примерно в 3-6 раз по сравнению с осадками индивидуальных частиц за счёт увеличения диаметра пор до нескольких десятков микрон, а также, возможно, уменьшения доли тупиковых пор;
- осадок из флокул второго порядка (рис. 2, в): последовательное применение двух флокулянтов различной природы снижает значение α_0 до $(2-10) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$, так как образуются агрегаты второго порядка, и характерные значения диаметра пор достигают нескольких сотен микрон, это особенно важно для обезвоживания суспензий дренированием на ленточных фильтр-прессах.

Приведенные выше сведения по теории процесса флокуляции являются основой для практической реализации технологий разделения суспензий с применением флокулянтов. Ниже рассмотрены основные аспекты этих технологий.

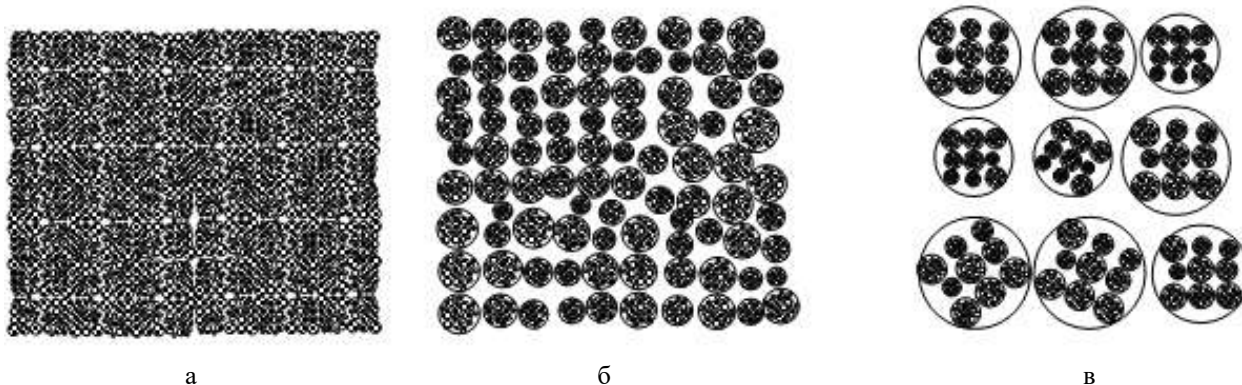


Рис. 2. Схемы осадков: а – индивидуальные частицы; б – флокулы 1-го порядка; в – флокулы 2-го порядка
Fig. 2. The structures of filter cakes: a is individual particles; б is flocs of the 1st order; в is flocs of the 2nd order

Технологии разделения суспензий с применением флокулянтов

Флокуляционное кондиционирование. Данный процесс включает операции, предшествующие сгущению и обезвоживанию суспензий: приготовление растворов флокулянтов, их дозирование, перемешивание с суспензиями, транспортирование суспензий к аппаратам для сгущения и обезвоживания. Концентрация рабочих растворов составляет, как правило, 0,02-0,07%.

Перемешивание суспензий с флокулянтами осуществляется в трубопроводах, статических смесителях и устройствах с вращающимися мешалками. Гидродинамический режим процесса должен обеспечить, с одной стороны, быстрое и эффективное протекание гомогенизации полимера и образования агрегатов частиц, для чего необходим развитый турбулентный режим. С другой стороны, механическая деструкция флокул должна быть сведена к минимуму. Это дает основание для предположения о том, что существует оптимальный гидродинамический режим, который создает возможность для наиболее эффективного обезвоживания суспензий с применением флокулянтов.

Для оценки эффективности применения флокулянтов в технологических процессах, кроме параметров скорости осаждения твёрдой фазы и прозрачности осветлённой воды [1], предложены также минимальное значение времени капиллярного всасывания [13] и минимальное значение α_0 [14]. В работе [15] показано, что зависимость значения α_0 от объёмного расхода суспензии (то есть фактически от скорости её течения) для отходов флотации углей при добавлении флокулянтов имеет минимум (рис. 3).

Сгущение суспензий необогащённых шламов и отходов флотации. Эту операцию осуществляют в сгустителях различной конструкции: радиальных, цилиндрических, пластинчатых. Главная задача –

обеспечить максимальную возможную скорость осаждения твёрдой фазы. Также существенное значение имеет достижение минимального возможного содержания твёрдой фазы в осветлённой воде (сливе). Анализ литературных данных дает основание полагать, что значение этого параметра в настоящее время имеет тенденцию к снижению и составляет, как правило, менее 3 кг/м³ [16, 17], в зарубежной практике углеобогащения – порядка 0,1 кг/м³ [18]. Последнее значение рекомендуется для процессов сгущения в технологиях обогащения некоторых руд, например свинцовых, цинковых, железных [19].

В углеобогащении применяют, как правило, высокомолекулярные анионоактивные флокулянты с расходом до 100 г/т. В то же время существенной проблемой, затрудняющей получение чистого слива, является тенденция к увеличению доли тонкодисперсных, в особенности глинистых частиц в твёрдой фазе необогащённых шламов и отходов флотации. При значительном содержании в твёрдой фазе исходной суспензии субмикронных глинистых частиц в некоторых случаях предусматривают подачу катионоактивного флокулянта после анионоактивного [20]. Также известен способ, заключающийся в добавлении к суспензии коагулянтов-электролитов или гетерокоагулянтов перед подачей флокулянтов [21]. Однако ввиду значительного расхода коагулянтов (до 5 кг/т) этот способ не получил распространения. Возможным направлением решения этой проблемы представляется применение коагулянтов, содержащих многозарядные катионы. По нашему мнению, несомненный интерес с этой точки зрения представляют коагулянты, содержащие ионы Ti^{4+} , разработанные в РХТУ им. Д.И. Менделеева, которые, согласно [22], способны обеспечить более высокую эффективность разделения суспензий по сравнению с алюминиевыми коагулянтами.

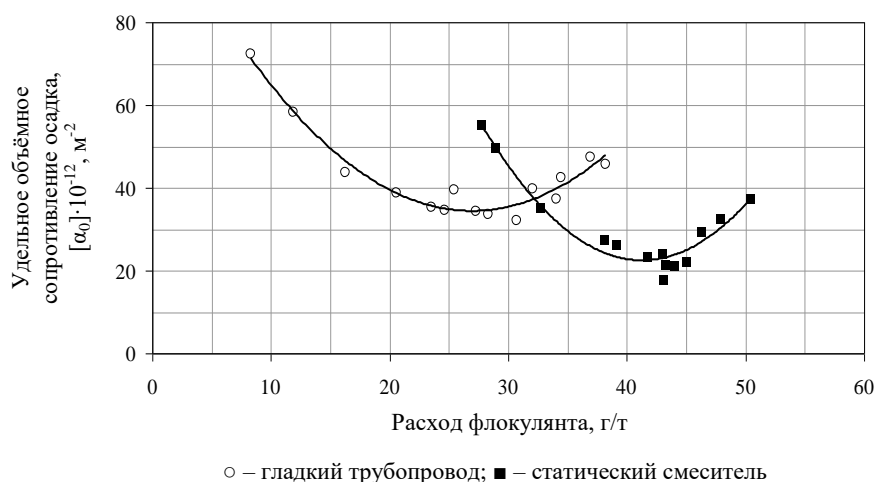


Рис. 3. Зависимость величины удельного объёмного сопротивления осадка α_0 от объёмного расхода суспензии [15]

Fig. 3. Dependence between volume resistivity of the sediment α_0 and the volume flow rate of the suspension [15]

Повышение удельной нагрузки примерно в 1,5-2 раза и снижение содержания твёрдой фазы в сливе без увеличения расхода флокулянтов достигается путём применения сгустителей со взвешенным слоем (как радиальных, так и цилиндрических). Принцип взвешенного слоя заключается в том, что загрузочное устройство заглублено в сгустительный чан. Поэтому частицы твёрдой фазы и образующиеся флокулы находятся во взвешенном состоянии в средней части аппарата. Таким образом, суспензия фильтруется через взвешенный слой, это обеспечивает высокую степень чистоты слива, а также возможность увеличения удельной нагрузки. В то же время наличие взвешенного слоя затрудняет получение сгущённой суспензии с высоким содержанием твёрдой фазы.

Селективная флокуляция угольных шламов.

Впервые возможность этого процесса показал Рид в 1971 году на примере суспензии, содержащей частицы гематита и кварца: при добавлении к этой суспензии сильного анионоактивного флокулянта кварц, в отличие от гематита, не флокулировался [23]. Согласно [24], в технологиях обогащения углей реализация этого процесса возможна в отдельных случаях, когда при взаимодействии отрицательно заряженных породных частиц и сильного анионоактивного флокулянта вследствие электростатического отталкивания между ними возникает потенциальный барьер высотой ориентировочно порядка $10 kT$, где k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура, К.

В России технология селективной флокуляции угольных шламов была реализована на обогатительной фабрике «Распадская» [25]. Суть процесса заключается в том, что исходная суспензия необогащённого угольного шлама крупностью ~ 200 мкм, зольностью порядка 18-28% и содержанием твёрдой фазы $10-20$ кг/м³ перемешивается с сильным анионоактивным флокулянтом, причем расход составляет порядка 30-36 г/т, и поступает в радиальный сгуститель. В сгущённый продукт извлекаются в основном угольные частицы: зольность твёрдой фазы составляет 10-15% (выход – около 90% от исходного шлама), что по условиям данной фабрики соответствует требованиям к качеству концентрата. В слив извлекаются преимущественно породные частицы (крупность менее 20 мкм, зольность около 80%, выход около 10%). До настоящего времени нет сведений о применении аналогичной технологии на других предприятиях по обогащению углей.

Обезвоживание флотационных концентратов и шламов фильтрованием под вакуумом. Этот процесс осуществляют, как правило, на фильтрах погружного типа: дисковых и барабанных. Для этого применяют индивидуальные флокулянты со сравнительно небольшим расходом, как правило до 30 г/т, в отдельных случаях – до 100 г/т. Анализ данных по эксплуатации дисковых вакуум-фильтров на углеобогастительных предприятиях Кузбасса [20] показывает, что применение флокулянтов снижает удельное сопротивление

осадка угольных флотационных концентратов примерно в 1,5-3 раза. Данные, приведенные в работе [26], указывают на то, что в процессе фильтрационного обезвоживания суспензии угольных частиц анионоактивные флокулянты по сравнению с катионоактивными при одинаковых значениях расхода обеспечивают более высокие значения толщины осадка h (следовательно, и удельной производительности по твёрдой фазе) и более низкую влажность осадка W . При этом зависимость значений названных параметров от расхода носит экстремальный характер: для h – с максимумом, для W – с минимумом (рис. 4).

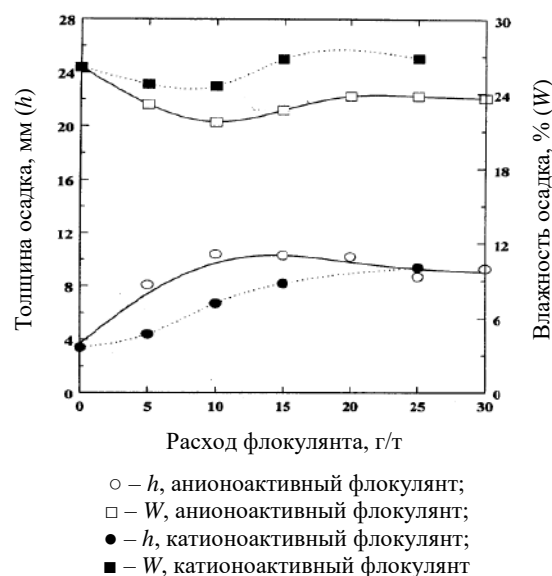


Рис. 4. Зависимость толщины и влажности осадка от расхода флокулянта [26]

Fig. 4. Dependence between thickness and moisture of the sediment and the flocculant flow rate [26]

Это подтверждается также сведениями, содержащимися в работе [27]. По нашему предположению, причина заключается в том, что с увеличением расхода возрастает диаметр флокул, следовательно, уменьшается удельное объёмное сопротивление осадка α_0 . Благодаря этому удельная производительность фильтров по твёрдой фазе возрастает примерно в 1,5-3 раза, а содержание твёрдой фазы в фильтрате снижается примерно в 2-3 раза.

При дальнейшем возрастании расхода возможно насыщение адсорбционного слоя на поверхности частиц твёрдой фазы макромолекулами флокулянта, что приводит к увеличению α_0 вследствие стерической стабилизации и возрастанию вязкости фильтрата за счёт появления в нем свободных макромолекул флокулянта. Значение W возрастает вследствие увеличения доли воды, иммобилизованной в пространстве между частицами во флокуле. Также избыточный расход флокулянта может привести к образованию сравнительно крупных флокул с высокой скоростью осаждения, что приводит к расслоению суспензии в ванне фильтра и нарушает нормальное течение про-

цесса обезвоживания. Поэтому, согласно [28], скорость осаждения твёрдой фазы суспензий для фильтров погружного типа не должна превышать 18 мм/с. Исходя из вышесказанного, для определения оптимальных значений расхода флокулянта в каждом конкретном случае целесообразно выполнение лабораторных экспериментальных исследований для определения наиболее эффективной марки флокулянта и его расхода q . По нашему мнению, оптимальное значение q находится в интервале между величинами, соответствующими минимальным значениям α_0 и W . При этом возможно снижение значения W (ориентировочно на величину до 2 абс.%) за счёт механических воздействий на суспензию, обработанную флокулянтами, при её течении по криволинейной траектории, например в трубопроводе с насадкой или в специальном барабане.

Существенной проблемой в технологии обезвоживания флотационных концентратов является необходимость обработки фильтрата, так как в нём содержатся частицы твёрдой фазы (до 20-30 кг/м³), причём их зольность выше по сравнению с зольностью концентрата. На некоторых углеобогатительных фабриках предусмотрена флотация фильтрата для извлечения угольных частиц [20], что, в свою очередь, приводит к усложнению технологической схемы, увеличению эксплуатационных затрат. Возможным решением проблемы получения на дисковом вакуум-фильтре чистого фильтрата, пригодного для направления в линию оборотного водоснабжения фабрики, представляется применение комбинаций анионоактивного и катионоактивного флокулянтов, чтобы обеспечить агрегирование всех частиц твёрдой фазы, в том числе самых тонких. При этом реагентный режим предлагается определять опытным путём исходя из следующих соображений:

- содержание твёрдой фазы в фильтрате – ориентировочно не более 1 кг/м³;
- достижение минимальных возможных значений влажности и удельного сопротивления осадка;
- скорость осаждения твёрдой фазы – не выше 18 мм/с.

Кроме того, в качестве материала фильтрующей перегородки представляется предпочтительным применение синтетических сеток с размерами отверстий не более 100-200 мкм, обладающих высокой прочностью, износостойкостью и способностью к эффективной регенерации промывкой.

Другой важной проблемой является отрицательное влияние флотационной пены на процесс обезвоживания. В работе [29] показано, что в случаях, когда при флотации образуется устойчивая пена, которая не полностью разрушается к моменту поступления суспензии концентрата на фильтр, пузырьки воздуха, содержащиеся в пене, удерживают часть воды и затрудняют обезвоживание. По нашему мнению, эффективное разрушение пены перед операцией обезвоживания может быть достигнуто путём орошения

пены раствором флокулянта. Это позволит совместить операции пеногашения и подачи флокулянта для обезвоживания.

В технологиях обогащения руд чёрных и цветных металлов флокулянты применяют на операциях сгущения и обезвоживания концентратов [30]. Закономерности применения как анионоактивных, так и катионоактивных флокулянтов в целом аналогичны. Также в НТЦ «Бакор» были выполнены исследования по совместному применению флокулянтов и ПАВ для одновременного снижения удельного сопротивления и влажности осадков железорудных концентратов [31].

Обезвоживание суспензий продуктов обогащения углей на ленточных фильтр-прессах. Данный процесс является одной из перспективных водно-шламовых технологий, получивших широкое распространение в отечественной и зарубежной практике обогащения углей с конца XX века. Для этой технологии обязательным условием является применение по крайней мере двух флокулянтов различной природы, как правило последовательно высокомолекулярного сильного анионоактивного и среднемолекулярного сильного катионоактивного [32]. Это связано с тем, что в зоне дренирования фильтра в течение сравнительно короткого промежутка времени (как правило, не более 1 мин) из исходной суспензии должна быть удалена свободная влага и образоваться осадок с определенной толщиной (не менее 6 мм, согласно [33]). Механическая устойчивость образующегося осадка должна обеспечивать его эффективное обезвоживание без растекания по ленте и выдавливания за пределы лент. Для этого осадок должен иметь определенное значение предельного статического напряжения сдвига $\tau_{п}$. Согласно [34], оптимальное значение $\tau_{п}$ составляет порядка 90 Па; согласно [5], эффективное значение этого параметра 100-200 кПа, при этом значение удельного объёмного сопротивления α_0 – в пределах $3 \cdot 10^{10}$ до $2 \cdot 10^{11}$ м². Поэтому целесообразен реагентный режим, обеспечивающий получение крупных флокул (второго и более высоких порядков), что и достигается последовательным применением двух флокулянтов различной природы (см. рис. 2, в).

Технологическая схема обезвоживания предусматривает последовательное перемешивание исходной суспензии, содержащей, как правило, не менее 200 кг/м³ твёрдой фазы, с растворами флокулянтов в гладком трубопроводе или в статических смесителях. Далее суспензия, обработанная флокулянтами, направляется на фильтр. В некоторых случаях осуществляется предварительное удаление части свободной влаги дренированием на ленточном гравитационном столе. В результате обезвоживания получают осадок с толщиной не менее 3-4 мм и влажностью от 30-35% (для низкосолевых продуктов) до 40-45% (для высокосолевых продуктов). Обезвоженный осадок направляют на дальнейшую обработку. Удельная производительность фильтров по твёрдой фазе достигает 3-4 т/ч на 1 м ширины ленты. Дальнейшее ис-

пользование фильтрата зависит от содержания в нем твёрдой фазы: при сравнительно высоком содержании порядка 10-30 кг/м³ – как правило, на повторное сгущение; при более низком возможно направление в линию оборотного водоснабжения предприятия или для промывки фильтрующих лент.

В настоящее время ленточные фильтр-прессы широко применяют на углеобогажительных фабриках России для обезвоживания отходов флотации и необогащённых высокозольных шламов. Низкозольные продукты, то есть концентрат и промежуточный продукт флотации, обезвоживают с применением ленточных фильтр-прессов только на обогатительной фабрике «Нерюнгринская». Значение суммарного расхода анионоактивного и катионоактивного флокулянтов для этой фабрики составляет 180-270 г/т [35]. С увеличением зольности твёрдой фазы суммарный расход флокулянтов возрастает и для высокозольных отходов флотации может достигать значения 1000 г/т. В некоторых случаях для обезвоживания суспензий с высоким содержанием тонких глинистых частиц наряду с флокулянтами применяют коагулянты, содержащие многозарядные катионы, например Al³⁺ [20].

Обезвоживание суспензий центрифугированием.

Известно о применении осадительных центрифуг со шнековой выгрузкой осадка для обезвоживания необогащённых тонкодисперсных шламов и отходов флотации [36], расход анионоактивного флокулянта – до 100 г/т. Этот способ обезвоживания не получил широкого распространения, так как значение влажности обезвоженного осадка существенно выше по сравнению с обезвоживанием фильтрованием и составляет 40-45%. Доля твёрдой фазы, извлекаемой в фугат, также выше по сравнению с обезвоживанием фильтрованием и составляет примерно 5-10%. Причины, на наш взгляд, заключаются в механической деструкции флюкул при течении суспензии с большими скоростями в роторе центрифуги, а также в измельчении осадка при его транспортировании шнеком. В работе [37] показано, что унос твёрдой фазы в фугат может быть сокращён путём применения коагулянтов.

С учётом вышеизложенного и на основании анализа современных технологических решений, представляются перспективными следующие направления совершенствования технологических процессов с применением флокулянтов:

1) Оптимизация расхода флокулянтов. До настоящего времени остается не вполне ясным вопрос о выборе критериев для оптимизации этого параметра. По нашему мнению, целесообразно обеспечивать значения расходов исходя из следующих соображений:

- для процессов сгущения – обеспечение максимальной возможной скорости осаждения твёрдой фазы и содержания этой фазы в сливе не более 1 кг/м³;
- для обезвоживания фильтрованием под вакуумом – достижение минимальных возможных значений влажности и удельного сопротивления осадка;
- для обезвоживания на ленточных фильтр-прессах – достижение минимального возможного

значения удельного сопротивления осадка при условии, что величина его предельного статического напряжения сдвига не менее 90 Па.

Исходя из этих соображений, для разработки критерия оптимизации также представляется логичным принимать во внимание остаточную концентрацию флокулянта в сливе или фильтрате. По нашему мнению, значение этой величины не должно превышать предел чувствительности метода порядка 10-50 мг/м³.

2) Уменьшение количества флокулянтов в осветлённых водах обогатительных фабрик, направляемых в линию оборотного водоснабжения и в природные водоёмы. Согласно [1], избыток флокулянтов в технологических водах фабрик приводит к увеличению себестоимости продукции и отрицательно влияет на эффективность обогатительных процессов. Также известно, что полиакриламид и его производные являются малотоксичными веществами, но их разложение в условиях природных водоёмов – неконтролируемый процесс, который может привести к образованию токсичных продуктов, в частности акриламида. В связи с этим представляется целесообразной разработка систем, позволяющих непрерывно контролировать остаточное содержание флокулянтов. Поэтому очевидно, что для уменьшения концентрации флокулянтов в осветлённых водах целесообразно осуществлять контроль названного параметра. В работе [38] предложен метод, основанный на нефелометрическом определении разности оптической плотности индикаторной суспензии в отсутствие и в присутствии флокулянта. Предполагаемая чувствительность метода – порядка 10-50 мг/м³.

3) Модифицирование макромолекул флокулянтов различными функциональными группами. Например, согласно [39], введение в макромолекулу полиакриламида третичных аминов позволило увеличить скорость осаждения твёрдой фазы водной суспензии каолина на 20-40% по сравнению с исходным полиакриламидом. Введение в макромолекулу флокулянта определённых функциональных групп обуславливает увеличение адсорбционного сродства к поверхности минеральных частиц. В то же время указанная химическая обработка флокулянтов повышает их цену, поэтому целесообразность модифицирования флокулянтов было бы логично определять на основе технико-экономического анализа.

4) Повышение эффективности растворения флокулянтов. Для обеспечения полного растворения флокулянтов в воде целесообразно разработать обоснованные рекомендации по параметрам режима растворения, контролю и гибкому регулированию процесса. Это, в свою очередь, позволит повысить эффективность применения флокулянтов и снизить их неоправданные потери.

5) Оптимизация режима перемешивания флокулянтов с суспензиями. На основании известных сведений о закономерностях этого процесса целесообразно определять режимы перемешивания суспензий

с флокулянтами для конкретных случаев с учётом применяемых технологий перемешивания. Для определения рациональных значений скорости потока суспензии в трубопроводе с учётом расхода флокулянта рекомендуем применять расчетные зависимости, приведенные в работе [11]. Для устройств с вращающимися мешалками целесообразно определять эффективное значение частоты вращения исходя из условия достижения максимального значения скорости осаждения твёрдой фазы или минимального значения α_0 . Также эффективность перемешивания суспензий с флокулянтами целесообразно повышать путём их дробного дозирования: согласно [40], при подаче растворов флокулянтов порциями по сравнению с единовременной подачей при одинаковых значениях расхода возможно снизить удельное сопротивление осадка на величину до 35%. В случаях обезвоживания флотационных концентратов с устойчивой пеной целесообразно осуществлять подачу растворов флокулянтов под давлением тонкими струями для разрушения пены.

б) Для повышения эффективности разделения суспензий необогащенных шламов и отходов флотации с высоким содержанием тонкодисперсных глинистых частиц целесообразно осуществлять предварительную добавку коагулянтов-электролитов или гетерокоагулянтов перед подачей флокулянтов. Это целесообразно, если последовательное применение анионоактивного и катионоактивного флокулянтов не обеспечивает требуемую скорость осаждения твёрдой фазы (для процессов сгущения) или значение удельного объёмного сопротивления осадка ниже $2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}$ (для обезвоживания на ленточном фильтр-прессе).

Заключение

Выполнен обзор современного состояния процессов разделения суспензий продуктов обогащения углей с применением флокулянтов, включая: флокуляционное кондиционирование; сгущение; обезвоживание на вакуум-фильтрах, ленточных фильтр-прессах и центрифугах. Показано их значение в технологическом комплексе обогащения углей и получении товарного продукта с учетом требований по обеспечению экологической безопасности производства. Показаны перспективные методы повышения эффективности применения флокулянтов в процессах разделения суспензий: оптимизация расходов флокулянтов и режимов их перемешивания с суспензиями; модифицирование макромолекул флокулянтов различными функциональными группами; повышение эффективности растворения флокулянтов; предварительная обработка суспензий коагулянтами.

Список источников

1. A Review on Coagulation/Flocculation in Dewatering of Coal Slurry / Khazaie A., Samali B., Mazarji M., Minkina T., Sushkova S., Mandzhieva S., Osborne D., Soldatov A.A. // *Water*. 2022, vol. 14, no. 6, 918.

2. Ульрих Е.В., Баркова А.С. Использование флокулянтов для очистки сточных вод // *Трансформация экосистем*. 2023. Т. 6. №1. С. 168-187.
3. Обзор рынка полиакриламида (ПАА) в России. 3-е изд. М.: Инфолайн, 2023. 101 с.
4. A review of flocculants as an efficient method for increasing the efficiency of municipal sludge dewatering: Mechanisms, performances, influencing factors and perspectives / Nyrcz M., Ochowiak M., Krupińska A., Włodarczak S., Matuszak M. // *Science of The Total Environment*. 2022, vol. 820, 153328.
5. Гольберг Г.Ю. Развитие теории образования и разрушения флокуляционных структур в процессах разделения суспензий тонкодисперсных продуктов обогащения углей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2019. 48 с.
6. The Fractal Analysis of Aggregates Formed via a Bridging Flocculation Mechanism / Biggs S., Habgood M., Jameson G.J., Yao-de Yan // *Proceedings of the 26th Australian Chemical Engineering Conference (Chemeca 98)*, Port Douglas, Australia, 1998.
7. Fellows C.M., Doherty W.O.S. Insights into Bridging Flocculation // *Macromol. Symp.*, 2006, vol. 231, pp. 1-10.
8. Polymer Molecular Weight and Mixing Effects on Floc Compressibility and Filterability / Glover S.M., Yan Y.D., Jameson G.J., Biggs S. // *6th World Congress of Chemical Engineering*. Melbourne, 2001.
9. Gungoren C., Unver I.K., Ozdemir O. Investigation of flocculation properties and floc structure of coal processing plant tailings in the presence of monovalent and divalent ions // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2020, vol. 56, no. 5, pp. 747-758.
10. A Review of Floc Strength and Breakage / Jarvis P., Jefferson B., Gregory J., Parsons S.A. // *Water Research*. 2005, vol. 39, no. 14, pp. 3121-3137.
11. Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю. Гидродинамический режим течения минеральных суспензий, обеспечивающий сохранность флокуляционных структур // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2019. №3. С. 106-112.
12. Liang Wen, Duoxi Yao. The Effect of Flocculants and Water Content on the Separation of Water from Dredged Sediment // *Water*. 2023, vol. 15, no. 13, 2462.
13. Ксенофонтов Б.С., Сазонов Д.В. Усовершенствование способа экспресс-контроля водоотдающих свойств осадков сточных вод // *Сантехника*. 2014. №2. С. 44-46.
14. Filtration of kaolinite and coal mixture suspension: Settling behavior and filter cake structure analysis / Yijiang Li, Yuting Chen, Wencheng Xia, Guangyuan Xie // *Powder Technology*. 2021, vol. 381, pp. 122-128.
15. Линев Б.И., Гольберг Г.Ю., Панфилов П.Ф. К вопросу об эффективности перемешивания суспензий с флокулянтами в статических перемешивающих устройствах. М.: МГТУ, 2005. Деп. в Горном информационно-аналитическом бюллетене 15.09.2005, №429/12-05.

16. Временные нормы технологического проектирования обогатительных фабрик ВНТП 3-92. М.: Министерство топлива и энергетики Российской Федерации, 1993. С. 52.
17. Соколова А.А. Оптимизация работы участков сгущения углеобогатительных фабрик // *Материалы международной конференции «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» (Плаксинские чтения-2023)*, Москва, 02-05 октября 2023. М.: НИТУ «МИСиС», 2023. С. 347-349.
18. Woodruff D., MacNamara L. Treatment of coal tailings // *The Coal Handbook: Towards Cleaner Coal Supply Chains (Second edition)*. Edited by Dave Osborne. Cambridge, US – Kidlington, UK: Woodhead Publishing Series in Energy, 2023, vol. 1, pp. 529-560.
19. Нормы технологического проектирования флотационных фабрик для руд цветных металлов ВНТП 21-86. М.: Министерство цветной металлургии СССР, 1986.
20. Антипенко Л.А. Технологические регламенты обогатительных фабрик Кузнецкого бассейна. 2-е изд., перераб. и доп. Прокопьевск: Прокопьевское полиграфическое производственное объединение, 2007. 463 с.
21. Enhancement of the Efficiency of Flotation Tailings Dewatering on the Belt Presses using new Combinations of Flocculants and Coagulants / Lobanov F.I., Kanev N.I., Golberg G.Yu., Panfilov P.F. // *Proc. XV International Coal Preparation Congress and Exhibition*. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2006, vol. 2, pp. 537-544.
22. Азопков С.В. Комплексные титаносодержащие коагулянты: синтез и применение: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2023. 18 с.
23. Read A.D. Selective flocculation separations involving hematite // *Institution of Mining and Metallurgy Transactions*. Section C. 1971, vol. 80, pp. 24-31.
24. Обоснование применения полиакриламидных флокулянтов для селективного разделения угольных шламов / Рубинштейн Ю.Б., Яровая О.В., Гольберг Г.Ю., Новак В.И. // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2011. №2. С. 97-102.
25. Новак В.И. Обоснование и разработка рациональной технологии флокуляционного разделения тонкодисперсных угольных шламов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 22 с.
26. Tao D., Groppo J.G., Parekh B.K. Enhanced Ultrafine Coal Dewatering using Flocculation Filtration Processes // *Minerals Engineering*. 2000, vol. 13, no. 2, pp. 163-171.
27. Yuping Fan, Xianshu Dong, Hui Li. Dewatering effect of fine coal slurry and filter cake structure based on particle characteristics // *Vacuum*. 2015, vol. 114, pp. 50-57.
28. Барабанные вакуум-фильтры: сайт компании Intech GmbH LLC. URL: https://oil-filters.ru/drum_filters/ (дата обращения: 14.02.2024).
29. Na Zhang, Xumeng Chen, Yongjun Peng. Effects of froth properties on dewatering of flotation products – A critical review // *Minerals Engineering*. 2020, vol. 155, 106477. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106477
30. Effects of Flocculant, Surfactant, Coagulant, and Filter Aid on Efficiency of Filtration Processing of Copper Concentrate: Mechanism and Optimization / Rezaei A., Abdollahi H., Gharabaghi M., Mohammadzadeh A.A. // *Journal of Mining and Environment*. 2020, vol. 11, no. 1, pp. 119-141.
31. Влияние поверхностно-активных веществ на остаточную влажность продуктов фильтрования / Зимбовский И.Г., Погосян Э.С. // *Материалы международной конференции «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья» (Плаксинские чтения-2023)*, Москва, 02-05 октября 2023. М.: НИТУ «МИСиС», 2023. С. 353-354.
32. Mathewson D., Eschebach D. Belt Press Filter Handbook. Brisbane, Australia: Australian Coal Industry's Research Program (ACARP), 2022.
33. Calculation of sludge dewatering capacity of belt filter press: сайт Shandong Vinson Machinery Co., LTD. URL: http://www.zmmachinery.com/news_show.asp?id=12 (дата обращения: 14.02.2024).
34. Fester V., Werner R. Optimization of Polymer Dosing for Improved Belt Press Performance in Wastewater Treatment Plants. In: *Advances in Slurry Technology*. Ed. By Trevor Jones. London: Intech Open, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.108978.
35. Засядько А.В., Панфилов Ф.А., Гольберг Г.Ю. Опыт эксплуатации ленточных фильтр-прессов на операции обезвоживания концентратов и промпродуктов флотации коксующихся углей ОФ «Нерюн-гринская» // *Кокс и химия*. 2000. №9. С. 9-11.
36. Meiring S. Thickeners versus centrifuges – a coal tailings technical comparison // *Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015, pp. 55-65.
37. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation / Nguyen C.V., Nguyen A.V., Doi A., Dinh E., Nguyen T.V., Ejtemaei M., Osborne D. // *Separation and Purification Technology*. 2021, vol. 259, no. 15, pp. 118-172.
38. Теоретическое обоснование способа измерения концентрации флокулянтов в технологических водах обогатительных фабрик / Лавриненко А.А., Кунилова И.В., Гольберг Г.Ю., Резчикова П.С., Комарова С.Г. // *Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: материалы 15-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов*, Москва, ИПКОН РАН, 25-28 октября 2021 г. М.: ИПКОН РАН, 2021. С. 252-255.
39. Адсорбционные и флокулирующие свойства модифицированного полиакриламида в водных дисперсиях каолина / Воробьев П.Д., Крутько Н.П.,

Чередниченко Д.В., Воробьева Е.В., Буча С.В., Липай Ю.В. // Вестні Національної академії наук України. Серія хімічних наук. 2022. Т. 58. №3. С. 273-279.

40. Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю. Состояние процессов сгущения и обезвоживания отходов флотации углей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2023. Т. 21. №3. С. 27-41.

References

1. Khazaie A., Samali B., Mazarji M., Minkina T., Sushkova S., Mandzhieva S., Osborne D., Soldatov A.A. A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry. *Water*. 2022;14(6):918.
2. Ulrich E.V., Barkova A.S. Use of flocculants for wastewater treatment. *Ecosystem Transformation*. 2023;6(1):1-20.
3. Overview of the polyacrylamide (PAA) market in Russia. 3rd Edition. Moscow: Infomine, 2023, 101 p. (In Russ.)
4. Hyrycz M., Ochowiak M., Krupińska A., Włodarczyk S., Matuszak M. A review of flocculants as an efficient method for increasing the efficiency of municipal sludge dewatering: Mechanisms, performances, influencing factors and perspectives. *Science of the Total Environment*. 2022;820:153328.
5. Golberg G.Yu. *Razvitie teorii obrazovaniya i razrusheniya flokulyatsionnykh struktur v protsessakh razdeleniya suspenzii tonkodispersnykh produktov obogashcheniya uglei: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Development of the theory of the flocculation structure formation and destruction in the processes of separating suspensions of fine coal beneficiation products. Extended abstract of the doctoral thesis]. Moscow, 2019. 48 p.
6. Biggs S., Habgood M., Jameson G.J., Yao-de Yan. The fractal analysis of aggregates formed via a bridging flocculation mechanism. Proceedings of the 26th Australian Chemical Engineering Conference (Chemeca 98), Port Douglas, Australia, 1998.
7. Fellows C.M., Doherty W.O.S. Insights into bridging flocculation. *Macromol. Symp*. 2006;231:1-10.
8. Glover S.M., Yan Y.D., Jameson G.J., Biggs S. Polymer molecular weight and mixing effects on floc compressibility and filterability. The 6th World Congress of Chemical Engineering. Melbourne, 2001.
9. Gungoren C., Unver I.K., Ozdemir O. Investigation of flocculation properties and floc structure of coal processing plant tailings in the presence of monovalent and divalent ions. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2020;56(5):747-758.
10. Jarvis P., Jefferson B., Gregory J., Parsons S.A. A review of floc strength and breakage. *Water Research*. 2005;39(14):3121-3137.
11. Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu. Flow regime of mineral suspensions with preserved structure of flocs. *Journal of Mining Science*. 2019;55(3):437-443.
12. Liang Wen, Duoxi Yao. The effect of flocculants and water content on the separation of water from dredged sediment. *Water*. 2023;15(13):2462.
13. Ksenofontov B.S., Sazonov D.V. Improving an express control method for water-output properties of wastewater sludges. *Santekhnika* [Sanitary Engineering]. 2014;(2):44-46. (In Russ.)
14. Yijiang Li, Yuting Chen, Wencheng Xia, Guangyuan Xie. Filtration of kaolinite and coal mixture suspension: Settling behavior and filter cake structure analysis. *Powder Technology*. 2021;381:122-128.
15. Linev B.I., Golberg G.Yu., Panfilov P.F. Efficiency of mixing suspensions with flocculants in static mixers. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. Moscow: Moscow State Mining University, 2005, 429/12-05, 14 p. (In Russ.)
16. *Vremennye normy tekhnologicheskogo proektirovaniya obogatitelnykh fabrik VNTP 3-92* [Temporary regulations on production engineering of beneficiation plants VNTP 3-92]. Moscow: Ministry of Fuel and Power Engineering of the Russian Federation, 1993, 52 p. (In Russ.)
17. Sokolova A.A. Optimization of the operation of the thickening sections of coal processing factories. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Sovremennye problemy kompleksnoy i glubokoy pererabotki prirodnogo i netraditsionnogo mineralnogo syrja» (Plaksin-skie chteniya-2023)* [Proceedings of the International Conference on Modern Problems of Integrated and Deep Processing of Natural and Non-Traditional Mineral Raw Materials (Plaksin Readings-2023)], Moscow, 02-05 October 2023. Moscow: National University of Science and Technology Moscow Institute of Steels and Alloys, 2023, pp. 347-349. (In Russ.)
18. Woodruff D., MacNamara L. Treatment of coal tailing. The coal handbook: towards cleaner coal supply chains (Second edition). Edited by Dave Osborne. Cambridge, US – Kidlington, UK: Woodhead Publishing Series in Energy, 2023, vol. 1, pp. 529-560.
19. *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya flotatsionnykh fabrik dlya rud tsvetnykh metallov VNTP 21-86* [Regulations on production engineering of flotation plants for non-ferrous metal ores VNTP 21-86]. Moscow: Ministry of Non-Ferrous Metallurgy of the USSR, 1986. (In Russ.)
20. Antipenko L.A. *Tekhnologicheskie reglamenty obogatitelnykh fabrik Kuznetskogo basseina* [Technological regulations on beneficiation plants of the Kuznetsk Basin]. Prokopenvsk: Prokopenvsk Polygraphic Production Association, 2007, 463 p. (In Russ.)
21. Lobanov F.I., Kanev N.I., Golberg G.Yu., Panfilov P.F. Enhancement of the efficiency of flotation tailings dewatering on the belt presses using new combinations of flocculants and coagulants. Proceedings of the 15th International Coal Preparation Congress and Exhibition. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2006, vol. 2, pp. 537-544.

22. Azopkov S.V. *Kompleksnyye titanosoderzhashchie koagulyanty: sintez i primeneniye: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Integrated titanium-containing coagulants: synthesis and application. Extended abstract of the Ph.D. thesis]. Moscow, 2023. 18 p.
23. Read A.D. Selective flocculation separations involving hematite. Institution of Mining and Metallurgy. Transactions. Section C. 1971;80:24-31.
24. Rubinshtein Yu.B., Yarovaya O.V., Golberg G.Yu., Novak V.I. Providing a rationale for using polyacrylamide flocculants for selective separation of coal sludge. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gorny zhurnal* [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. 2011;(2):97-102. (In Russ.)
25. Novak V.I. *Obosnovanie i razrabotka ratsionalnoy tekhnologii flokulyatsionnogo razdeleniya tonkodispersnykh ugolnykh shlamov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Providing a rationale and development of rational technology for the flocculation separation of fine coal sludge. Extended abstract of the Ph.D. thesis]. Moscow, 2012. 22 p.
26. Tao D., Groppo J.G., Parekh B.K. Enhanced ultrafine coal dewatering using flocculation filtration processes. *Minerals Engineering*. 2000;13(2):163-171.
27. Yuping Fan, Xianshu Dong, Hui Li. Dewatering effect of fine coal slurry and filter cake structure based on particle characteristics. *Vacuum*. 2015;114:50-57.
28. Drum vacuum filters. Available at: https://intechgmbh.ru/en/drum_filters-2/ (Accessed on February 14, 2024).
29. Na Zhang, Xumeng Chen, Yongjun Peng. Effects of froth properties on dewatering of flotation products – A critical review. *Minerals Engineering*. 2020;155: 106477. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106477
30. Rezaei A., Abdollahi H., Gharabaghi M., Mohammadzadeh A.A. Effects of flocculant, surfactant, coagulant, and filter aid on efficiency of filtration processing of copper concentrate: Mechanism and optimization. *Journal of Mining and Environment*. 2020;11(1):119-141.
31. Zimbovsky I.G., Pogosyan E.S. Effect of surfactants on residual moisture of filtration products. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Sovremennye problemy kompleksnoy i glubokoy pererabotki prirodnogo i netraditsionnogo mineralnogo syrya» (Plaksinskie chteniya-2023)* [Proceedings of the International Conference on Modern Problems of Integrated and Deep Processing of Natural and Non-Traditional Mineral Raw Materials (Plaksin Readings-2023)], Moscow, 02-05 October 2023. Moscow: National University of Science and Technology Moscow Institute of Steels and Alloys, 2023, pp. 353-354 (In Russ.)
32. Mathewson D., Eschebach D. Belt press filter handbook. Brisbane, Australia: Australian Coal Industry's Research Program (ACARP), 2022.
33. Calculation of sludge dewatering capacity of belt filter press. Available at: http://www.zmmachinery.com/news_show.asp?id=12 (Accessed on February 14, 2024).
34. Fester V., Werner R. Optimization of polymer dosing for improved belt press performance in wastewater treatment plants. *Advances in Slurry Technology*. Ed. by Trevor Jones. London: Intech Open, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.108978
35. Zasyadko A.V., Panfilov F.A., Golberg G.Yu. Experience in the operation of belt filter presses used for dewatering concentrates and industrial products of flotation of coking coals at the Neryungrinskaya Coal Preparation Plant. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry]. 2000;(9):9-11. (In Russ.)
36. Meiring S. Thickeners versus centrifuges – a coal tailings technical comparison. *Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015, pp. 55-65.
37. Nguyen C.V., Nguyen A.V., Doi A., Dinh E., Nguyen T.V., Ejtemaei M., Osborne D. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation. *Separation and Purification Technology*. 2021;259(15):118-172.
38. Lavrinenko A.A., Kunilova I.V., Golberg G.Yu., Rezhikova P.S., Komarova S.G. Providing a rationale for the method of measuring the concentration of flocculants in process water of beneficiation plants. *Problemy osvoeniya nedr v XXI veke glazami molodykh: Materialy 15-i Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly molodykh uchenykh i spetsialistov* [Problems of mineral resources exploitation in the 21st century through the eyes of young people: Proceedings of the 15th International School of Young Scientists and Specialists]. Moscow: Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, the Russian Academy of Sciences, 2021, pp. 252-255. (In Russ.)
39. Vorobiev P.D., Krutko N.P., Cherednichenko D.V., Vorobieva E.V., Bucha S.V., Lipai Yu.V. Adsorption and flocculation properties of modified polyacrylamide in water dispersions of kaolin. *Izvestiya Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series]. 2022;58(3):273-279. (In Russ.)
40. Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu. Thickening and dewatering of coal flotation tailings. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(3):27-41. (In Russ.)

Поступила 19.02.2024; принята к публикации 25.03.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 19/02/2024; revised 25/03/2024; published 27/06/2024

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

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

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

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

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.277
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-71-78



СПОСОБЫ ОПРЕССОВКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КОЛОНН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

Иванов А.Г.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Экологическая безопасность добычи урана методом скважинного подземного выщелачивания определяется герметичностью эксплуатационных колонн технологических скважин как при сооружении, так и в процессе эксплуатации. Применяемые методы геофизических исследований (токовый каротаж, расходомерия, индукционный каротаж) не позволяют определить истинную величину утечек рабочих растворов в заколонное пространство, поскольку выполняются в режимах, не всегда соответствующих рабочим режимам скважин при их эксплуатации. **Цель работы.** Рассмотрение вопросов количественного определения утечек через нарушения герметичности эксплуатационных колонн (преимущественно из полимерных материалов: труб из полиэтилена низкого давления или непластифицированного поливинилхлорида) с применением различных видов опрессовочных агентов: сжатого воздуха, жидкости, систем жидкость – сжатый воздух. В настоящей статье применен метод анализа гидравлических нагрузок, действующих на эксплуатационную колонну при выполнении различных вариантов опрессовок с использованием различных видов агентов. В настоящей работе автором впервые выполнен анализ различных вариантов опрессовок эксплуатационных колонн технологических скважин скважинного подземного выщелачивания применительно к добыче урана. **Результат.** В результате выполненной работы обоснованы варианты опрессовок для скважин, работающих в режиме нагнетания рабочих растворов под избыточным давлением. **Практическая значимость.** Выполненный анализ позволяет определить рациональный вариант опрессовки с параметрами давления опрессовочного агента, соответствующими рабочему режиму эксплуатации технологических скважин. По результатам выполненного анализа автором сделаны практические выводы по применению различных методов определения герметичности эксплуатационных колонн.

Ключевые слова: уран, добыча, технологические скважины, эксплуатационная колонна, опрессовка, опрессовочные агенты, технические средства, разжимной пакер

© Иванов А.Г., 2024

Для цитирования

Иванов А.Г. Способы опрессовки эксплуатационных колонн технологических скважин скважинного подземного выщелачивания урана // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 71-78. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-71-78>



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

PRESSURE TESTING METHODS FOR PRODUCTION STRINGS OF PROCESS WELLS OF URANIUM IN-SITU LEACHING

Ivanov A.G.

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

Abstract. Problem Statement (Relevance). Environmental safety of uranium mining by in-situ leaching is determined by tightness of production strings of process wells both during construction and operation. The applied methods of geophysical surveys (current logging, flow measurement, induction logging) do not determine the true value of leaks of working fluids into annular space, since they are performed in modes that do not always correspond to the operating modes of wells during their operation. **Objective.** The research is aimed at considering the issues of quantitative determination of leaks due to break of tightness of production strings (mainly made of polymeric materials: pipes made of low-pressure polyethylene, HDPE, or unplasticized polyvinyl chloride, PVC), using various types of pressure testing agents: compressed air, liquid, liquid – compressed air systems. This article describes an applied method of analyzing hydraulic loads, acting on the production string, when performing various types of pressure tests with various types of agents. The author is the first to analyze in this paper various options for pressure testing of production strings of in-situ leaching process wells in relation to uranium mining. **Result.** The conducted studies result in providing a rationale for the options for pressure testing of wells, operating in the mode of injection of working fluids under excessive pressure. **Practical Relevance.** The performed analysis determines a rational option of pressure testing with the pressure parameters of the pressure testing agent, corresponding to the operating mode of operation of process wells. Based on the results of the analysis performed, the author made practical conclusions on the use of various methods for determining tightness of production strings.

Keywords: uranium, mining, process wells, production string, pressure testing, pressure testing agents, technical means, expansion packer

For citation

Ivanov A.G. Pressure Testing Methods for Production Strings of Process Wells of Uranium In-Situ Leaching. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 71-78. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-71-78>

Введение

Среди вопросов, решаемых предприятиями, ведущими добычу металлов методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ), важнейшим является предотвращение загрязнения недр вследствие утечек рабочих растворов в заколонное пространство через нарушения целостности эксплуатационных колонн (ЭК) технологических скважин. Своевременная оценка состояния колонн нагнетательных скважин, работающих под избыточным давлением рабочих растворов, подаваемых как в режиме свободного налива, так и под давлением, позволяет выбрать необходимую (в зависимости от величины утечки) технологию ремонтно-восстановительных работ (РВР) или сделать вывод о прекращении эксплуатации скважин и их ликвидации [1-4].

Скважинное подземное выщелачивание является самым известным и безопасным методом добычи урана. Его доля достигает 60% в общероссийской добыче этого металла. Отдельные проблемы соору-

жений и эксплуатации технологических скважин и их безопасной работы опубликованы в различных работах [5-7]. В настоящей работе автором впервые рассмотрены вопросы опрессовки эксплуатационных колонн добычных скважин для определения количественных параметров возможных утечек рабочих растворов через негерметичные участки колонн.

В работе впервые рассмотрены варианты опрессовок ЭК технологических скважин как альтернатива геофизическим методам определения целостности колонн, прежде всего нагнетательных скважин, работающих в режиме подачи выщелачивающих растворов под избыточным давлением на устье.

Материалы и методы исследования

При проведении теоретических работ применялся гидравлический анализ способов определения герметичности ЭК, оценка применимости различных опрессовочных агентов, разработка вариантов их использования.

Автору неизвестны публикации по рассматриваемому вопросу, поскольку разработка и внедрение метода опрессовки ЭК впервые были выполнены под его руководством на одном из месторождений Республики Казахстан и ранее результаты работ не публиковались. В России такие работы до настоящего времени не проводились.

До настоящего времени наиболее распространенными на предприятиях СПВ методами оценки целостности полимерных ЭК являются геофизические исследования (ГИС). Методы электрического каротажа фиксируют утечки тока через нарушение герметичности ЭК, но не дают представления о численной величине утечки. Метод расходомерии позволяет фиксировать состояние ЭК в режиме свободного налива, который не всегда совпадает с рабочим режимом работы скважин, например при подаче выщелачивающих растворов (ВР) в ЭК нагнетательных скважин под давлением. При этом давление подачи ВР может превышать давление столба жидкости в скважине до 1,0-1,5 МПа.

В связи с этим возникает вопрос определения герметичности ЭК и количественной оценки утечки жидкости в заколонное пространство прямыми методами. Одним из таких методов может быть опрессовка колонн. Возможны следующие основные ее варианты в зависимости от применяемого агента: газом, жидкостью, системой жидкость-газ. Оценим возможность и области применения каждого из перечисленных агентов с точки зрения соответствия условий реальным нагрузкам на эксплуатационную колонну в процессе работы скважины, определения измеряемых параметров и получаемых результатов.

При выполнении анализа принимается технологическая скважина, обладающая наиболее общими характеристиками:

- нагнетательная;
- работающая в режиме принудительной подачи растворов при избыточном давлении на устье P_p (МПа);
- нарушение целостности ЭК расположено в области вышележащего контактного водоносного горизонта со статическим уровнем ниже поверхности и имеющего гидравлическую связь с внутриколонным пространством.

Под контактным водоносным горизонтом будем понимать горизонт, имеющий гидравлическую связь с внутриколонным пространством через нарушение целостности колонны.

Принято, что давление опрессовки равно рабочему давлению жидкости на глубине установки пакера. Сравнение эпюр внутриколонного давления скважины в рабочем режиме и при опрессовке газом (рис. 1) показывает, что этот вариант не соответствует реальным нагрузкам на колонну в рабочем режиме скважины.

Это связано с тем, что давление газа при опрессовке одинаково для всего интервала колонны, заполненного газом, включая участок нарушения целостности. В реальных же условиях соблюдается следующее соотношение:

$$P_H = 0,01\rho_{ж} \cdot H + P_p, \quad (1)$$

где P_H – внутриколонное давление жидкости на глубине H , МПа; H – глубина определения давления от устья, м; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости в эксплуатационной колонне, г/см³.

Таким образом, газ не может быть использован для получения информации о герметичности ЭК в рабочем режиме скважины и для количественного определения величины утечек жидкости через нарушение целостности колонн.

При создании на устье скважины избыточного давления P_p по схеме, приведённой на рис. 2, можно вызвать внутриколонные нагрузки, соответствующие нагружению колонны в рабочем режиме. В случае если герметичность колонны оценивается подачей фиксированного объема жидкости и созданием на устье избыточного давления P_p с последующим измерением его падения, не представляется возможности количественно оценить утечки жидкости через нарушение целостности колонны. Это объясняется тем, что величина утечки при таком способе проведения работ будет зависеть от переменного значения давления, снижающегося от P_p до 0. Кроме того, после падения давления на устье скважины до 0 понижения уровня жидкости вследствие неразрывности потока происходить не будет, то есть колонна останется заполненной жидкостью. Вследствие этого выбор в качестве измеряемого параметра положения уровня жидкости в колонне неправилен.

Таким образом, опрессовка жидкостью позволяет сделать вывод о состоянии герметичности эксплуатационных колонн по падению давления на устье скважины и не позволяет количественно определить утечку для рабочего режима скважины, когда $P_p = \text{const}$ и $\Delta Q = \text{const}$.

Рассмотрим возможность выполнения опрессовки с использованием системы жидкость-газ. Эта система предполагает заполнение нижней части ЭК жидкостью, а верхней – газом под давлением P_p . При проведении работ с использованием систем жидкость-газ возможны следующие варианты:

- создание избыточного рабочего давления газа на устье без предварительного долива жидкости в колонну выше статического уровня контактного водоносного горизонта (рис. 3);
- создание избыточного рабочего давления газа с доливом жидкости до устья эксплуатационной колонны (рис. 4).

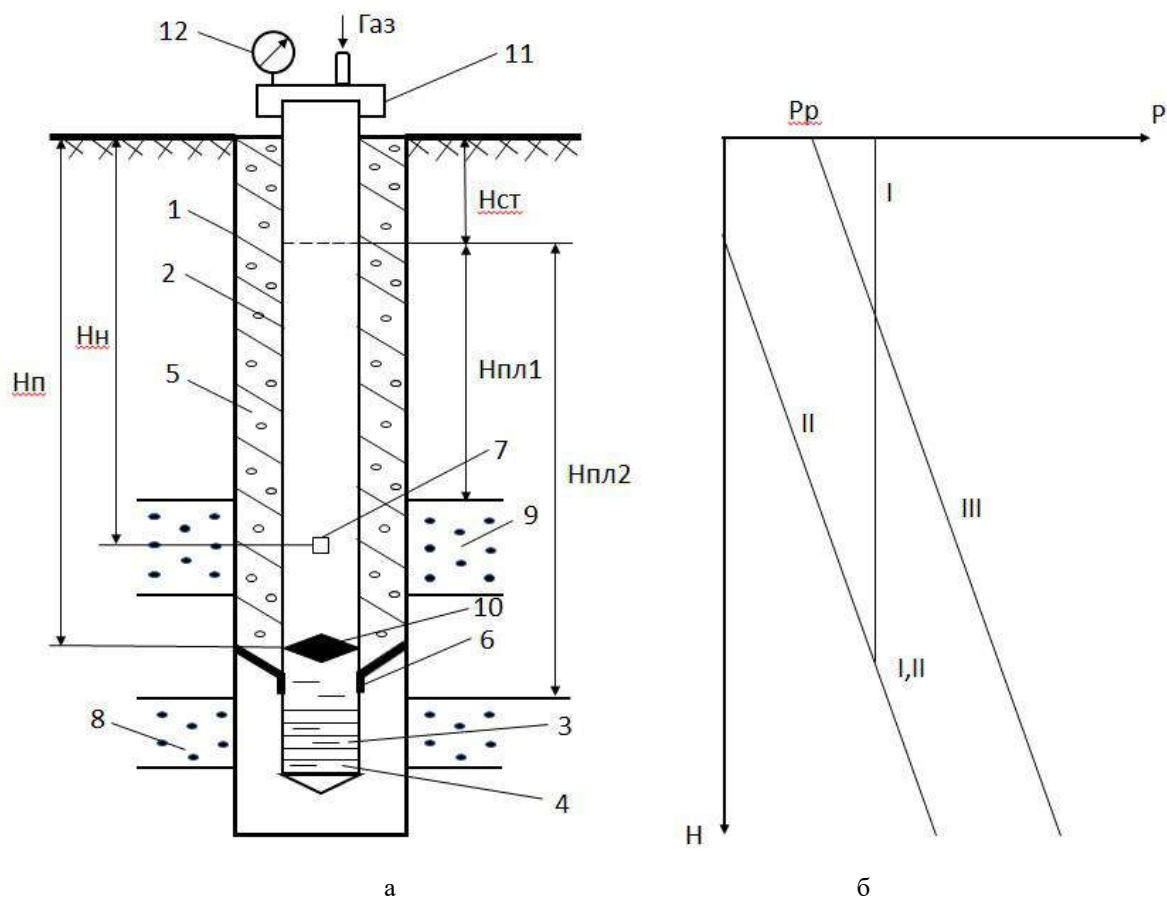


Рис. 1. Опрессовка эксплуатационных колонн газом: а – расчетная схема: 1 – скважина; 2 – ЭЖ; 3 – фильтр; 4 – отстойник; 5 – материал гидроизоляции; 6 – разобщающая манжета; 7 – место нарушения целостности ЭЖ; 8 – продуктивный горизонт; 9 – контактный водоносный горизонт; 10 – внутриколонный разобщающий пакер; 11 – опрессовочная головка; 12 – манометр; $H_{ст}$ – глубина статического уровня жидкости продуктивного и контактного водоносного горизонта от поверхности, м; $H_{пл1}$ – напор жидкости продуктивного и контактного водоносного горизонта над кровлей, м; $H_{пл2}$ – глубина установки внутриколонного разобщающего пакера от поверхности, м; $H_{п}$ – глубина нарушения целостности эксплуатационной колонны от поверхности, м; б – диаграммы внутриколонных давлений: I – при опрессовке, II – гидростатическое давление; III – в эксплуатационном режиме

Fig. 1. Pressure testing of production strings with gas: a is a design scheme: 1 is a borehole; 2 is a production string; 3 is a filter; 4 is a sedimentation tank; 5 is a waterproofing material; 6 is a separating gasket; 7 is a break of tightness of the production string; 8 is a productive horizon; 9 is a contact aquifer; 10 is a string isolation packer; 11 is a test head; 12 is a pressure gauge; $H_{ст}$ is depth of a static fluid level of a productive and contact water-bearing horizon from the surface, m; $H_{пл1}$ is liquid head of a productive and contact water-bearing horizon above the roof, m; $H_{пл2}$ is depth of installing a hook wall isolation packer from the surface, m; $H_{п}$ is depth of breaking of integrity of a production string from the surface, m; б is string pressure diagrams: I is during pressure testing, II is hydrostatic pressure; III is in an operation mode

При проведении работ по первому варианту при наличии гидравлической связи между внутриколонным пространством и контактным водоносным горизонтом создание избыточного давления газа на устье сопровождается понижением уровня жидкости в колонне, когда на границе раздела фаз давление P_p со стороны газа будет уравниваться давлением жидкости $P_{пл}$ контактного водоносного горизонта, то есть $P_p = P_{пл}$. Анализ этого варианта показывает, что после стабилизации положения уровня жидкости в эксплуатационной ко-

лонне из-за отсутствия перетоков жидкости через нарушения целостности давление газа не будет снижаться. Поэтому определить герметичность колонны по падению давления газа после его стабилизации при постоянном напоре жидкости контактного водоносного горизонта невозможно. В этом случае заполненный газом верхний участок эксплуатационной колонны представляет собой воздушный демпфер с постоянным давлением газа (без учета изменений вследствие его растворимости в жидкости и температурных колебаний).

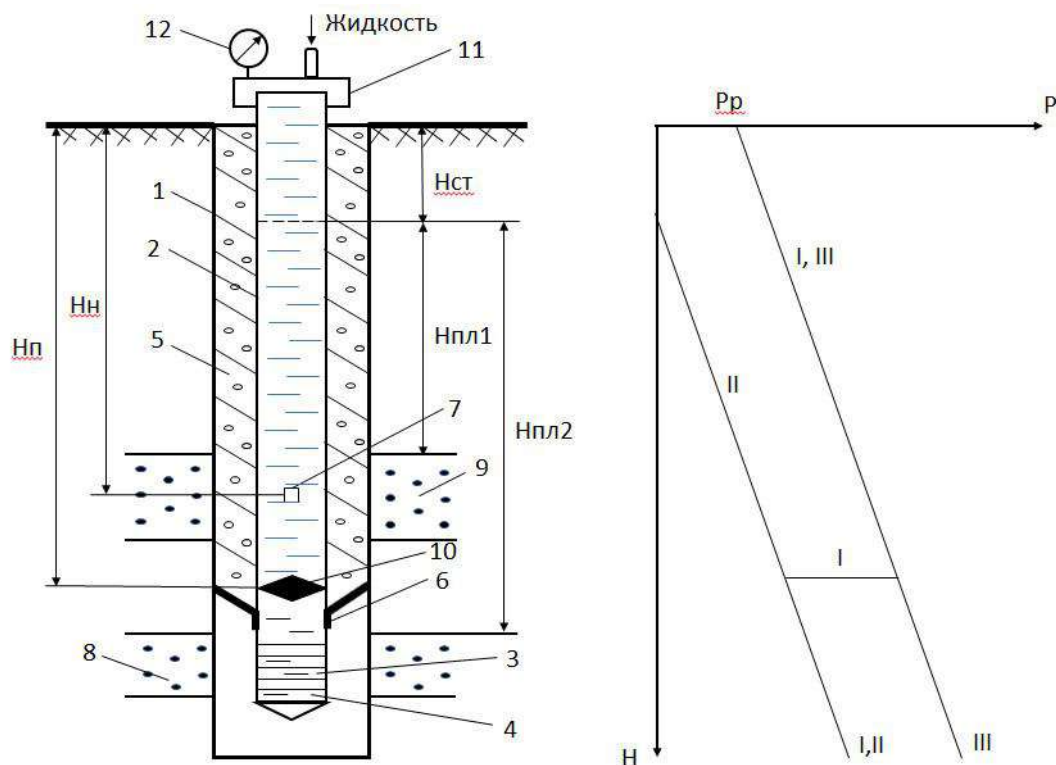


Рис. 2. Опрессовка эксплуатационных колонн жидкостью (обозначения те же, что на рис. 1)
 Fig. 2. Pressure testing of production strings with liquid (the legend is the same as in Fig. 1)

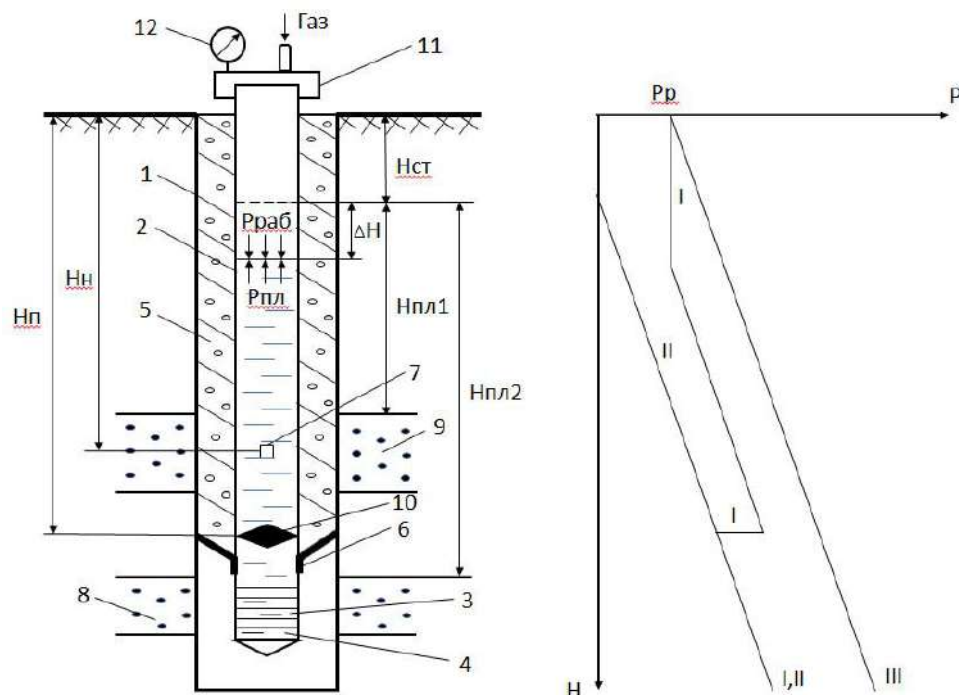


Рис. 3. Опрессовка системой жидкость-газ без заполнения эксплуатационных колонн жидкостью до устья (обозначения те же, что на рис. 1; $P_{пл}$ – пластовое давление жидкости контактного водоносного горизонта на границе раздела фаз газ-жидкость, МПа)
 Fig. 3. Pressure testing with the liquid-gas system without filling the production strings with liquid to the mouth (the legend is the same as in Fig. 1; $P_{пл}$ – reservoir pressure of a contact water-bearing horizon on the gas-liquid phase boundary, MPa)

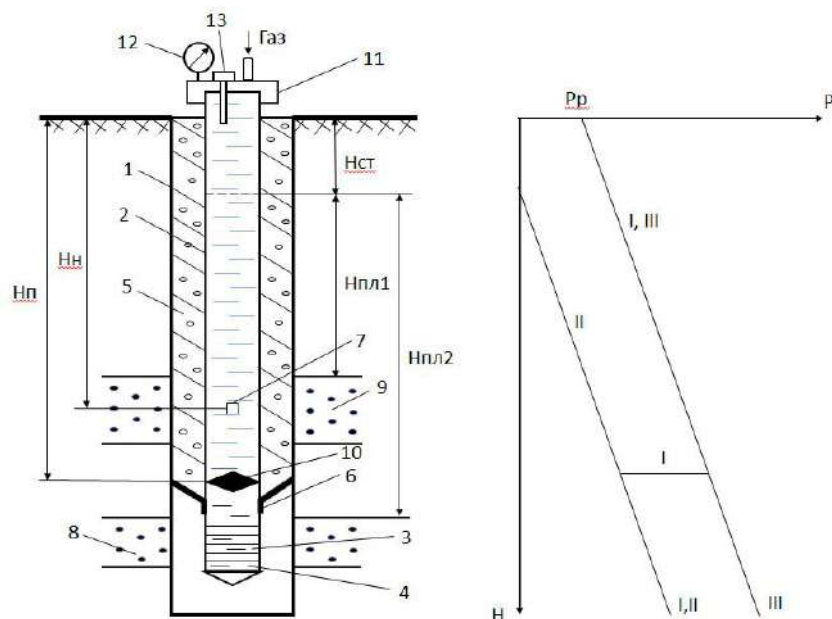


Рис. 4. Опрессовка эксплуатационных колонн системой жидкость-газ с заполнением колонны жидкостью до устья (обозначения те же, что и на рис. 1; 13 – пробка с мерной рейкой)

Fig. 4. Pressure testing of the production strings with the liquid-gas system with filling the strings with liquid to the mouth (the legend is the same as in Fig. 1; 13 is a plug with a gaging rod)

Проведение опрессовки для рассмотренного варианта не соответствует реальным условиям работы скважины. Применять его можно только для грубой оценки состояния герметичности колонны при соблюдении следующих условий:

- колонна считается герметичной, если при начальном создании избыточного давления газа не наблюдается его падение, то есть уровень жидкости в колонне не понижается;

- герметичность колонны можно определять по замерам положения уровня жидкости в скважине до начала опрессовки и через промежуток времени Δt после создания избыточного давления газа, причем замер уровня жидкости должен проводиться без снижения давления газа.

При варианте, приведенном на рис. 3, избыточное внутриколонное давление жидкости, создаваемое постоянным поддержанием давления газа P_p , соответствует внутриколонным нагрузкам рабочего режима скважины до места установки разобщающего внутриколонного опакера.

Сопоставление с ранее приведенными схемами показывает, что такой вариант опрессовки может быть использован для количественного определения утечек жидкости через нарушения целостности ЭК. Когда колонна заполнится жидкостью, на устье скважины создается постоянное избыточное давление газа P_p . После выдерживания скважины в таком режиме в течение определенного времени Δt давление газа резко снижается до нуля и производится повторный замер уровня жидкости в эксплуатационной колонне, например с использованием пробки с мерной

рейкой, установленной на опрессовочной головке. Продолжительность опрессовки Δt при этом может быть минимальной (в пределах нескольких минут) и определяется интенсивностью утечки ΔQ – чем меньше ΔQ , тем больше Δt .

Зная объем полости эксплуатационной колонны ΔV , м³, между замеряемыми начальным и конечным уровнями жидкости при опрессовке постоянным избыточным давлением газа P_p в течение времени Δt , с, величину утечки жидкости через нарушение целостности колонны в рабочем режиме скважины ΔQ , л/с, можно определить из соотношения

$$\Delta Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}. \tag{2}$$

Отсутствие падения уровня жидкости в колонне при проведении опрессовки по этому варианту будет свидетельствовать о герметичности колонны в рабочем режиме работы скважины.

Выбор в качестве измеряемого параметра падения давления газа на устье при подаче фиксированного объема газа в процессе проведения опрессовки по рассматриваемому варианту позволяет судить только о герметичности ЭК. Отсутствие падения давления будет свидетельствовать о ее герметичности, а наличие падения давления – о нарушении колонны. Однако указанный параметр не позволяет определить количественно величину утечки жидкости через нарушение колонны в рабочем режиме.

Опрессовка может быть выполнена с использованием разжимного пакера, принципиальная схема которого приведена на рис. 5.

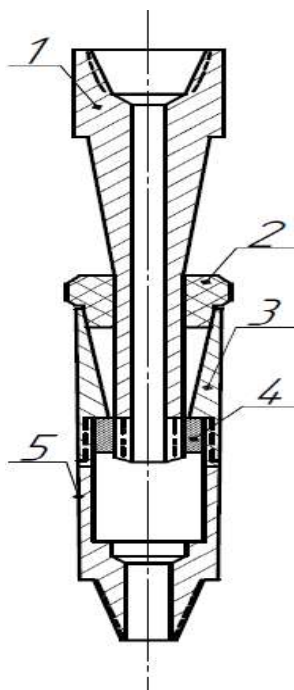


Рис. 5. Разжимной пакер: 1 – подвижный шток;
2 – упругий уплотнительный элемент;
3 – переходная муфта; 4 – упорная гайка;
5 – переходник

Fig. 5. Expansion packer: 1 is a movable rod;
2 is an elastic sealing element; 3 is an adapter
coupling; 4 is a thrust nut; 5 is an adapter

Пакер спускается в составе колонны бурильных труб внутрь ЭК. При постановке бурильной колонны в отстойник фильтра под действием веса труб, находящихся выше пакера, происходит разжимание упругого уплотнительного элемента 2. Этим достигается надежная изоляция надпакерного пространства от скважинного фильтра. После этого внутрь бурильных труб сбрасывается шарик (на схеме не показан) для перекрытия канала в подвижном штоке 1. Устье скважины может быть загерметизировано любым известным способом, в том числе и с помощью разжимного пакера.

Полученные результаты и их обсуждение

1. Применение газов для опрессовки ЭК во всем интервале от устья скважины до глубины установки внутриколонного пакера не позволяет создать внутриколонные нагрузки, соответствующие рабочему режиму скважины, и определить величину утечек через нарушение целостности колонны.

2. Использование жидкости для опрессовки во всем интервале от устья до глубины установки внутриколонного пакера позволяет определить герметичность колонны при выборе в качестве измеряемого параметра падения давления жидкости на устье скважины и дает возможность определить величину утечки жидкости через нарушение целостности колонны в рабочем режиме скважины.

3. Применение системы жидкость-газ без долива жидкости внутрь колонны выше статического уровня контактного водоносного горизонта не позволяет судить о герметичности колонны после стабилизации давления фиксированного объема газа в колонне. Этот вариант системы не позволяет создать внутриколонные нагрузки, соответствующие рабочему режиму скважины, и может быть использован только для грубой оценки состояния колонн по параметру падения давления от начального избыточного давления опрессовки или параметру положения уровня жидкости в колонне в процессе опрессовки.

4. Применение системы жидкость-газ с доливом жидкости до устья скважины дает возможность оценить герметичность ЭК и количественно определить величину утечек жидкости через нарушения целостности в колонне при создании внутриколонных нагрузок, соответствующих рабочему режиму скважины. При этом измеряемым параметром должен быть уровень жидкости в скважине при поддержании в течение всего периода опрессовки величины давления газа на устье скважины, соответствующей избыточному давлению подачи рабочих растворов.

Заключение

Таким образом, автором впервые изучены различные методы опрессовок эксплуатационных колонн технологических скважин скважинного подземного выщелачивания урана и разработаны рекомендации по их применению при их сооружении и эксплуатации в различных горногеологических условиях, приводимых в различных источниках [8-10].

Список источников

1. О расчете эксплуатационных колонн из полимерных материалов для условий многолетнемерзлых пород / Арсентьев Ю.А., Назаров А.П., Забайкин Ю.В., Иванов А.Г. // Актуальные проблемы и перспективы развития экономики: российский и зарубежный опыт. Научное обозрение. 2019, Вып. 21. С. 27-32.
2. Добыча урана подземным выщелачиванием в криолитозоне / под ред. Солодова И.Н. М.: ZetaPrint, 2022. 183 с.
3. Геотехнология урана (российский опыт): монография / под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. М.: КДУ: Университетская книга, 2017. 576 с.
4. Особенности применения полимерных обсадных труб при сооружении технологических скважин подземного выщелачивания урана / Иванов А.Г., Иванов Д.А., Арсентьев Ю.А., Назаров А.П., Калинин В.Н. // Известия высших учебных заведений. Серия «Геология и разведка». 2019. №4. С. 50-57.
5. Специальные работы для восстановления и поддержания рабочего состояния эксплуатационной колонны технологических скважин / Иванов А.Г., Михайлов А.Н., Алексеев Н.А., Иванов Д.А., Арсентьев Ю.А., Назаров А.П. // Разведка и охрана недр. 2020. №6. С. 52-57.

6. Использование зольных растворов ТЭЦ для предупреждения загрязнения недр технологическими растворами при сооружении, ремонте и ликвидации скважин подземного выщелачивания (СПВ) урана / Иванов А.Г., Иванов Д.А., Арсентьев Ю.А., Соловьев Н.В., Назаров А.П., Барашков И.А. // Разведка и охрана недр. 2020. №12. С. 34-41.
7. Уран российских недр / Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К. и др. М.: ВИМС, 2010. 850 с.
8. Бурение и оборудование геотехнологических скважин / Сергиенко И.А., Мосев А.Ф., Бочко Э.А., Пименов М.К. М.: Недра, 1984. 224 с.
9. Святецкий В.С., Полонянкина С.В. Состояние и перспективы развития уранодобывающей отрасли Российской Федерации // Пятый международный симпозиум «Уран: геология, ресурсы, производство», 23-24 ноября 2021. М.: ФБГУ «ВИМС», 2021.
10. Влияние генетических особенностей урановых месторождений Хиагдинского рудного поля на выбор технологии отработки рудных залежей скважинным подземным выщелачиванием / Гладышев А.В., Михайлов А.Н., Солодов И.Н., Суворов А.В. // Горный журнал. 2022. №4. С. 13-17.

References

1. Arsentyev Yu.A., Nazarov A.P., Zabaykin Yu.V., Ivanov A.G. On the calculation of production strings from polymeric materials for the conditions of permafrost rocks. *Aktualnye problemy i perspektivy razvitiya ekonomiki: rossiyskiy i zarubezhnyi opyt. Nauchnoe obozrenie* [Current Problems and Prospects of Economic Development: Russian and Foreign Experience. Scientific Review]. 2019;(21):27-32. (In Russ.)
2. Solodov I.N. *Dobycha urana podzemnym vyshchelachivaniem v kriolitozone* [Uranium mining by in-situ leaching in the cryolithic zone]. Moscow: ZetaPrint, 2022, 183 p. (In Russ.)
3. Solodov I.N., Kamnev E.N. *Geotekhnologiya urana (rossiyskiy opyt): monografiya* [Geotechnology of uranium (Russian experience): monograph]. Moscow: KDU, Universitetskaya kniga, 2017, 576 p. (In Russ.)
4. Ivanov A.G., Ivanov D.A., Arsentyev Yu.A., Nazarov A.P., Kalinichev V.N. Features of the application of polymer casing pipes in the construction of process wells of underground leaching of uranium. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya «Geologiya i razvedka»* [News of Higher Educational Institutions. Series: Geology and Exploration]. 2019;(4):50-57. (In Russ.)
5. Ivanov A.G., Mikhailov A.N., Alekseev N.A., Ivanov D.A., Arsentyev Yu.A., Nazarov A.P. Special work for the restoration and maintenance of the operating condition of production strings for process wells. *Razvedka i okhrana neдр* [Subsoil Exploration and Management]. 2020;(6):52-57. (In Russ.)
6. Ivanov A.G., Ivanov D.A., Arsentyev Yu.A., Soloviev N.V., Nazarov A.P., Barashkov I.A. Use of ash solutions of combined heat and power plants for prevention of contamination of the subsoil with technological solutions in the construction, repair and abandonment of wells of uranium underground leaching]. *Razvedka i okhrana neдр* [Subsoil Exploration and Management]. 2020(12):34-41. (In Russ.)
7. Mashkovtsev G.A., Konstantinov A.K., Miguta A.K. et al. *Uran rossiyskikh neдр* [Uranium of Russian subsoil]. Moscow: All-Russian Research Institute of Mineral Raw Resources, 2010, 850 p. (In Russ.)
8. Sergienko I.A., Mosev A.F., Bochko E.A., Pimenov M.K. *Burzenie i oborudovanie geotekhnologicheskikh skvazhin* [Drilling and equipment of geotechnological wells]. Moscow: Nedra, 1984, 224 p. (In Russ.)
9. Svyatetskiy V.S., Polonyankina S.V. State and prospects of the development of the uranium mining industry in the Russian Federation. *Pyatyi mezhdunarodnyi simpozium «Uran: geologiya, resursy, proizvodstvo»* [The 5th International Symposium “Uranium: Geology, Resources, and Production”]. Moscow: All-Russian Research Institute of Mineral Raw Resources, 2021. (In Russ.)
10. Gladyshev A.V., Mikhailov A.N., Solodov I.N., Suvorov A.V. Influence of genetic features of uranium deposits of the Khiagda ore field on the choice of technology for the development of ore deposits by borehole underground leaching. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2022;(4):13-17. (In Russ.)

Поступила 02.02.2024; принята к публикации 30.05.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 02/02/2024; revised 30/05/2024; published 27/06/2024

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

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

МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 549:54.055
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-79-87



ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ШЛАКОВ ПРОИЗВОДСТВА ПУДЛИНГОВОГО ЖЕЛЕЗА (НА ПРИМЕРЕ ВЕРХНЕСЫСЕРТСКОГО ЗАВОДА, СРЕДНИЙ УРАЛ)

Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Захаров А.В.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Уральский регион, как российский центр металлургии, за несколько веков работы накопил огромное количество шлакоотвалов, которые на данный момент практически не изучены, хотя могут быть полезны для народного хозяйства. К сожалению, утилизация шлаков в настоящее время происходит спонтанно и не учитывает возможности потенциальной переработки. Многие шлаки, содержащие ценные и редкие элементы, представляют собой потенциальную руду. **Цель работы.** Изучение минерального (вещественного) состава шлаков Верхнесысертского железодобывающего завода, расположенного на юге Свердловской области (Средний Урал). **Используемые методы.** Химический состав шлака установлен на рентгенофлуоресцентном волновом спектрометре XRF 1800 фирмы Shimadzu, а состав минералов определен на электронно-зондовом микроанализаторе CAMECA SX 100 с пятью волновыми спектрометрами. Фотографии минералов и их взаимоотношений друг с другом сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol. **Новизна.** Изучение и анализ вещественного состава шлаков проводился с использованием современной номенклатуры Международной минералогической ассоциации и применением классической минералогии. **Результат.** Впервые изучена минералогия железистых шлаков Верхнесысертского железодобывающего завода. Установлено, что данные шлаки сложены агрегатом фаялита и лайхунита и содержат обильную вкрапленность магнетита. Кроме того, в них присутствуют хромит, меррихьюит и нераскристаллизованное стекло. Данные шлаки являются отходами пудлингового производства железа, а температура их образования – 1200-1400°C. Лайхунит, возможно, является типоморфным минералом шлаков пудлингового процесса, так как технологическое перемешивание расплава приводит к его насыщению кислородом и окислению. **Практическая значимость.** Изученный шлак можно дополнительно перерабатывать. При использовании магнитной сепарации легко выделяется магнетит, который является рудой на железо, причем с ценными примесями хрома, ванадия и никеля. Сам шлак в виде блоков можно использовать как огнеупорный материал.

Ключевые слова: фаялит, лайхунит, магнетит, минералогия, шлаки пудлингового производства, Верхнесысертский железодобывающий завод

© Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Захаров А.В., 2024

Для цитирования

Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Захаров А.В. Вещественный состав шлаков производства пудлингового железа (на примере Верхнесысертского завода, Средний Урал) // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 79-87. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-79-87>



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

A MATERIAL COMPOSITION OF PUDDLING SLAGS (USING THE EXAMPLE OF THE VERKHNESYSERTSKY PLANT, THE MIDDLE URALS)

Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Zakharov A.V.

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

Abstract. Problem Statement (Relevance). The Ural region, as a Russian center of metallurgy, over several centuries of work has accumulated a huge number of slag dumps, which are now practically unexplored, although they can be useful for the national economy. Unfortunately, slag disposal currently occurs spontaneously and does not take into account the possibility of potential recycling. Many types of slags, containing valuable and rare elements, represent potential ore. **Objectives.** The study is aimed at investigating a mineral (material) composition of slags from the Verkhnesysertsky Iron Works located in the south of the Sverdlovsk Region (the Middle Urals). **Methods Applied.** The chemical composition of slag was determined with an XRF 1800 X-ray fluorescence wave spectrometer by Shimadzu, and a composition of minerals was determined with a CAMECA SX 100 electron probe microanalyzer with five wave spectrometers. Photographs of minerals and their relationships with one another were taken using a JSM-6390LV scanning electron microscope by Jeol. **Originality.** The material composition of slags was studied and analyzed using the modern nomenclature of the International Mineralogical Association and the application of classic mineralogy. **Findings.** The authors are the first to study mineralogy of ferruginous slags from the Verkhnesysertsky Iron Works. It has been established that these slags are composed of an aggregate of fayalite and laihunite and contain abundant dissemination of magnetite. In addition, they contain chromite, merrhueite and non-crystallized glass. These slags are waste from puddling iron production, and temperature of their formation is 1200-1400°C. Laihunite may be a typomorphic mineral of the slags of the puddling process, because the technological mixing of the melt leads to its saturation with oxygen and oxidation. **Practical Relevance.** The slag under study can be further processed. When using a magnetic separation, it is easy to get magnetite, which is an ore for iron with valuable impurities of chromium, vanadium and nickel. The slag in the shape of blocks can be used as a refractory material.

Keywords: fayalite, laihunite, magnetite, mineralogy, puddling slags, Verkhnesysertsky Iron Works

For citation

Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Zakharov A.V. A Material Composition of Puddling Slags (Using the Example of the Verkhnesysertsky Plant, the Middle Urals). *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 79-87. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-79-87>

Введение

Верхнесыертский железодельный завод расположен в 8 км к юго-западу от города Сысерть на современной западной окраине поселка Верхняя Сысерть (Свердловская область, Сыертский район). Он был основан в 1849 г. Павлом Дмитриевичем Соломирским (1798-1870), внуком известного заводчика А.Ф. Турчанинова. Предприятие сразу строилось как передельное, чтобы обеспечить переработку резко возросших объемов выплавляемого чугуна на реконструированном в тот момент Сыертском железодельном заводе. Первоначально на Верхнесыертском заводе действовало 7 кричных горнов, в которых контуазским способом делали полосовое железо. В 1854 г. завод полностью переделали под самое современное на тот момент пудлинговое производство, и в 1859 г. на предприятии запустили 6 пудлинговых и 5 сварочных печей. На тот момент на заводе работало около 350 мастеровых и простых работников. В 1861 г., после отмены крепостного права, завод стал работать с

перебоями, и практически сразу за долги был изъят из частной собственности и передан государству. В результате настойчивых ходатайств наследников А.Ф. Турчанинова предприятие в 1864 г. было возвращено П.Д. Соломирскому с рассрочкой уплаты долга на 24 года. Завод постепенно восстановил производство железа, а также началась его реконструкция. К сожалению, с 1870 г. на всех заводах Сыертского округа наступает упадок в связи со смертью хозяина.

В 1879 г. в Сыертский округ прибывает старший сын П.Д. Соломирского – Дмитрий Павлович (1838-1923), и работа предприятий оживает. На Верхнесыертском заводе железо начинают выпускать только к 1881 г. К этому времени было построено каменное здание для пудлингового производства, руины которого до сих пор сохранились на окраине поселка. На фабрике работали 4 пудлинговые и 3 газосварочные печи Сименса, а также 2 кузнечных горна и 2 машины для прокатки железа. Вокруг завода постепенно вырос небольшой поселок, так как многим рабочим было тяжело ходить на ночевку в город Сысерть. В

1883-1884 гг. из-за сильной засухи предприятие простаивало, но происходила модернизация производства. В 1890 г. на заводе были построены генераторы для действия газопудлинговых печей, а в 1894 г. сооружены новые сварочные печи. Завод постоянно развивался и наращивал производство железа. Так, в 1895 г. предприятие выдало почти 8 тыс. т металла. К сожалению, во время экономического кризиса 1900-1903 гг. завод постоянно сокращал выпуск железа и, в конце концов, в 1903 г. остановил свою работу. В 1912 г. Д.П. Соломирский продал все заводы Сысертского округа, в том числе и Верхнесысертский, иностранному акционерному обществу «Сысертский горный округ». В этом же году акции этой компании достались уже английскому акционерному обществу «Сысертская компания». Однако к восстановлению работы Верхнесысертского завода это не привело. С приходом советской власти остатки предприятия были национализированы, но иностранные акционеры успели всё ценное вывезти и распродать [1, 2].

Верхнесысертский завод за полвека своей работы почти все время использовал пудлинговый процесс для выплавки железа. Пудлингование было изобретено английским металлургом Генри Кортон в 1784 г. для переработки высокоуглеродистого хрупкого чугуна в мягкое низкоуглеродистое железо [3]. В рамках этого процесса чугун расплавляли совместно с кусками железистого шлака (при подаче воздуха и без смешивания с углем) и постоянно мешали расплав железным ломом, на который налипали частички чистого металла. В результате на ломе формировалась рыхлая тестоподобная крица железа весом 40-60 кг, которую уже вытаскивали из горна и отправляли далее в работу. Во время налипания железа расплав шлака постепенно кристаллизовался и его помешивание вызывало затруднение. Такая работа была очень трудоёмкой и выполняли её самые выносливые металлурги. На данный момент пудлинговый процесс получения железа устарел [3].

Изучение вещественного состава шлаков Верхнесысертского завода никем ранее не проводилось, поэтому мы и решили восполнить этот пробел настоящей статьёй.

Отбор образцов шлака и методы исследования

Шлаки Верхнесысертского завода рассеяны по всем окрестностям поселка, особенно их много отмечается вокруг руин завода и в рядом расположенной дамбе. Реконструкция дамбы происходила в советское время и, по всей видимости, большая часть шлакоотвала была использована для её отсыпки. В любом случае шлаковый материал является полностью доступным для отбора и изучения. Нами отбирались пробы вокруг и внутри заброшенного завода (привязка с GPS-навигатора – N 56°43'76.9'', E 60°74'19.6''), где остались фрагменты шлакоотвала и пудлинговых печей. Отобранные образцы шлака однообразны по внешнему виду, они черного цвета, пластинообразные, размером не более 50 см и с поверхности имеют

неровную бугристо-полосовидную поверхность, видимо из-за перемешивающих движений ломом. Шлаки на изломе практически не имеют пористости, они плотные и отличаются параллельно-шестоватым строением (за счет ориентированных игольчатых кристаллов основной массы). Все шлаки характеризуются слабой магнитностью и присутствием интенсивной побежалости в местах сколов. Количество пор в них не превышает 1-2%.

Все аналитические работы были проведены в Институте геологии и геохимии УрО РАН в лаборатории Физико-химических методов исследования. Химический состав шлака установлен на рентгенофлуоресцентном волновом спектрометре XRF 1800 фирмы Shimadzu (аналитик Л.А. Татарина). Химический состав минералов определен на электронно-зондовом микроанализаторе CAMECA SX 100 с пятью волновыми спектрометрами (аналитик Н.Н. Фаррахова). Фотографии минералов и их взаимоотношений друг с другом сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (аналитик Л.В. Леонова).

Полученные результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований нами установлено, что изученные шлаки сложены агрегатом фаялита и лайхунита и содержат обильную вкрапленность магнетита. Кроме того, в них присутствуют хромит, меррихьюит и нераскристаллизованное стекло. Химический состав шлака следующий (в вес.%): P₂O₅ – 0,50; SiO₂ – 24,50; TiO₂ – 0,09; V₂O₃ – 0,07; Cr₂O₃ – 0,08; Al₂O₃ – 1,22; FeO_{общ} – 72,00; MnO – 0,57; MgO – 0,53; CaO – 0,10; Na₂O – 0,12; K₂O – 0,19; Сумма 99,97. К сожалению, из-за высокого содержания железа в пробе, разделения его окисной и закисной формы не делалось. Потери при прокаливании не обнаружены, что указывает на хорошую сохранность породы и отсутствие вторичных изменений.

Фаялит (Fe²⁺₂[SiO₄]) является одним из главных породообразующих минералов шлака, он образует вытянутые скелетные кристаллы (обычные и футлярovidные), размером до 5 см по удлинению. Кристаллы обычно содержат пустоты, которые выполнены стеклом и рудным минералом. В краевой части индивидов часто отмечаются ориентированные включения, либо пустотелые, либо выполненные стеклом. Содержание фаялита около 40 об.% породы (рис. 1-4). По данным микронзондового анализа (табл. 1) индивиды имеют слабую зональность по магнию и железу, от центра к краю количество MgO падает с 1,9 до 1,3 мас.%, а FeO возрастает с 67,8 до 68,5 мас.%. При этом оливин относится к фаялиту с железистостью 95-96%. Из существенных примесей в минерале отмечаются магний (MgO до 1,9 мас.%) и марганец (MnO до 0,8 мас.%), что в пересчете на миналы дает 4,5% форстерита и 1% тефроита. Интересно, что при кристаллохимическом пересчете в формулах фаялита всегда есть легкий дефицит в позиции кремния, что говорит о возможном присутствии окисного железа в минерале.

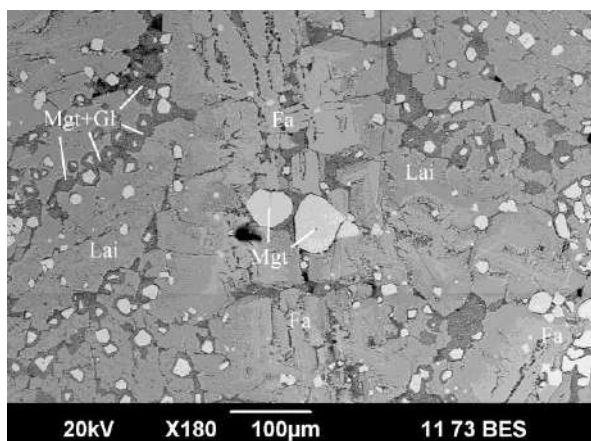


Рис. 1. Внешний вид шлака Верхнесыертского завода (Здесь и далее: фаялит (Fa), лайхунит (Lai), магнетит (Mgt), стекло (Gl)). BSE-фото
 Fig. 1. View of slag from the Verkhnesyertsky Plant. Here and further below: fayalite (Fa), laihunite (Lai), magnetite (Mgt), glass (Gl). BSE photo

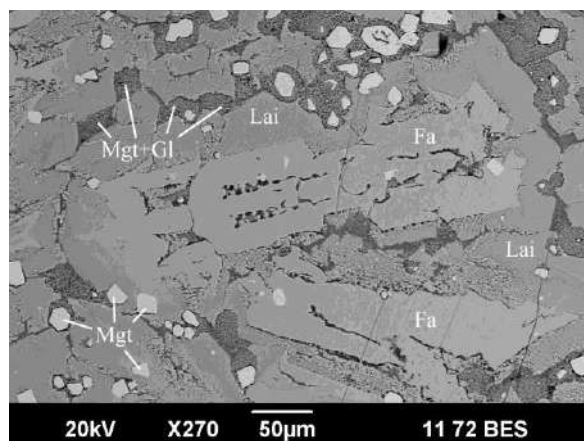


Рис. 2. Футляровидные кристаллы фаялита, обрастающие агрегатом лайхунита в матрице шлака. BSE-фото
 Fig. 2. Case-like crystals of fayalite surrounded by a laihunite aggregate in a slag matrix. BSE photo

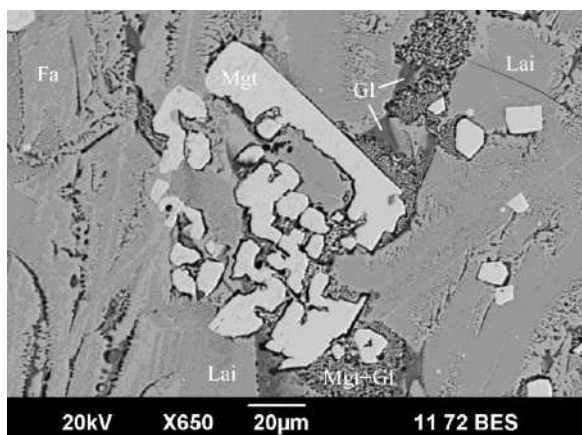


Рис. 3. Скелетный кристалл магнетита среди фаялит-лайхунитового агрегата в матрице шлака. BSE-фото
 Fig. 3. Skeletal magnetite crystal among a fayalite-laihunite aggregate in a slag matrix. BSE photo

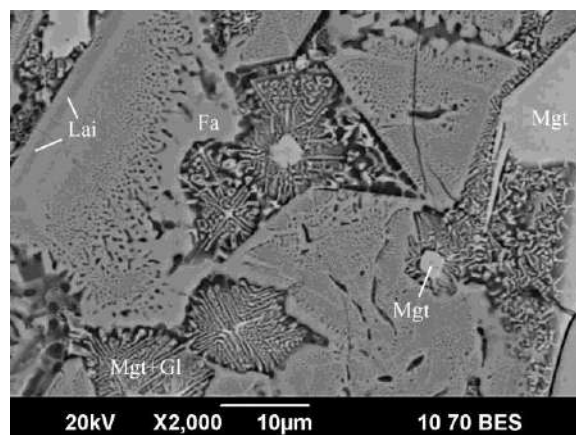


Рис. 4. Ориентированный распад магнетита в стекле в межзерновом пространстве агрегата фаялита и лайхунита. BSE-фото
 Fig. 4. Oriented dissolution of magnetite in glass in the intergranular space of a fayalite and laihunite aggregate. BSE photo

Таблица 1. Химический состав фаялита из шлака Верхнесыертского завода, мас. %

Table 1. Chemical composition of fayalite from slag from the Verkhnesyertsky Plant, % wt.

Номер анализа	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	NiO	ZnO	MnO	MgO	CaO	Сумма
1ц	28,97	0,03	0,03	67,85	0,17	0,07	0,82	1,87	–	99,81
1кр	29,32	–	0,05	68,01	0,10	0,04	0,73	1,52	0,01	99,78
2ц	29,19	0,09	0,06	68,22	0,13	0,08	0,70	1,46	–	99,93
2кр	29,65	0,06	0,02	68,49	0,12	0,06	0,75	1,29	0,02	100,46
5	29,04	0,06	0,06	68,48	0,11	–	0,72	1,50	0,01	99,98
Кристаллохимическая формула минерала (пересчет на 3 катиона)										
1ц	$(\text{Fe}_{1,90}\text{Mg}_{0,09}\text{Mn}_{0,02}\text{Ni}_{0,01})_{2,02}[\text{Si}_{0,98}\text{O}_4]$									
1кр	$(\text{Fe}_{1,91}\text{Mg}_{0,08}\text{Mn}_{0,02})_{2,01}[\text{Si}_{0,99}\text{O}_4]$									
2ц	$(\text{Fe}_{1,92}\text{Mg}_{0,08}\text{Mn}_{0,02})_{2,02}[\text{Si}_{0,98}\text{O}_4]$									
2кр	$(\text{Fe}_{1,92}\text{Mg}_{0,07}\text{Mn}_{0,02})_{2,01}[\text{Si}_{0,99}\text{O}_4]$									
5	$(\text{Fe}_{1,92}\text{Mg}_{0,08}\text{Mn}_{0,02})_{2,02}[\text{Si}_{0,98}\text{O}_4]$									

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

В природе подобный высокожелезистый фаялит практически не встречается, за исключением древних докембрийских сильнометаморфизованных железистых осадков [4]. В шлаках фаялит с таким химическим составом также является редкостью, обычно он содержит какие-либо значимые примеси (цинк – в медеплавильных отходах, марганец – в сыродутных шлаках и т.д.). Высокожелезистый фаялит встречается только в отходах передельного производства железа, например он описывался нами в шлаках Мариинского завода, расположенного близ города Ревда [5].

Лайхунит ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2[\text{SiO}_4]_2$), как и фаялит, тоже является главным породообразующим минералом в шлаке. Содержание лайхунита также составляет около 40 об.% породы. Минерал обростает, хотя местами и корродирует фулляровидные кристаллы фаялита, что хорошо видно в BSE-изображении (см. **рис. 1-4**). В центральной части индивидов содержит включения рудного минерала, а в краевой части – ориентированные полости. Микронзондовые анализы показали вполне однородный химический состав, который хорошо соответствует и пересчитывается на другой минерал из группы оливина – феррифаялит (устар. назв.) или лайхунит (**табл. 2**). Из значимых примесей в минерале отмечаются магний (MgO до 1,2 мас.%), марганец (MnO до 0,8 мас.%) и алюминий (Al_2O_3 до 0,5 мас.%).

На данный момент считается, что лайхунит является исключительно продуктом оксидизации фаялита [6]. В природе лайхунит встречается еще реже, чем фаялит, так как обычно его замещает. Он установлен в метеоритах, докембрийских метаморфических месторождениях железа и риолитах [7]. Как феррифаялит, он описывался в горелых терриконах Челябинского угольного бассейна, расположенных близ города Коркино [8]. В металлургических шлаках лайхунит тоже отмечается, хотя и нечасто, например он упоминался в древних медных шлаках юго-востока Болгарии [9]. Возможно, это связано с тем, что в некоторых случаях лайхунит путают с фаялитом (из-за близости

химических составов, рамановских спектров и др.), как, например, во время изучения железных шлаков сыродутного производства романского периода, обнаруженных в Испании [10].

Магнетит ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$) образует в шлаке рассеянную вкрапленность в виде отдельных октаэдрических, обычных и скелетных кристаллов размером до 90-100 мкм (см. **рис. 1-3**). Его содержание в шлаке не превышает 15 об.%, при этом большая часть магнетита сосредоточена в межзерновом пространстве фаялит-лайхунитового агрегата, где образует эффектные формы ориентированного распада в стекле (см. **рис. 4**). Местами распад образует форму скелетного октаэдрического кристалла. По данным микронзондового анализа рудный минерал относится к магнетиту и отличается неоднородным составом (**табл. 3**), в первую очередь за счет большой вариации по хромю (Cr_2O_3 от 0,4 до 25,5 мас.%). Таким образом, в шлаке встречаются три типа шпинелида: практически чистый беспримесный магнетит (см. **табл. 3**, анализ 1), хромсодержащий (см. **табл. 3**, анализы 2-4) и хромистый магнетит (см. **табл. 3**, анализ 5). Последний характерен для крупных индивидов, где слагает краевые зоны, а в центре располагается хромит. Магнетит без примесей образует мелкие кристаллы и ориентированный распад в стекле, а предельно хромистый с содержанием Cr_2O_3 от 23,2 до 25,5 мас.% образует каймы вокруг хромита. При этом основная масса магнетита, рассеянного по матрице шлака, является хромсодержащей с количеством Cr_2O_3 от 1,8 до 9,8 мас.% и содержит ценные примеси ванадия (V_2O_5 до 0,5 мас.%) и никеля (NiO до 0,2 мас.%).

Магнетит является одним из самых распространенных шпинелидов в природе. Он встречается практически везде – от магматических пород до метеоритов и кор выветривания, вполне обычный минерал для шлаков производства меди и железа [11, 12]. На уральских объектах нами упоминался магнетит в медных шлаках Сысертского железнорудного завода [13].

Таблица 2. Химический состав лайхунита из шлака Верхнесысертского завода, мас.%.
Table 2. Chemical composition of laihunite from slag from the Verkhnesyertsy Plant, % wt.

Номер анализа	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	NiO	MnO	MgO	Сумма
1	34,56	0,05	0,37	45,40	18,59	0,04	0,73	1,19	100,93
2	35,52	0,02	0,43	45,81	17,57	0,10	0,66	1,20	101,31
3	34,81	0,04	0,42	45,16	18,62	0,01	0,68	0,81	100,54
4	34,99	–	0,42	45,43	18,44	0,04	0,68	0,71	100,71
5	34,22	–	0,47	44,95	18,82	0,02	0,75	0,53	99,76
Кристаллохимическая формула минерала (пересчет на 5 катионов)									
1	$(\text{Fe}_{0.89}\text{Mg}_{0.10}\text{Mn}_{0.04})_{1.03}(\text{Fe}_{1.96}\text{Al}_{0.03})_{1.99}[\text{Si}_{1.98}\text{O}_8]$								
2	$(\text{Fe}_{0.84}\text{Mg}_{0.10}\text{Mn}_{0.03}\text{Ni}_{0.01})_{0.98}(\text{Fe}_{1.97}\text{Al}_{0.03})_{2.00}[\text{Si}_{2.02}\text{O}_8]$								
3	$(\text{Fe}_{0.90}\text{Mg}_{0.07}\text{Mn}_{0.03})_{1.00}(\text{Fe}_{1.96}\text{Al}_{0.03})_{1.99}[\text{Si}_{2.01}\text{O}_8]$								
4	$(\text{Fe}_{0.90}\text{Mg}_{0.06}\text{Mn}_{0.03})_{0.99}(\text{Fe}_{1.97}\text{Al}_{0.03})_{2.00}[\text{Si}_{2.01}\text{O}_8]$								
5	$(\text{Fe}_{0.91}\text{Mg}_{0.05}\text{Mn}_{0.04})_{1.00}(\text{Fe}_{1.97}\text{Al}_{0.03})_{2.00}[\text{Si}_{2.00}\text{O}_8]$								

Примечание. Здесь и далее расчет окисного и закисного железа производился согласно стехиометрии минерала.

Таблица 3. Химический состав магнетита из шлака Верхнесыертского завода, мас. %
Table 3. Chemical composition of magnetite from slag from the Verkhnesyertsy Plant, % wt.

Номер анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	NiO	MnO	MgO	Сумма
1	0,90	0,10	0,89	0,25	0,40	65,93	32,28	0,11	0,16	0,21	101,24
2	0,88	0,37	1,06	0,30	1,82	63,54	32,62	0,18	0,12	0,10	100,99
3	0,81	0,24	1,14	0,27	5,23	60,33	32,43	0,20	0,09	0,11	100,84
4	0,44	0,01	1,18	0,13	9,80	56,74	31,49	0,09	0,16	0,22	100,27
5	0,34	0,31	1,38	0,51	25,54	39,93	31,93	0,15	0,12	0,22	100,43
Кристаллохимическая формула минерала (пересчет на 3 катиона)											
1	$(\text{Fe}_{1,01}\text{Mg}_{0,01}\text{Mn}_{0,01})_{1,03}(\text{Fe}_{1,88}\text{Al}_{0,04}\text{Si}_{0,03}\text{Cr}_{0,01}\text{V}_{0,01})_{1,97}\text{O}_4$										
2	$(\text{Fe}_{1,02}\text{Mg}_{0,01}\text{Ni}_{0,01})_{1,04}(\text{Fe}_{1,81}\text{Cr}_{0,05}\text{Al}_{0,05}\text{Si}_{0,03}\text{V}_{0,01}\text{Ti}_{0,01})_{1,96}\text{O}_4$										
3	$(\text{Fe}_{1,01}\text{Mg}_{0,01}\text{Ni}_{0,01})_{1,03}(\text{Fe}_{1,71}\text{Cr}_{0,16}\text{Al}_{0,05}\text{Si}_{0,03}\text{V}_{0,01}\text{Ti}_{0,01})_{1,97}\text{O}_4$										
4	$(\text{Fe}_{1,00}\text{Mg}_{0,01}\text{Mn}_{0,01})_{1,02}(\text{Fe}_{1,62}\text{Cr}_{0,29}\text{Al}_{0,05}\text{Si}_{0,02})_{1,98}\text{O}_4$										
5	$(\text{Fe}_{1,00}\text{Mg}_{0,01})_{1,02}(\text{Fe}_{1,13}\text{Cr}_{0,76}\text{Al}_{0,06}\text{V}_{0,01}\text{Ti}_{0,01}\text{Si}_{0,01})_{1,98}\text{O}_4$										

Хромит (FeCr₂O₄) в шлаке встречается редко, он слагает центральные части крупных индивидов хромсодержащего магнетита размером не более 50 мкм. В BSE-изображении хромит выглядит более темным, чем магнетит. По данным микронзондового анализа химический состав минерала следующий (в мас.%, среднее из 4-х анализов): SiO₂ – 0,28; TiO₂ – 0,18; Al₂O₃ – 1,90; Cr₂O₃ – 36,50; V₂O₃ – 0,44; Fe₂O₃ – 28,18; FeO – 31,70; MnO – 0,17; MgO – 0,32; сумма 99,67. Пересчет дает такую эмпирическую формулу: (Fe_{0,99}Mg_{0,02}Mn_{0,01})_{1,02}(Cr_{1,08}Fe_{0,79}Al_{0,08}V_{0,01}Ti_{0,01}Si_{0,01})_{1,98}O₄, то есть он является железистым хромитом с высоким содержанием минала магнетита (до 40%). В литосфере хромит является обычным минералом ультрабазитов и связанных с ними хромититов [14]. В металлургических шлаках хромшпинелид встречается достаточно редко. Например, нами на уральских заводах хромит фиксировался только в шлаках Мариинского передельного [5] и Режского никелевого [15] предприятий.

Стекло является редкой фазой для данного шлака, содержание которой не превышает 5 об.%. Стекло встречается исключительно совместно с магнетитом (см. рис. 1-4), выполняя интерстиции в фаялит-лайхунитовом агрегате. При этом на контакте с оливинами местами фиксируются участки чистого стекла (без включений магнетита), вполне пригодные для микронзондового анализа, размером до 15-20 мкм. Химический состав стекла неоднородный (в мас. %): P₂O₅ – 0,78-5,54; SiO₂ – 43,72-46,03; TiO₂ – 0,29-0,47; Al₂O₃ – 15,21-16,08; FeO – 29,40-32,76; MnO – 0,58-0,95; CaO – 0,86-2,20; Na₂O – 0-0,49; K₂O – 0,30-0,98; сумма 96,28-98,81. Судя по недостатку суммы анализов, вещество содержит небольшое количество воды. На петрохимической диаграмме TAS для вулканических пород [16] данное стекло попадет в поле низкощелочных базальтов.

Меррихьюит ((K,Na)₂Fe²⁺₅[Si₁₂O₃₀]) слагает крайне редкие изометричные и удлинённые индивиды размером до 5 мкм среди стекла, которое образует

включения в фаялите. По данным микронзондового анализа минерал имеет следующий состав (в мас.%, среднее из 2-х анализов): SiO₂ – 60,15; Al₂O₃ – 1,04; FeO – 30,42; MnO – 0,38; Na₂O – 1,97; K₂O – 5,02; сумма 98,98, что хорошо соответствует меррихьюиту из группы миларита-осумилита. Кристаллохимический пересчет на эмпирическую формулу это подтверждает: (K_{1,25}Na_{0,74})_{1,99}(Fe_{4,96}Mn_{0,06})_{5,02}[(Si_{11,74}Al_{0,25})_{11,99}O₃₀]. Образование такого интересного и специфического минерала, возможно, связано с попаданием в железистый расплав кварцевых песчинок (дело в том, что иногда поддоны для пудлингового процесса делали из песка [3]). В природе меррихьюит встречается редко, обычно как минерал метеоритов (хондритов), где он, собственно, и был впервые открыт [17], и реже – базальтоидов [18]. В шлаках меррихьюит до данного момента не описывался, при этом сам осумилит отмечался в горелых отвалах угольных месторождений [8].

Исследованная минералогия шлаков Верхнесыертского завода указывает на то, что рудами для получения железа являлись бурые железняки из кор выветривания по ультраосновным породам. Об этом говорит обогащение практически всех минералов хромом и никелем, вплоть до появления собственного минерала хрома – хромита. То есть сначала апоультраосновные бурые железняки доменным процессом переплавлялись на Сыертском заводе в чугуны, который уже в смеси с железистыми шлаками на Верхнесыертском заводе с помощью пудлингового процесса очищался до железа. По литературным данным температура плавления чугуна в пудлинговом процессе составляла 1200-1400°C, причем чем больше в чугуне выгорало углерода, тем выше становилась температура расплава [3].

Находка лайхунита в изученных шлаках позволяет нам сделать интересные выводы. Во-первых, этот оливин, по всей видимости, является типоморфным минералом шлаков пудлингового производства, так как при постоянном помешивании расплава происходит его насыщение кислородом и образование в шла-

ках сильно окисленных фаз. Во-вторых, взаимоотношения минералов в данном шлаке показывают, что лайхунит может сразу кристаллизоваться в виде самостоятельного минерала, а не только замещать, как считалось ранее [6], уже имеющуюся матрицу фаялита. В-третьих, распространение лайхунита в металлургических шлаках может быть гораздо более широким, так как его путают с похожим фаялитом. Особенно это касается сильножелезистых шлаков, получаемых в резко окислительных условиях.

Изученный шлак можно использовать во вторичной переработке. В нем в больших количествах находится магнетит, который сам по себе является рудой на железо, причем с ценными примесями хрома, ванадия и никеля. При этом магнетит легко можно выделить, применяя магнитную сепарацию. Верхнесысертский шлак в виде породы вполне можно использовать как огнеупорный материал. Он прочный, массивный (практически не содержит поры) и часто формованный (почти все образцы имеют форму плитняка).

Заключение

Таким образом, впервые изучена минералогия железистых шлаков Верхнесысертского железоделательного завода. Установлено, что изученные шлаки сложены агрегатом фаялита и лайхунита и содержат обильную вкрапленность магнетита. Кроме того, в них присутствуют хромит, меррихьюит и нераскристаллизованное стекло. Лайхунит, возможно, является типоморфным минералом шлаков пудлингового процесса, так как постоянное технологическое перемешивание расплава приводит к его насыщению кислородом и окислению. Изученные шлаки являются отходами пудлингового производства железа, а температура их образования 1200-1400°C.

Список источников

1. Металлургические заводы Урала XVII – XX вв. Энциклопедия / под ред. В.В. Алексеева. Екатеринбург: Изд-во Академкнига, 2001. 536 с.
2. Савичев А.А. Архитектурное достояние Сысерти. Ч. 1. Исторический центр. Екатеринбург: Изд-во «Уральский рабочий», 2018. 200 с.
3. Металлургия и время. Энциклопедия. В 4 т. Т. 2. Фундамент индустриальной цивилизации. Возрождение и Новое время / Карабасов Ю.С., Черноусов П.И., Коротченко Н.А., Голубев О.В. М.: Изд-во «Дом МИСиС», 2011. 216 с.
4. Frisch T., Herd R.K. Highly metamorphosed iron formation on Arcedeckne Island, Boothia Peninsula, Arctic Canada, and the paragenesis of harrisonite, $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})_6(\text{SiO}_4)_2(\text{PO}_4)_2$ // *Canadian Mineralogist*. 2010, vol. 48, no. 4, pp. 1005-1024. DOI: 10.3749/canmin.48.4.1005
5. Козлов П.С., Ерохин Ю.В. Новые данные по фаялитовому шлаку Маринского передельного завода // *Минералогия техногенеза*. 2013. №14. С. 67-76.
6. Laihunitization as a mechanism of olivine oxidation / Khisina N.R., Khranov D.A., Kleschev A.A., Lang-

- er K. // *European Journal of Mineralogy*. 1998, vol. 10, pp. 229-238.
7. Fayalite oxidation processes in Obsidian Cliffs rhyolite flow, Oregon / Martin A.M., Medard M., Devovard B., Keller L.P., Richter K., Devidal J.-L., Rahman Z. // *American Mineralogist*. 2015, vol. 100, pp. 1153-1164. DOI: 10.2138/am-2014-5042
8. Чесноков Б.В., Щербакова Е.П. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза). М.: Наука, 1991. 152 с.
9. Tzankova N., Stavrakeva D. Mineralogical study of archaeological cooper slags found in the area of Krushevets Village, SE Bulgaria // *Geologica Balcanica*. 2020, vol. 49, no. 2, pp. 3-23.
10. Mineralogical characterization of slags from the Oiola Site (Biscay, Spain) to assess the development in bloomery iron smelting technology from the Roman Period to the Middle Ages / Portillo-Blanco H., Zuluaga M.C., Ortega L.A., Alonso-Olazabal A., Cepeda-Ocampo J.J., Salcedo A.M. // *Minerals*. 2020, vol. 10, article 321. DOI: 10.3390/min10040321
11. Береговский В.И., Кистяковский Б.Б. Металлургия меди и никеля. М.: Металлургия, 1971. 456 с.
12. Piatak N.M., Seal II R.R. Mineralogy and environmental geochemistry of historical iron slag, Hopewell Furnace National Historic Site, Pennsylvania, USA // *Applied Geochemistry*. 2012, vol. 27, no. 3, pp. 623-643. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2011.12.011
13. Минералогия медных шлаков Сысертского железоделательного завода, Средний Урал / Ерохин Ю.В., Пономарев В.С., Захаров А.В., Леонова Л.В. // *Минералогия*. 2023. Т. 9. №2. С. 30-40. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-3
14. Петрология и хромитоносность ультраосновного массива Рай-Из (Полярный Урал) / Вахрушева Н.В., Ширяев П.Б., Степанов А.Е., Богданова А.Р. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. 265 с.
15. Ерохин Ю.В. Минералогия шлаков Режевского никелевого завода // *Минералогия техногенеза*. 2012. №13. С. 50-64.
16. A chemical classification of volcanic rocks based on the Total-Alkali-Silica diagram / Bas M.J.L., Maitre R.W.L., Streckeisen A., Zanettin B. // *Journal of Petrology*. 1986, vol. 27, no. 3, pp. 745-750. DOI: 10.1093/peetrology/27.3.745
17. Dodd R.T., Van Schmus W.R., Marvin U.B. Merrihueite, a new alkali-ferromagnesian silicate from the Mezö-Madaras chondrite // *Science*. 1965, vol. 149, pp. 972-974. DOI: 10.1126/science.149.3687.972
18. Neue mineralfunde im oststeirischen Vulkangebiet / Postl W., Taucher J., Moser B. // *Mitteilungen der Abteilung Mineralogie am Landesmuseum Joanneum*. 1996, vol. 60-61, pp. 3-76.

References

1. Alekseev V.V. *Metallurgicheskie zavody Urala XVII – XX vv. Entsiklopediya* [Metallurgical plants of the Urals in the 17th – 20th centuries. Encyclopedia]. Yekaterin-

- burg: Academic Book Publishing House, 2001, 536 p. (In Russ.)
- Savichev A.A. *Arkhitekturnoe dostoyanie Syserti. Chast 1. Istoricheskiy tsentr* [Architectural heritage of Sysert. Part 1. Historical center]. Yekaterinburg: Ural Worker Publishing House, 2018, 200 p. (In Russ.)
 - Karabasov Yu.S., Chernousov P.I., Korotchenko N.A., Golubev O.V. *Metallurgiya i vremya. Entsiklopediya. V 4 t. T. 2. Fundament industrialnoy tsivilizatsii. Vozrozhdenie i Novoe vremya.* [Metallurgy and time. Encyclopedia. In 4 volumes. Vol. 2. Foundation of the industrial civilization. The Renaissance and Modern Period]. Moscow: Moscow Institute of Steel and Alloys, 2011, 216 p. (In Russ.)
 - Frisch T., Herd R.K. Highly metamorphosed iron-formation on Arcedekne Island, Boothia Peninsula, Arctic Canada, and the paragenesis of harrisonite, $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})_6(\text{SiO}_4)_2(\text{PO}_4)_2$. *Canad. Miner.* 2010;48(4): 1005-1024. DOI:10.3749/canmin.48.4.1005
 - Kozlov P.S., Erokhin Yu.V. New data on fayalite slag from of the Mariinsky Processing Plant. *Mineralogiya tekhnogeneza* [Technogenesis Mineralogy]. 2013;(14): 67-76. (In Russ.)
 - Khisina N.R., Khramov D.A., Kleshev A.A., Langer K. Laihunitization as a mechanism of olivine oxidation. *European Journal of Mineralogy.* 1998;10:229-238.
 - Martin A.M., Medard M., Devovard B., Keller L.P., Righter K., Devidal J.-L., Rahman Z. Fayalite oxidation processes in Obsidian Cliffs rhyolite flow, Oregon. *American Mineralogist.* 2015;100:1153-1164. DOI:10.2138/am-2014-5042
 - Chesnokov B.V., Shcherbakova E.P. *Mineralogiya gorelykh otvalov Chelyabinskogo ugolnogo basseyna (opyt mineralogii tekhnogeneza)* [Mineralogy of burnt dumps of the Chelyabinsk coal basin (the experience of technogenesis mineralogy)]. Moscow: Science, 1991, 152 p. (In Russ.)
 - Tzankova N., Stavrakeva D. Mineralogical study of archaeological cooper slags found in the area of Krushevets Village, SE Bulgaria. *Geologica Balcanica.* 2020;49(2):3-23.
 - Portillo-Blanco H., Zuluaga M.C., Ortega L.A., Alonso-Olazabal A., Cepeda-Ocampo J.J., Salcedo A.M. Mineralogical characterization of slags from the Oiola Site (Biscay, Spain) to assess the development in bloomery iron smelting technology from the Roman Period to the Middle Ages. *Minerals.* 2020;10:321. DOI: 10.3390/min10040321
 - Beregovsky V.I., Kistyakovskiy B.B. *Metallurgiya medi i nikelya* [Metallurgy of copper and nickel]. Moscow: Metallurgy Publishing House, 1971, 456 p. (In Russ.)
 - Piatak N.M., Seal II R.R. Mineralogy and environmental geochemistry of historical iron slag, Hopewell Furnace National Historic Site, Pennsylvania, USA. *Applied Geochemistry.* 2012;27(3):623-643. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2011.12.011
 - Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S., Zakharov A.V., Leonova L.V. Mineralogy of copper slags of the Sysert iron-working plant, the Middle Urals. *Mineralogiya* [Mineralogy]. 2023;9(2):30-40. (In Russ.) DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-2-3
 - Vakhrusheva N.V., Shiryaev P.B., Stepanov A.E., Bogdanova A.R. *Petrologiya i khromitonosnost ultraosnovnogo massiva Rai-Iz (Polyarnyi Ural)* [Petrology and chromite content of the Rai-Iz ultramafic massif (the Polar Urals)]. Yekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2017, 265 p. (In Russ.)
 - Erokhin Yu.V. Mineralogy of slags from the Rezhvesky Nickel Plant. *Mineralogiya tekhnogeneza* [Technogenesis Mineralogy]. 2012;(13):50-64. (In Russ.)
 - Bas M.J.L., Maitre R.W.L., Streckeisen A., Zanettin B. A chemical classification of volcanic rocks based on the Total-Alkali-Silica diagram. *Journal of Petrology.* 1986;27(3):745-750. DOI: 10.1093/petrology/27.3.745
 - Dodd R.T., Van Schmus W.R., Marvin U.B. Merrihueite, a new alkali-ferromagnesian silicate from the Mezö-Madaras chondrite. *Science.* 1965;149:972-974. DOI:10.1126/science.149.3687.972
 - Postl W., Taucher J., Moser B. Neue Mineralfunde im oststeirischen Vulkangebiet. *Mitteilungen der Abteilung Mineralogie am Landesmuseum Joanneum.* 1996;60-61:3-76.

Поступила 16.01.2024; принята к публикации 14.02.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 16/01/2024; revised 14/02/2024; published 27/06/2024

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

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

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

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

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

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

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.9; 620.171.5; 621.927.08; 675.8
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-88-100



ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПРОНИКАНИИ ЛЕЗВИЙ ИНСТРУМЕНТА В УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сергеев Ю.С.¹, Платов С.И.², Сергеев С.В.¹, Гузеев В.И.¹, Пузанков М.С.¹, Шадрин П.А.¹, Козлов А.В.¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Для удешевления изделий из металлоподобных, вариативных минеральных и конвергентных композитов дисперсные компоненты на производстве стремятся получать селективно при переработке отходов упруговязкопластичных материалов. В частности, в соответствии с требованиями к изделиям такие отходы измельчают во вторичную крошку, стружку или волокна резанием, обеспечивая требуемую геометрию, не нарушая структуру и физико-механические свойства вещества. Если для изучения структуры, например, волокнистых сред природного происхождения достаточно применить микроскоп, то их физико-механические свойства, как правило, определяют только эмпирическим путем, причем величины их параметров могут существенно колебаться в зависимости от природных особенностей их образования. Такие параметры являются основой не только для развития производственно-технической базы, но и для выполнения научных исследований. **Цель работы.** Для наглядности измерения напряжений и деформаций в упруговязкопластичных средах целесообразнее всего проводить поляризационно-оптическим методом с использованием эквивалентных оптически чувствительных материалов. **Используемые методы.** Статья посвящена подбору рецептов образцов из эквивалентных материалов с учетом коэффициентов подобия для модельной оценки напряженно-деформированного состояния различных видов кож при проникании в них имитатора двухлезвийного инструмента – диспергатора. **Результат.** В работе описана методика проведения модельного эксперимента, оценены прочностные и силовые характеристики процесса проникания, а также приведены визуальные изображения возникающих при этом напряжений в эквивалентных прозрачных оптически чувствительных материалах. Полученные результаты могут быть полезны исследователям, материаловедом при разработке природоподобных композитов, конструкторам-разработчикам новых способов и устройств для селективного измельчения отходов упруговязкопластичных материалов, а также переработчикам отходов.

Ключевые слова: моделирование, поляризационно-оптический метод, коэффициенты подобия, оценка напряжений и деформаций в материале, эквивалентные оптически чувствительные материалы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (региональный конкурс Челябинской области) № 22-29-20067, <https://rscf.ru/project/22-29-20067/>.

© Сергеев Ю.С., Платов С.И., Сергеев С.В., Гузеев В.И., Пузанков М.С., Шадрин П.А., Козлов А.В., 2024

Для цитирования

Применение поляризационно-оптического метода для оценки деформационных и силовых характеристик при проникании лезвий инструмента в упруговязкопластичные материалы / Сергеев Ю.С., Платов С.И., Сергеев С.В., Гузеев В.И., Пузанков М.С., Шадрин П.А., Козлов А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 88-100. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-88-100>



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

APPLICATION OF A POLARIZATION OPTICAL METHOD FOR ASSESSING DEFORMATION AND FORCE CHARACTERISTICS WHEN CUTTING TOOL EDGES PENETRATE ELASTOVISCOPLASTIC MATERIALS

Sergeev Yu.S.¹, Platov S.I.², Sergeev S.V.¹, Guzeev V.I.¹, Puzankov M.S.¹, Shadrin P.A.¹, Kozlov A.V.¹

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). In order to reduce the cost of products made of metal-like, variotropic mineral and convergent composites, dispersive components are sought to be produced selectively when processing elastic-viscous-plastic material waste. In particular, in accordance with the requirements for the products, such wastes are crushed into secondary granules, chips or fibers by cutting, providing the required geometry without disturbing the structure and physical and mechanical properties of the substance. If to study the structure, for example, of fibrous media of a natural origin, it is enough to apply a microscope, their physical and mechanical properties, as a rule, are determined only empirically, and the values of their parameters can vary significantly depending on the natural features of their formation. Such parameters are the basis not only for the development of the production and technical base, but also for scientific research. **Objectives.** For clarity, it is more expedient to measure stresses and deformations in elastic-viscous-plastic media by applying the polarization optical method, using equivalent optically sensitive materials. **Methods Applied.** The article is devoted to the selection of sample formulations from equivalent materials, taking into account similarity coefficients for a model assessment of the stress and strain state of various types of leather at the penetration of a simulator of a double blade tool, namely a disperser. **Result.** The article describes the methodology of the model experiment, assesses strength and force characteristics of the penetration process, and provides visual images of the resulting stresses in equivalent transparent, optically sensitive materials. The obtained results can be useful for researchers and material scientists in the development of nature-like composites, for designers, developing new methods and devices for selective grinding of elastic-viscous-plastic material waste, as well as for waste recyclers.

Keywords: modeling, polarization optical method, similarity coefficients, assessment of stresses and deformations in the material, equivalent optically sensitive materials

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (the regional competition of the Chelyabinsk Region), No. 22-29-20067, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20067/>.

For citation

Sergeev Yu.S., Platov S.I., Sergeev S.V., Guzeev V.I., Puzankov M.S., Shadrin P.A., Kozlov A.V. Application of a Polarization Optical Method for Assessing Deformation and Force Characteristics when Cutting Tool Edges Penetrate Elastoviscoplastic Materials. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 88-100. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-88-100>

Введение

На современном этапе развития перерабатывающей промышленности актуальным становится снижение себестоимости изделий из металлоподобных, вариатропных минеральных и природоподобных (конвергентных) композитов [1-4]. Более низкая себестоимость может быть обеспечена за счет добавления в исходное сырье вторичной стружки, крошки и волокон, полученных при переработке отходов упруговязкопластичных материалов [5-7]. Требуемую геометрию вторичных дисперсных компонентов без изменения структуры и физико-механических свойств обычно получают резанием или дроблением [8, 9]. Причем возможные структурные изменения, связанные с раз-

рушением среды, контролируют посредством микроскопа с большим увеличением, а ухудшение физико-механических показателей продукта обычно фиксируют эмпирически [9-11]. Контроль за соблюдением таких параметров, как внутренние напряжения и деформации в упруговязкопластичных материалах, нагляднее всего производить поляризационно-оптическим методом с использованием эквивалентных оптически чувствительных материалов [12, 13].

Исследования напряженно-деформированного состояния многокомпонентных материалов и изделий из них в настоящее время требует создания новых и более совершенных методов измерений напряжений и деформаций. Одним из таких методов является фотоупругое моделирование поляризационно-оптичес-

ким методом с использованием высокомодульных и низкоимодульных материалов. Преимуществом данного метода является возможность не только численно, но и наглядно определить концентрацию напряжений при деформации исследуемого образца.

В частности, в качестве исследуемой деформируемой среды могут быть обрезки кожи различного происхождения. Ввиду того, что кожевенный материал сам по себе имеет непрозрачную структуру, а значит исследования его напряженно-деформированного состояния не поддается экспериментальному изучению методами фотомеханики, то возникающие напряжения при действии на него режущих лезвий инструмента [8] можно оценить только методом эквивалентных материалов [14-17]. Поэтому, в данном случае допустив соблюдение условий подобия [12, 13], можно произвести замену кожи на другой материал, обладающий оптической светочувствительностью.

Поскольку в основе поляризационно-оптического метода лежит явление двойного лучепреломления, то будем использовать оптически чувствительный материал, который под воздействием напряжений приобретает оптическую анизотропию [12, 13]. То есть при воздействии нагрузки такие прозрачные материалы демонстрируют свойства, как у двулучепреломляющих оптически анизотропных кристаллов, но при снятии механического воздействия эти материалы, в отличие от кристаллов, снова становятся оптически изотропными. Иными словами, явление временного двойного лучепреломления лежит в основе поляризационно-оптического метода исследования напряжений. Поскольку натуральная кожа – это низкоимодульный материал, то в качестве эквивалентного ма-

териала выбрана эпоксидная смола. Некоторые физико-механические свойства эпоксидных и полиэфирных смол [18, 19] для сравнения приведены в табл. 1.

Основная часть

Для того чтобы приготовить эпоксидную смолу с прочностными параметрами, соразмерными физико-механическим параметрам натуральной кожи, нужно воспользоваться теорией подобия. То есть по полученным данным исследуемой модели возможно перейти к натурному материалу и путем пересчета выяснить эквивалентные величины. Для выполнения поставленной задачи – определения напряжений – в соответствии с [13] рассматривают подобие физических явлений. А именно физические явления будут подобны, если они протекают в геометрически подобных системах, причем поля всех одинаковых физических переменных, описывающих явления, соответственно, подобны, а физическое подобие в первую очередь обусловлено геометрическим подобием. Поэтому между двумя физическими явлениями существует линейное взаимно-однозначное соответствие:

$$X_n = k_x \cdot X_m, \quad (1)$$

где X_n – физическая величина для натурального материала («натура»); X_m – физическая величина опытной модели эквивалентного материала («модель»); k_x – коэффициент подобного преобразования.

Это отношение определяет связь между сходственными скалярными, векторными или тензорными величинами. Обычно для «натуры» и ее «модели» имеют место разные типы соответствия.

Таблица 1. Физико-механические свойства смол
Table 1. Physical and mechanical properties of resins

Свойства	Эпоксидные смолы (без пластификатора)	Полиэфирные смолы
Плотность ρ , г/см ³	1,19-1,28	1,1-1,25
Прочность на растяжение σ_p , МПа	30-90	42-70
Прочность на изгиб $\sigma_{изг}$, МПа	60-130	50-100
Прочность на сжатие σ_c , МПа	≥ 130	85-140
Разрушающее напряжение при сдвиге τ , МПа	42-53	38-48
Температура полимеризации T_p , °C	≥ 20	≥ 23
Водопоглощение W , %	0,01-0,1	0,07-0,15
Теплостойкость $K_{теп}$, °C	55-170	80-200
Ударная вязкость K_C , кДж/м ²	5-25	3-12
Температура разложения T_p , °C	340-350	–
Коэффициент линейного расширения α , °C ⁻¹	$(4,5-6,5) \cdot 10^{-5}$	$(5-10) \cdot 10^{-5}$
Модуль упругости E , Па	$(0,28-0,42) \cdot 10^4$	$(0,21-0,46) \cdot 10^4$
Относительное удлинение при разрыве δ_2 , %	2-6	≥ 5
Коэффициент Пуассона ν	0,34	0,34
Усадка ϵ , %	0,5-1	7

В основе физического подобия лежит критерий подобия – безразмерная величина, составленная из размерных физических параметров. На основе проведенного анализа [13] критериев подобия – физико-механических и геометрических параметров – выявлено, что главным условием для выбора эквивалентного материала является равенство коэффициентов Пуассона «модели» и «натуры». На практике точное соблюдение этого условия невозможно, но можно говорить только о приближенном удовлетворении этого условия [13]. Натуральная кожа различных животных обладает достаточно высоким показателем коэффициента Пуассона – $\nu = 0,4-0,5$ и низким значением модуля упругости – $E = 20-100$ МПа. Причем вариативность этих значений зависит от возраста, условий содержания и качества кормления, а также от генетической предрасположенности доноров материалов.

В качестве эквивалентного материала выбрали эпоксидную смолу ЭД-20. Так как она имеет низкий коэффициент Пуассона $\nu = 0,34$, то ее разбавили пластификатором, доведя практически до равенства коэффициентов ν «модели» и «натуры». В качестве пластификатора использовался дибутилфталат (ДБФ) [18]. Он улучшает упругие свойства и уменьшает хрупкие. Соотношение составов принималось в соответствии с рекомендациями [18, 20]:

– Модель №1, сопоставляемая с сыромятной кожей, представляет собой композицию 90 мас.ч. ЭД-20 + 10 мас.ч. ДБФ.

– Модель №2, сопоставляемая со свиной кожей

хромового дубления, представляет собой композицию 80 мас.ч. ЭД-20 + 20 мас.ч. ДБФ.

– Модель №3, сопоставляемая с кожей крупного рогатого скота (КРС) хромового дубления, представляет собой композицию 70 мас.ч. ЭД-20 + 30 мас.ч. ДБФ.

– Модель №4, сопоставляемая с оленьей кожей (замшей), представляет собой композицию 60 мас.ч. ЭД-20 + 40 мас.ч. ДБФ.

Поскольку натуральная кожа – это специфический свободно релаксирующий материал, то важно было выровнять еще один показатель – время релакса при одноосном сжатии образцов «натуры» и «модели». Таким образом получили эквивалентные материалы с очень близкими значениями коэффициентов Пуассона и их релаксационными свойствами для каждого вида кожи. В соответствии с табл. 2 в сравнении представлены физико-механические свойства для «модели» и кожи.

В качестве силового концентратора, играющего роль инструмента [8], использовались имитаторы из алюминия АЛ-2 ГОСТ 1583-93, форма и размеры которого представлены на рис. 1.

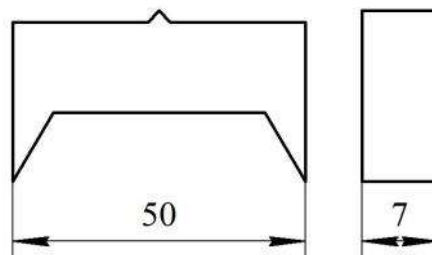
В соответствии с принятой рецептурой для экспериментов были изготовлены образцы в виде брусков «модели» толщиной 12 мм, шириной 10 мм и длиной 130 мм, а в качестве «натуры» использовались лоскуты натуральной кожи размерами примерно 60×60 мм и толщиной 2, 3, 4, 5 мм из сыромятной, свиной, оленьей кожи и кожи крупного рогатого скота.

Таблица 2. Сравнение физико-механических свойств
Table 2. Comparison of physical and mechanical properties

Физико-механические свойства	Сыромятная кожа	Модель №1	Свиная кожа	Модель №2	Кожа КРС	Модель №3	Оленья кожа (замша)	Модель №4
Модуль упругости E , МПа	32	620	66	1380	50	980	27	500
Прочность на растяжение σ_p , МПа	60	171,4	25	312,5	35	318,2	15	375
Коэффициент Пуассона ν	0,46	0,45	0,42	0,43	0,45	0,44	0,45	0,44



а



б

Рис. 1. Инструмент для размерного измельчения упруговязкопластичных материалов:

а – фото инструмента; б – пример имитатора режущей части инструмента

Fig. 1. A tool for dimensional grinding of elastic-viscous-plastic materials: a is a photo of the tool; b is an example of a tool cutting part simulator

Экспериментальная оценка показателей релаксационных свойств осуществлялась при одноосном сжатии образцов в соответствии с рис. 2 на универсальной разрывной машине модели Р-500. Ширина лунки измерялась посредством отсчетного микроскопа модели МПБ-2, а время релаксации – электронным секундомером. Затем сравнивали полученные графики зависимости времени релаксации от силы сжатия образцов «натуры» и «модели».

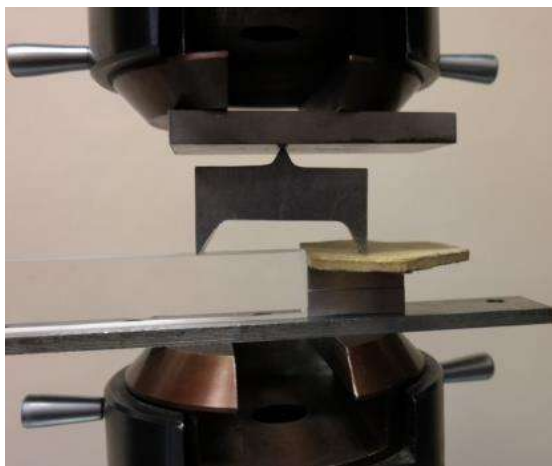


Рис. 2. Процесс проникания силового концентратора в кожу и «модель» из эквивалентного материала

Fig. 2. The process of penetration of the force concentrator into leather and the “model” from an equivalent material

Расхождение показателей релаксационных свойств материалов составило не более 3%.

Затем в ходе эксперимента, используя силовые концентраторы напряжений (имитаторы режущей части инструмента), нагружали образцы «натуры» и «модели» с увеличением одноосной нагрузки и измерением глубины их проникания в материалы в соответствии со схемой рис. 3, реализованной непосредственно на полярископе (рис. 4).

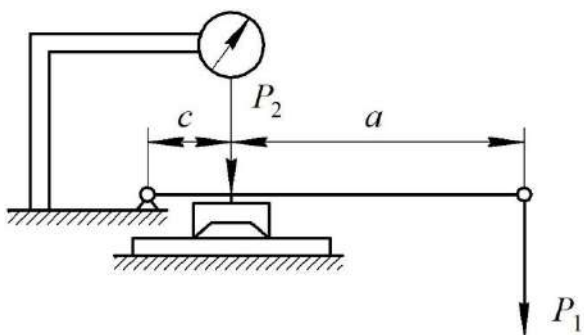


Рис. 3. Схема нагружения «модели»
Fig. 3. Loading diagram of the “model”



Рис. 4. Полярископ: 1 – источник света; 2 – поляроиды; 3 – винтовой домкрат; 4 – нагрузочное устройство рычажного типа; 5 – индикатор часового типа; 6 – устройство для относительного поворота поляроидов; 7 – электровыключатель; 8 – корпус

Fig. 4. Polariscopes: 1 is a light source; 2 is polaroids; 3 is a screw jack; 4 is a lever-type loading device; 5 is a clock-type indicator; 6 is a device for a relative rotation of polaroids; 7 is an electric switch; 8 is a case

Результаты замеров глубины внедрения силового концентратора в зависимости от прикладываемой силы представлены в табл. 3.

Таблица 3. Значения глубины внедрения силового концентратора

Table 3. Force concentrator penetration depths

Сила P , Н	Глубина внедрения q , мм			
	Сыромятная кожа	Свиная кожа	Кожа КРС	Оленья кожа
0,8	0,062	0,048	0,048	0,070
1,6	0,107	0,071	0,071	0,105
2,2	0,130	0,091	0,092	0,134
2,8	0,149	0,098	0,114	0,170
4,4	0,193	0,138	0,150	0,251

По полученным результатам замеров были построены графики зависимости глубины q внедрения лезвий от силы P одноосного нагружения. Пример изображен на рис. 5.

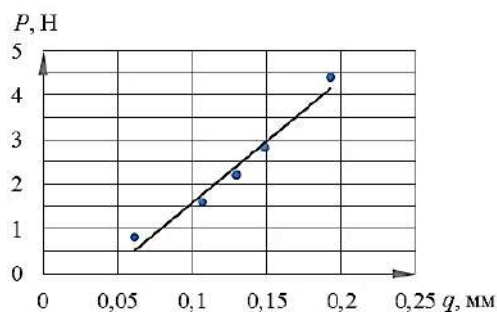


Рис. 5. График зависимости глубины q внедрения лезвий от силы P одноосного нагружения (пример)

Fig. 5. Graph of a dependence relation between blade penetration depth q and force P of uniaxial loading (for reference)

Для определения напряжений в материале воспользуемся изготовленными «моделями». Для начала необходимо определить, с какой силой нужно оказывать давление на «модель», то есть определить эквивалент силы. С этой целью воспользуемся формулами подобия [13] модуля упругости:

$$K_E = \frac{K_p}{K_l \cdot K_\delta}, \quad (2)$$

и силы нагружения

$$K_p = K_l \cdot K_\delta \cdot K_E,$$

где K_l – коэффициент подобия длин, $K_l = l_n/l_m$; K_δ – коэффициент подобия толщин, $K_\delta = \delta_n/\delta_m$; K_E – коэффициент подобия модуля упругости, $K_E = E_n/E_m$ (н – «натура»; м – «модель»).

Полученные значения представлены в **табл. 4**.

После этого нагружение «моделей» производили на специальной установке – полярископе (см. **рис. 4**), позволяющей производить замеры и одновременно наблюдать изменения спектров изохром в направлениях главных напряжений. При этом в соответствии с **рис. 3** для всех видов кожи определяли соотношения сил:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{a+c}{c}, \quad (3)$$

где P_1 – масса груза на рычаге, Н; P_2 – эквивалентная сила, прикладываемая к инструменту, Н; a и c – длины плеч рычага, мм ($a = 518$ мм, $c = 72$ мм).

Затем эквивалентную силу рассчитывали через коэффициент подобия

$$P_2 = K_p \cdot P_1 \quad (4)$$

и заносили в **табл. 5-8**.

Таблица 4. Коэффициенты подобия

Table 4. Similarity coefficients

Вид кожи	Коэффициент подобия длин K_l	Коэффициент подобия толщин K_δ	Коэффициент подобия модуля упругости K_E	Коэффициент подобия силы K_p
Сыромятная кожа	0,46	0,16	0,052	$3,83 \cdot 10^{-3}$
Свиная кожа			0,048	$3,53 \cdot 10^{-3}$
Кожа КРС			0,051	$3,75 \cdot 10^{-3}$
Оленья кожи			0,054	$3,97 \cdot 10^{-3}$

Таблица 5. Расчетная эквивалентная сила для сыромятной кожи

Table 5. Calculated equivalent force for rawhide leather

Вес на рычаге P_1 , Н	Сила на инструменте P_2 , Н
26	209
51	418
70	574
89	731
140	1149

Таблица 6. Расчетная эквивалентная сила для свиной кожи

Table 6. Calculated equivalent force for pigskin leather

Вес на рычаге P_1 , Н	Сила на инструменте P_2 , Н
28	227
55	453
76	623
97	793
152	1246

Таблица 7. Расчетная эквивалентная сила для кожи крупного рогатого скота

Table 7. Calculated equivalent force for cattlehide leather

Вес на рычаге P_1 , Н	Сила на инструменте P_2 , Н
31	213
61	427
84	587
107	747
168	1173

Таблица 8. Расчетная эквивалентная сила для оленьей кожи
 Table 8. Calculated equivalent force for deerskin leather

Вес на рычаге P_1 , Н	Сила на инструменте P_2 , Н
26	202
52	403
152	554
193	705
303	1108

Далее делаем расчет напряжения смятия, МПа [13]:

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} = \frac{\sigma_0 \cdot n}{t}, \quad (5)$$

где P – сила, прикладываемая к имитатору (инструменту), Н; A – площадь смятия, вызываемая силовым концентратором напряжения, мм²,

$$A = s \cdot f, \quad (6)$$

где s – толщина лезвия силового концентратора, мм; f – длина контакта силового концентратора с нагружаемой «моделью», мм; σ_0 – оптическая постоянная материала, своя для каждого материала и для каждого цвета (показывает изменения разности напряжений в образце при изменении порядка полосы на единицу), Н/мм; t – толщина исследуемого бруска, мм; n – порядок изохромы.

Цвет точки на экране определяется разностью главных напряжений. Полосы, составленные точками одного цвета, называются изохромами. Причем при исследовании оптически активного материала в плоскополяризованном свете, который создается поляризатором, световой вектор в каждой точке нагруженной модели разлагается на две составляющие, направления которых совпадают с направлением главных напряжений. В соответствии с основным законом фотоупругости при разности главных напряжений точка на экране окрашивается определенным цветом ($n = 1$). При увеличении нагрузки в два раза увеличивается в два раза и разность главных напряжений, и точка вновь окрашивается тем же цветом ($n = 2$) и т.д. Таким образом, получается, что цвет точки прямо пропорционален разности напряжений. Происходит это следующим образом: в момент нагружения оптически активного материала зарождаются и проходят через точку новые и новые изохромы того же цвета. Чем «моложе» изохромы, тем они будут большего порядка.

Порядок изохром считается по интерференционной картине для любого выбранного цвета. При этом «модель» нагружают таким образом, чтобы на экране можно было одновременно наблюдать все цвета, тогда, увеличивая усилие в два, три и более раз, порядок будет возрастать для полосы каждого цвета. Согласно закону фотоупругости, наиболее удобным выбираем

тот цвет, который лучше воспринимается наблюдателем. В нашем случае выбираем красный цвет.

Из уравнения (5) получим равенство, из которого определим оптическую постоянную материала для красного цвета:

$$\sigma_0 = \frac{P \cdot t}{n \cdot A} = \frac{P \cdot t}{n \cdot s \cdot f}. \quad (7)$$

Через силовой концентратор с постепенным увеличением веса на рычаге и фиксацией полученных результатов передается усилие на «модели». Результаты изображений, наблюдаемые в полярископ при постепенном нагружении «модели», эквивалентной сыромятной коже, силовым концентратором, приведены в соответствии с рис. 6-10.

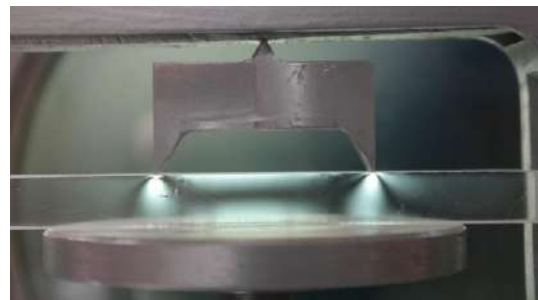


Рис. 6. Наблюдаемое изображение при нагрузке $P_2 = 209$ Н

Fig. 6. Observed image at load $P_2 = 209$ N

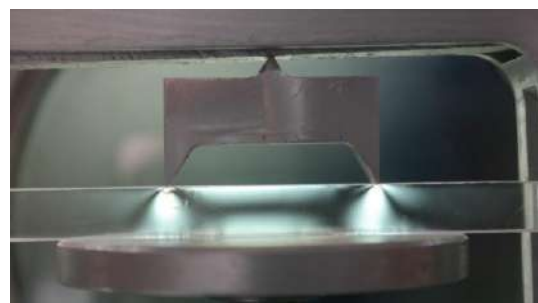


Рис. 7. Наблюдаемое изображение при нагрузке $P_2 = 418$ Н

Fig. 7. Observed image at load $P_2 = 418$ N



Рис. 8. Наблюдаемое изображение при нагрузке $P_2 = 574$ Н

Fig. 8. Observed image at load $P_2 = 574$ N

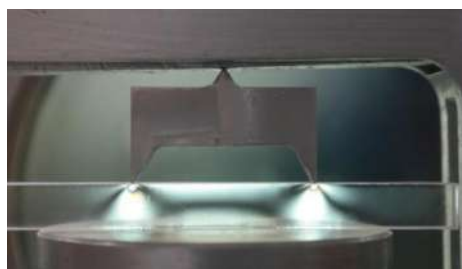


Рис. 9. Наблюдаемое изображение при нагрузке $P_2 = 731$ Н

Fig. 9. Observed image at load $P_2 = 731$ N

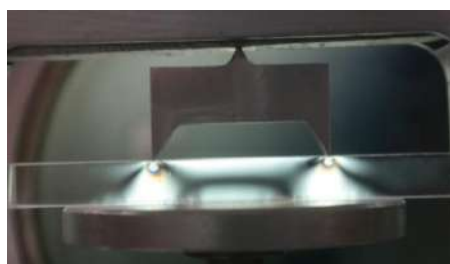


Рис. 10. Наблюдаемое изображение при нагрузке $P_2 = 1149$ Н

Fig. 10. Observed image at load $P_2 = 1149$ N

Определим отношение $P/n = \Delta P = \text{tg}\alpha$. Причем силу P необходимо принимать в два раза меньше P_2 , так как усилие распределяется между двумя зубьями, то есть $P = P_2/2$.

В табл. 9 показан пример зависимости порядка изохром от прикладываемой силы и глубины внедрения силового концентратора.

Таблица 9. Зависимость порядка изохром от прикладываемой силы, глубина внедрения силового концентратора (для сыромятной кожи)

Table 9. Dependence relation between the order of isochromes and applied force, force concentrator penetration depth (for rawhide leather)

P , Н	n , шт.	Глубина внедрения силового концентратора q , мм
104,5	0	0,045
209	1	0,070
287	1	0,085
365,5	2	0,100
574,5	3	0,130

Далее получим график зависимости порядка изохром от прикладываемой силы к инструменту (рис. 11).

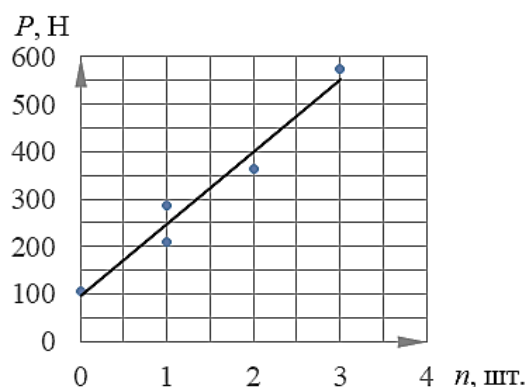


Рис. 11. Зависимость порядка изохром от прикладываемой силы

Fig. 11. Dependence relation between the order of isochromes and applied force

А вычислив тангенс угла наклона прямой

$$\text{tg}\alpha = (560 - 90)/3 = 156,7,$$

получим оптическую постоянную

$$\sigma_0 = \frac{\Delta P \cdot t}{s \cdot f} = \frac{156,7 \cdot 10}{1 \cdot 7,1} = 220,7 \text{ Н/мм.}$$

Затем получим максимальное напряжение в образце:

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_0 \cdot n_{\max}}{t} = \frac{220,7 \cdot 3}{10} = 66 \text{ МПа.}$$

Аналогично проведены эксперименты с эквивалентными «моделями» для остальных видов кожи, при этом определяли напряжения и глубину внедрения силового концентратора.

Таким образом, в соответствии с табл. 10-13 представлены полученные значения напряжений.

Погрешность полученных значений глубины внедрения силового концентратора для «натуры» и «модели» не превышает 7%, что свидетельствует о правильности подбора и изготовления состава эквивалентного материала.

При этом, сравнивая графики на рис. 12 и 13, например, для оленьей кожи с ее эквивалентным материалом по уравнению прямой нетрудно заметить, что угол наклона прямой отличается, но несущественно, поскольку $\text{arctg}(4777,1) = 89,98^\circ \approx \text{arctg}(20,456) = 87,20^\circ$, а полученные отклонения объясняются невозможностью создания материала с точным соотношением коэффициентов Пуассона. Для остальных случаев графики не представлены, так как наблюдается то же самое.

Таким образом, используя эквивалентный материал и нагружая его определенной силой, удалось определить напряжения в кожевенных материалах.

Таблица 10. Изменение напряжений при различных высотах «модели» и толщинах инструмента (для сыромятной кожи)

Table 10. Variation in stresses at different “model” heights and tool thicknesses (for rawhide leather)

Материал	Эквивалентная модель			Натурный материал		
	P_m , Н	σ_m , МПа	Глубина внедрения, мм	P_n , Н	σ_n , МПа	Глубина внедрения, мм
Сыромятная кожа	209	66	0,065	0,8	3,4	0,062
	418		0,105	1,2		0,107
	574		0,125	2,2		0,130
	731		0,150	2,8		0,149
	1149		0,195	4,4		0,193

Таблица 11. Изменение напряжений при различных высотах «модели» и толщинах инструмента (для свиной кожи)

Table 11. Variation in stresses at different “model” heights and tool thicknesses (for pigskin leather)

Материал	Эквивалентная модель			Натурный материал		
	P_m , Н	σ_m , МПа	Глубина внедрения, мм	P_n , Н	σ_n , МПа	Глубина внедрения, мм
Свиная кожа	227	56	0,045	0,8	2,7	0,048
	453		0,070	1,2		0,071
	623		0,085	2,2		0,091
	793		0,100	2,8		0,098
	1246		0,130	4,4		0,138

Таблица 12. Изменение напряжений при различных высотах «модели» и толщинах инструмента (для кожи КРС)

Table 12. Variation in stresses at different “model” heights and tool thicknesses (for cattlehide leather)

Материал	Эквивалентная модель			Натурный материал		
	P_m , Н	σ_m , МПа	Глубина внедрения, мм	P_n , Н	σ_n , МПа	Глубина внедрения, мм
Кожа КРС	104,5	64,8	0,050	0,8	3,31	0,048
	209		0,075	1,2		0,071
	287		0,090	2,2		0,092
	365,5		0,110	2,8		0,114
	574,5		0,145	4,4		0,150

Таблица 13. Изменение напряжений при различных высотах «модели» и толщинах инструмента (для оленьей кожи)

Table 13. Variation in stresses at different “model” heights and tool thicknesses (for deerskin leather)

Материал	Эквивалентная модель			Натурный материал		
	P_m , Н	σ_m , МПа	Глубина внедрения, мм	P_n , Н	σ_n , МПа	Глубина внедрения, мм
Оленья кожа	202	66,3	0,075	0,8	3,6	0,070
	403		0,110	1,2		0,105
	551		0,130	2,2		0,134
	705		0,175	2,8		0,170
	1108		0,260	4,4		0,251

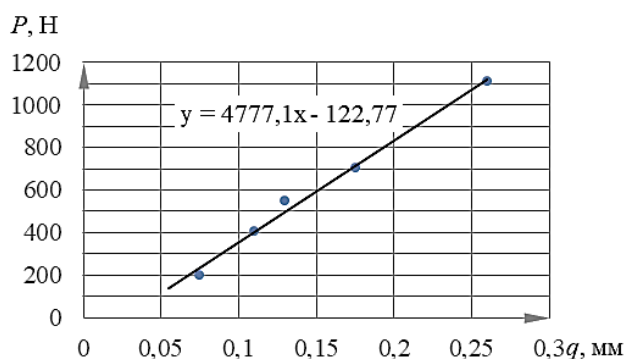


Рис. 12. График зависимости глубины врезания от прикладываемой эквивалентной силы к модели

Fig. 12. Graph of a dependence relation between penetration depth and applied equivalent force to the model

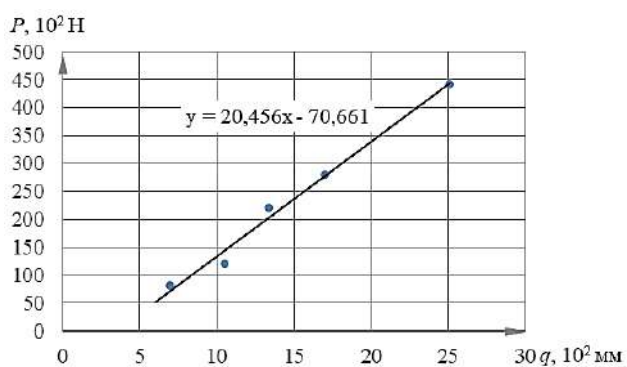


Рис. 13. График зависимости глубины врезания от прикладываемой силы к модели

Fig. 13. Graph of a dependence relation between penetration depth and applied force to the model

Заключение

Усовершенствованная методика экспериментальной оценки силовых характеристик процесса деформирования упруговязкопластичной среды двухлезвийным инструментом на основе поляризованно-оптического метода позволила с помощью экспериментальной «модели» вычислить эквивалентные напряжения в натуральной коже, которые могут быть использованы в дальнейшем при компьютерном моделировании процессов диспергирования кожевенных отходов [8].

Эксперименты с использованием различной геометрии силового концентратора и нагружаемой «модели» показали, как изменяется величина напряжения в образце. Основным параметр, влияющий на величину напряжений – площадь смятия, вызван самим силовым концентратором и расстоянием между его зубьями. Использование имитаторов с различной высотой показали, что этот геометрический параметр на величину напряжения не влияет.

Список источников

1. Ковальчук М.В. Конвергенция наук и технологий – прорыв в будущее // Российские нанотехнологии. 2011 Т. 6. №1-2. С. 13-23.
2. Овчинников А.А., Обручев Д.В., Данилов И.Н. Оптимизация составов композиционных материалов на основе технологии полиструктурной интеграции гетерогенных материалов // Умные композиты в строительстве. 2022. Т. 3. Вып. 1. С. 30-46. DOI: 10.52957/27821919_2022_1_30
3. Левыкин С.В., Казачков Г.В., Яковлев И.Г. Конвергентные природоподобные технологии для устойчивого развития степных регионов России // Вопросы степеведения. 2018. №14. С. 72-75. DOI:10.24411/9999-006A-2018-00007
4. Баксанский О.Е., Скоробогатова А.В. Конвергенция и природоподобные технологии: методология современной науки и образования // Коллекция гуманитарных исследований. 2018. №5(14). С. 14-21.
5. Косенко Е.А., Баурова Н.И., Зорин В.А. Природоподобные материалы и конструкции в машиностроении: монография. М.: МАДИ, 2020. 304 с.
6. Проект указа Президента Российской Федерации «О стратегии развития природоподобных (конвергентных) технологий». URL: <http://regulation.gov.ru/p/128578> (дата обращения: 16.11.2023)
7. Anas S.M. & Shariq Mohd & Alam, Mehtab & Umair, Mohammad. Modeling of crashworthy foam mounted braced unreinforced brick masonry wall and prediction of anti-blast performance // International Journal of Protective Structures. 2023, vol. 15, no. 2, pp. 241-283. DOI: 10.1177/20414196231164432
8. Пат. 2802786 Российская Федерация, МПК В02С 13/28, С14В 13/00. Способ измельчения коллагенсодержащих сред и инструмент для его осуществления / Ю.С. Сергеев, С.В. Сергеев, А.А. Огурцова, М.С. Пузанков; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». № 2022130105; заявл. 21.11.2022; опубл. 01.09.2023.
9. Доможиров Д.В. К вопросу повышения эффективности добычи и переработки минерального сырья за счет управления параметрами буровзрывных работ для достижения требований к качеству // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 5-14. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-5-14
10. Leshkov E.V., Sapozhnikov S.B. Modeling the Non-linear Deformation and Damage of Carbon-Aramid Fabric Composites in Tension // Mechanics of Composite Materials. 2020, no. 56, pp. 591-600. DOI: 10.1007/s11029-020-09906-1
11. Экспериментальное исследование влияния фелтинга на расслоение и остаточную прочность ПКМ при низкоскоростном ударе / Г.А. Форенталь, А.В. Безмельницын, А.В. Игнатова [и др.] // XXXIII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения

- (МИКМУС – 2021): тр. конф. М.: ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН», 2021. С. 194-199.
12. Полоник М.В., Макарова Н.В., Манцыбора А.А. Численное моделирование абразивного износа цементных зернистых композитов с использованием экспериментальных данных // Вестник ИШ ДВФУ. 2019. №4 (41). С. 3-11. DOI: 10.24866/2227-6858/2019-4-1
 13. Славин О.К., Трумбачев В.Ф., Тарабасов Н.Д. Методы фотомеханики в машиностроении. М.: Машиностроение, 1983. 269 с.
 14. Котенко М.В., Раздорский В.В., Лелявин А.Б. Поляризационно-оптический метод в исследовании напряженно-деформированного состояния моделей с дентальными имплантатами из нитинола // Байкальский медицинский журнал. 2016. Т. 147. №8. С. 34-38.
 15. Исследование механических характеристик и морфологии поверхности разрушения сплава АК5М2, поверхностно модифицированного титаном / Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В., Шлярова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Устинов А.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 32-44. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-32-44
 16. Антипова Т.Н., Олешко А.Ю. Методические основы управления качеством продукции из волоконистых металлокомпозитов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 55-62. DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-55-62
 17. Сравнительный анализ физико-механических свойств биоразлагаемых и синтетических полимеров / Ершова О.В., Медяник Н.Л., Мишурина О.А., Бессонова Ю.А., Багреева К.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №4. С. 56-63. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-56-63
 18. Мостовой А.С. Разработка составов, технологии и определение свойств микро- и нанонаполненных эпоксидных композитов функционального назначения: дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2014. 153 с.
 19. Справочник по материалам, применяемым в производстве обуви и кожгалантереи / Зурабян К.М., Краснов Б.Я., Пустыльник Б.Я., Бернштейн М.М. М.: Shoe-Ikons, 2004. 103 с.
 20. Исследование влияния пластификаторов и термопластов на механические свойства эпоксидной смолы и углепластика (Обзор) / Мустафа Л.М., Исмаилов М.Б., Ермаханова А.М., Санин А.Ф. // Комплексное использование минерального сырья. 2019. №4. С. 48-56. DOI: 10.31643/2019/6445.37
 2. Ovchinnikov A.A., Obruchev D.V., Danilov I.N. Optimization of compositions of composite materials based on the technology of a polystructural integration of heterogeneous materials. *Umnye kompozity v stroitelstve* [Smart Composites in Construction]. 2022;3(1):30-46. (In Russ.) DOI: 10.52957/27821919_2022_1_30
 3. Levykin S.V., Kazachkov G.V., Yakovlev I.G. Convergent nature-like technologies for sustainable development of steppe regions of Russia. *Voprosy steppevedeniya* [Steppe Science]. 2018;(14):72-75. (In Russ.) DOI:10.24411/9999-006A-2018-00007
 4. Baksansky O.E., Skorobogatova A.V. Convergence and nature-like technologies: methodology of modern science and education. *Kollektsiya gumanitarnykh issledovaniy* [The Collection of Humanitarian Studies]. 2018;(5(14)):14-21. (In Russ.)
 5. Kosenko E.A., Baurova N.I., Zorin V.A. *Prirodopodobnye materialy i konstruksii v mashinostroyenii: monografiya* [Nature-like materials and structures in mechanical engineering: monograph]. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 2020, 304 p. (In Russ.)
 6. Draft Decree of the President of the Russian Federation “On the Strategy for the Development of Nature-Like (Convergent) Technologies”. Available at: <http://regulation.gov.ru/p/128578> (Accessed on November 16, 2023).
 7. Anas S.M., Shariq Mohd, Alam Mehtab, Umair Mohammad. Modeling of crashworthy foam mounted braced unreinforced brick masonry wall and prediction of anti-blast performance. *International Journal of Protective Structures*. 2023;15(2):241-283. DOI: 10.1177/20414196231164432
 8. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V., Ogurtsova A.A., Puzankov M.S. *Sposob izmelcheniya kollagenosoderzhashchikh sred i instrument dlya ego osushchestvleniya* [A method for grinding collagen-containing media and a tool for its implementation]. Patent RU, no. 2802786, 2023.
 9. Domozhirev D.V. On the issue of increasing efficiency of mining and processing of mineral raw materials by controlling the parameters of drilling and blasting operations to achieve quality requirements. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(1):5-14. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-5-14
 10. Leshkov E.V., Sapozhnikov S.B. Modeling the non-linear deformation and damage of carbon-aramid fabric composites in tension. *Mechanics of Composite Materials*. 2020;(56):591-600. DOI: 10.1007/s11029-020-09906-1
 11. Forental G.A., Bezmelnitsyn A.V., Ignatova A.V. et al. Experimental study on the influence of felting on delamination and residual strength of polymer composites under low speed impact. *XXXIII Mezhdunarodnaya innovatsionnaya konferentsiya molodykh*

References

1. Kovalchuk M.V. Convergence of sciences and technologies – a breakthrough into the future. *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian Nanotechnologies]. 2011; 6(1-2):13-23. (In Russ.)

- uchenykh i studentov po problemam mashinovedeniya (MIKMUS - 2021): Trudy konferentsii* [The 33rd International Innovative Conference of Young Scientists and Students on Problems of Mechanical Engineering (MIKMUS – 2021): Proceedings of the conference]. Moscow: Federal State Budgetary Institution of Science Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 2021, pp. 194-199. (In Russ.)
12. Polonik M.V., Makarova N.V., Mantsybora A.A. Numerical modeling of abrasive wear of cement granular composites using experimental data. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dalnevostochnogo federalnogo universiteta* [Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin]. 2019;(4(41)):3-11. (In Russ.) DOI: 10.24866/2227-6858/2019-4-1
 13. Slavin O.K., Trumbachev V.F., Tarbasov N.D. *Metody fotomekhaniki v mashinostroenii* [Methods of photomechanics in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1983, 269 p. (In Russ.)
 14. Kotenko M.V., Razzorsky V.V., Lelyavin A.B. A polarization optical method in the study on the stress and strain state of models with dental implants made of nitinol. *Baykalskiy meditsinskiy zhurnal* [Baikal Medical Journal]. 2016;147(8):34-38. (In Russ.)
 15. Serebryakova A.A., Zagulyaev D.V., Shlyarov V.V., Shlyarova Yu.A., Ivanov Yu.F., Ustinov A.M. Study on mechanical characteristics and fracture surface morphology of the Ti surface-modified AK5M2 alloy. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(1):32-44. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-32-44
 16. Antipova T.N., Oleshko A.Yu. Basic procedures of product quality control for fiber metal composites. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020;18(1):55-62. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-55-62.
 17. Ershova O.V., Medyanik N.L., Mishurina O.A., Besonova Yu.A., Bagreeva K.V. Comparative analysis of physical and mechanical properties of biodegradable and synthetic polymers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(4):56-63. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-4-56-63
 18. Mostovoy A.S. *Razrabotka sostavov, tekhnologii i opredelenie svoystv mikro- i nanonapolnennykh epoksidnykh kompozitov funktsionalnogo naznacheniya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of compositions, technologies and determination of micro- and nano-filled epoxy composites for functional purposes: PhD thesis]. Saratov, 2014, 153 p. (In Russ.)
 19. Zurabyan K.M., Krasnov B.Ya., Pustyl'nik B.Ya., Bernshtein M.M. *Spravochnik po materialam, primenyaemym v proizvodstve obuvi i kozhgalanterei* [Handbook of materials used in the production of footwear and leather goods]. Moscow: Shoe-Ikons, 2004, 103 p. (In Russ.)
 20. Mustafa L.M., Ismailov M.B., Ermakhanova A.M., Sanin A.F. Study on the influence of plasticizers and thermoplastics on mechanical properties of epoxy resin and carbon fiber reinforced plastic (Review). *Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syr'ya* [Integrated Use of Mineral Raw Materials]. 2019;(4):48-56. (In Russ.) DOI: 10.31643/2019/6445.37

Поступила 21.11.2023; принята к публикации 12.02.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 21/11/2023; revised 12/02/2024; published 27/06/2024

Сергеев Юрий Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

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

Гузеев Виктор Иванович – доктор технических наук, заведующий кафедрой,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: guzeevvi@susu.ru. ORCID 0000-0002-8277-1217

Сергеев Сергей Васильевич – кандидат технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

Пузанков Максим Сергеевич – магистрант,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: mr.maks.134@gmail.com. ORCID 0009-0002-1886-0976

Шадрин Павел Александрович – студент,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: i.pavel-shadrin@mail.ru.

Козлов Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: kozlovav@susu.ru.

Yury S. Sergeev – PhD (Eng.), Head of the Department,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Head of the Department,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mitodim@magtu.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Viktor I. Guzeev – DrSc (Eng.), Head of the Department,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: guzeevvi@susu.ru. ORCID 0000-0002-8277-1217

Sergey V. Sergeev – PhD (Eng.), Professor,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

Maksim S. Puzankov – master's student,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: mr.maks.134@gmail.com. ORCID 0009-0002-1886-0976

Pavel A. Shadrin – student,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: i.pavel-shadrin@mail.ru.

Aleksandr V. Kozlov – DrSc (Eng.), Professor,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: kozlovav@susu.ru.



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.787.4
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-101-110

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕВЕРСИВНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Нгуен Хыу Хай, Зайдес С.А.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. **Актуальность работы.** Разработка новых способов упрочнения, к которым относится, в частности, реверсивное выглаживание, требует научно обоснованного определения режимов обработки, обеспечивающих получение определенных характеристик качества поверхностного слоя. Результаты экспериментальных исследований показали, что закономерность изменения показателей качества поверхностного слоя деталей машин в зависимости от технологических параметров и режимов реверсивного выглаживания обладает неоднозначным характером. В этой связи особый интерес представляет задача по определению рациональных режимов поверхностного пластического деформирования при реверсивном выглаживании. **Цель работы.** Определение рациональных режимов поверхностного пластического деформирования при реверсивном выглаживании, которые бы позволили получить режимы обработки, обеспечивающие получение минимально возможных значений микрогеометрических характеристик поверхности и максимально возможных значений механических свойств упрочненного слоя. **Используемые методы.** В работе использованы экспериментальные методы определения показателей качества упрочненного слоя цилиндрических деталей и множественный регрессионный анализ для обработки полученных результатов. **Новизна.** Для определения рациональных режимов обработки получены эмпирические зависимости отдельных показателей качества от технологических параметров процесса реверсивного выглаживания. Результаты множественного регрессионного анализа обработаны в компьютерной программе *Microsoft Visual Studio 2012*. **Результат.** Установлено, что рациональные режимы реверсивного выглаживания обеспечивают наименьшие микрогеометрические параметры поверхности, высокие механические свойства и большие сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое цилиндрических деталей машин. **Практическая значимость.** Для получения наименьших микрогеометрических показателей поверхности упрочненных деталей (шероховатость, волнистость и отклонение от круглости) установлены следующие режимы упрочнения: $S_{пр} = 0,07-0,10$ мм/об; $n_p = 60-100$ об/мин; $t = 0,08-0,10$ мм; $n_p = 115-120$ дв. ход/мин; $\alpha_n = 90^\circ$ и $\alpha_p = \pm 10 \pm 20^\circ$. Для повышения сжимающих остаточных напряжений и механических свойств поверхностного слоя деталей рекомендуются следующие режимы упрочнения: $S_{пр} = 0,07-0,10$ мм/об; $n_p = 280-300$ об/мин; $t = 0,28-0,30$ мм; $n_p = 290-300$ дв. ход/мин; $\alpha_n = 90^\circ$ и $\alpha_p = \pm 55 \pm 60^\circ$.

Ключевые слова: реверсивное выглаживание, микротвердость, шероховатость, сжимающие остаточные напряжения, рациональные режимы обработки

© Нгуен Хыу Хай, Зайдес С.А., 2024

Для цитирования

Нгуен Хыу Хай, Зайдес С.А. Определение рациональных режимов реверсивного выглаживания цилиндрических деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 101-110. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-101-110>



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

DETERMINATION OF RATIONAL REVERSE BURNISHING MODES FOR CYLINDRICAL MACHINE PARTS

Nguyen Huu Hai, Zaides S.A.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Relevance. The development of new methods of hardening, which include, in particular, reverse burnishing, requires a scientifically based determination of processing modes that ensure the achievement of certain quality characteristics of the surface layer. The experimental studies showed that the pattern of changes in the quality indicators of the surface layer of machine parts, depending on the technological parameters and reverse burnishing modes, was ambiguous. In this regard, the task of determining rational SPD modes during reverse burnishing is of particular interest. **Objectives.** Determination of rational SPD modes during reverse burnishing, which would contribute to obtaining processing modes that ensure obtaining the minimum possible values of the microgeometric characteristics of the surface and the maximum possible values of the mechanical properties of the hardened layer. **Methods Applied.** The study applied experimental methods for determining the quality indicators of the hardened layer of cylindrical parts and multiple regression analysis to process the results obtained. **Originality.** To determine rational processing modes, the authors determined empirical patterns of individual quality indicators and the technological parameters of the reverse burnishing process. The results of multiple regression analysis were processed in the computer program Microsoft Visual Studio 2012. **Result.** It has been established that rational reverse burnishing modes provide for the lowest microgeometric surface parameters, high mechanical properties and large compressive residual stresses in the surface layer of cylindrical machine parts. **Practical Relevance.** To obtain the lowest microgeometric parameters of the surface of hardened parts (roughness, waviness and out-of-roundness), the following hardening modes are established: $S_{pr} = 0.07 \div 0.10$ mm/rev; $n_p = 60 \div 100$ rpm; $t = 0.08 \div 0.10$ mm; $n_p = 115 \div 120$ stroke/min; $\alpha_{\text{н}} = 90^\circ$ and $\alpha_p = \pm 10^\circ \div \pm 20^\circ$. To increase compressive residual stresses and mechanical properties of the surface layer of parts, it is recommended to apply the following hardening modes: $S_{pr} = 0.07 \div 0.10$ mm/rev; $n_p = 280 \div 300$ rpm; $t = 0.28 \div 0.30$ mm; $n_p = 290 \div 300$ stroke/min; $\alpha_{\text{н}} = 90^\circ$ and $\alpha_p = \pm 55^\circ \div \pm 60^\circ$.

Keywords: reverse burnishing, microhardness, roughness, compressive residual stresses, rational processing modes

For citation

Nguyen Huu Hai, Zaides S.A. Determination of Rational Reverse Burnishing Modes for Cylindrical Machine Parts. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 101-110. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-101-110>

Введение

Надежность работы изделий машиностроения во многом зависит от качества изготовления отдельных деталей и элементов конструкций. При этом под качеством деталей понимают не только соответствие размеров и точности формы указанным на чертежах, но и состояние поверхностного слоя [1-3]. Обычно на чертежах чаще всего указывают параметры шероховатости поверхности и реже – характеристики твердости. Поверхностный слой деталей машин существенно отличается от основной массы металла не только физико-механическими характеристиками, микроструктурой, но и активностью атомов металла, которые взаимодействует с внешней средой [4-6].

Поверхностный слой в отличие от основной массы изделия в первую очередь испытывает внешнее воздействие – силовое, температурное, агрессивное и др. [6]. Именно поверхностные слои подвергаются коррозии, износу, повреждениям, в этих слоях в первую очередь формируются очаги напряженности, локализуются микродефекты, которые преобразуются в начальные микротрещины [7, 8].

В этой связи и особенно для ответственных деталей и деталей, работающих в сложных условиях экс-

плуатации, ведутся постоянные работы по защите поверхностного слоя от внешнего воздействия. К защитным технологиям можно отнести покраску, полимерные покрытия, металлизацию, термическую и химико-термическую обработку и ряд других [9, 10]. Однако многие известные технологии требуют существенных материальных затрат, дорогое технологическое оборудование, дополнительные производственные помещения. К менее затратным технологическим процессам относятся отделочно-упрочняющие технологии на основе поверхностного пластического деформирования [11-14]. Такие технологии основаны на пластическом деформировании тонкого поверхностного слоя деталей машин. Деформирующая упрочняющая обработка позволяет не только сгладить микронеровности поверхности и упрочнить поверхностный слой, но и сформировать в нем сжимающие остаточные напряжения и изменить зеренную структуру материала [15, 16].

В настоящее время известно достаточно большое количество способов поверхностного пластического деформирования (ППД) с использованием разнообразных по конструкции рабочих инструментов [17, 18]. Однако многие из них основаны на достаточно простой кинематике процесса – вращение заготовки и

осевое перемещение деформирующего инструмента. Такая кинематика обеспечивает достаточно эффективное сглаживание микронеровностей, но степень упрочнения при этом не высокая.

При упрочнении ППД нежестких деталей типа валов и осей сложно получить высокую степень упрочнения при сохранении прямолинейности деталей. В этом случае требуется усилить напряженное состояние в очаге деформации без повышения радиального воздействия от рабочего инструмента.

Авторами статьи разработан новый способ ППД, основанный на реверсивном выглаживании поверхности тороидальным роликом [19]. Были выполнены численные расчеты на основе конечно-элементного моделирования и проведены экспериментальные исследования по определению влияния параметров и режимов деформирования на напряженное состояние и качество поверхностного слоя деталей машин [20, 21].

Исследования показали, что параметры реверсивного выглаживания неоднозначно влияют на качество поверхности. Такие результаты будут полезны, если необходимо получить только один из параметров качества, например шероховатость или твердость. А если необходимо получить при упрочнении поверхностный слой с максимально возможной твердостью и при этом с минимальной шероховатостью поверхности, то вопрос остается открытым.

Поэтому целью данной работы является определение рациональных режимов ППД при реверсивном выглаживании, обеспечивающих получение минимально возможных значений микрогеометрических

характеристик поверхности и максимально возможных значений механических свойств упрочненного слоя.

Материалы и методы исследования

Определение рациональных режимов процесса реверсивного выглаживания. Технология реверсивного выглаживания представляет собой сложный многофакторный процесс со следующими технологическими параметрами упрочнения: продольная подача $S_{пр}$, частота вращения заготовки n_3 , радиальный натяг t , реверсивная частота вращения рабочего инструмента n_p , начальный угол установки рабочего инструмента α_n и амплитуда угла реверсивного вращения рабочего инструмента α_p . Эти параметры оказывают неоднозначное влияние на характеристики качества деталей машин. Например, экспериментальные результаты в работах [21, 22] показывают, что уменьшение продольной подачи РИ, частоты вращения заготовки, величины радиального натяга и реверсивной частоты вращения РИ приводит к уменьшению шероховатости поверхности и отклонению от круглости упрочненных деталей, но в этом случае снижаются микротвердость и величина сжимающих остаточных напряжений поверхностного слоя.

Зависимость качества упрочненных деталей от основных технологических параметров реверсивного выглаживания представлена в работах [21-24], часть которых приведена на рис. 1 и 2. Изменение параметров шероховатости упрочненных деталей машин в зависимости от технологических параметров реверсивного выглаживания показано на рис. 1.

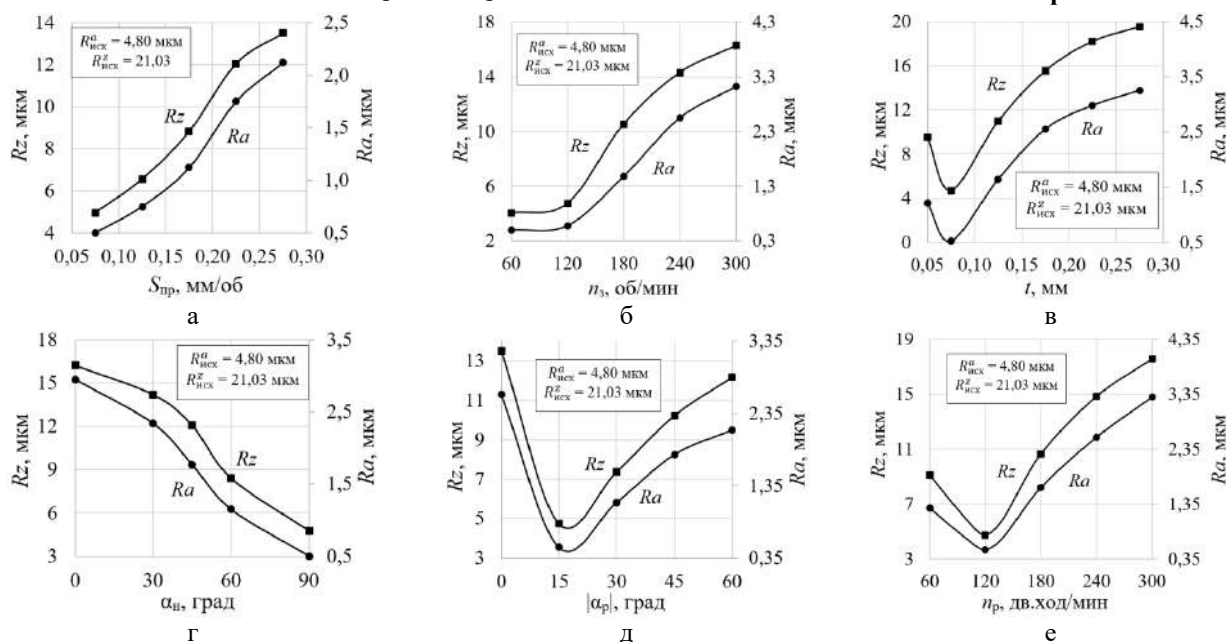


Рис. 1. Изменение параметров шероховатости Ra , Rz от параметров технологического процесса: а – продольная подача $S_{пр}$; б – частота вращения заготовки n_3 ; в – радиальный натяг t ; г – начальный угол установки рабочего инструмента α_n ; д – амплитуда угла реверса рабочего инструмента α_p ; е – частота реверса рабочего инструмента n_p

Fig. 1. Change in roughness parameters (Ra , Rz) depending on process parameters: а is longitudinal feed ($S_{пр}$); б is workpiece rotation speed (n_3); в is radial interference (t); г is initial angle of installation of the working tool (α_n); д is amplitude of the angle of the working tool reverse (α_p); е is working tool reverse frequency (n_p)

Следует пояснить, что для реализации реверсивного выглаживания не требуется дополнительной обработки, как, например, при алмазном выглаживании. Обычное полуступенчатое точение перед реверсивным выглаживанием позволяет получить поверхность, которая по величине шероховатости соответствует чистовому шлифованию.

Изменение микротвердости поверхностного слоя упрочненных деталей машин в зависимости от технологических параметров реверсивного выглаживания показано на **рис. 2**.

Таким образом, в связи с вышеизложенным именно определение рациональных режимов процесса реверсивного выглаживания, обеспечивающих получение наилучших значений показателей качества деталей машин, представляет значительный практический интерес.

Для решения задачи по получению наилучших значений характеристик качества поверхностного слоя упрочненных деталей реверсивным выглаживанием использована компьютерная программа *Microsoft Visual Studio 2012*, в которой были приняты следующие входные параметры технологического процесса:

$S_{пр} = 0,07-0,28$ мм/об; $n_3 = 60-300$ об/мин; $t = 0,07-0,28$ мм; $\alpha_n = 0-90^\circ$; $\alpha_p = 0-15^\circ$ и $n_p = 60-300$ дв. ход/мин.

Исходными данными для проведения расчетов в компьютерной программе являются однофакторные уравнения (1)-(6), полученные по результатам экспериментальных исследований. Каждое из систем уравнений (1)-(6) имеет 6 параметров обработки ($S_{пр}$, n_3 , t , n_p , α_n , α_p). Эти 6 параметров образуют 15 независимых пар, таких как ($S_{пр}$, n_3), (n_3 , t), (t , n_p), Для каждой пары параметров после обработки в компьютерной программе *Microsoft Visual Studio 2012* получен соответствующий график в трехкоординатной системе (**рис. 3 и 4**). Остальные пары параметров обрабатываются аналогично (в данной статье представлены только результаты обработки 6-ти пар параметров). Затем выполнен анализ каждого полученного графика, чтобы найти значения пары параметров, при которых достигаются наилучшие значения характеристик качества поверхностного слоя упрочненных деталей. После этого выбран интервал режимов обработки, при которых получаются наилучшие значения показателя качества поверхности.

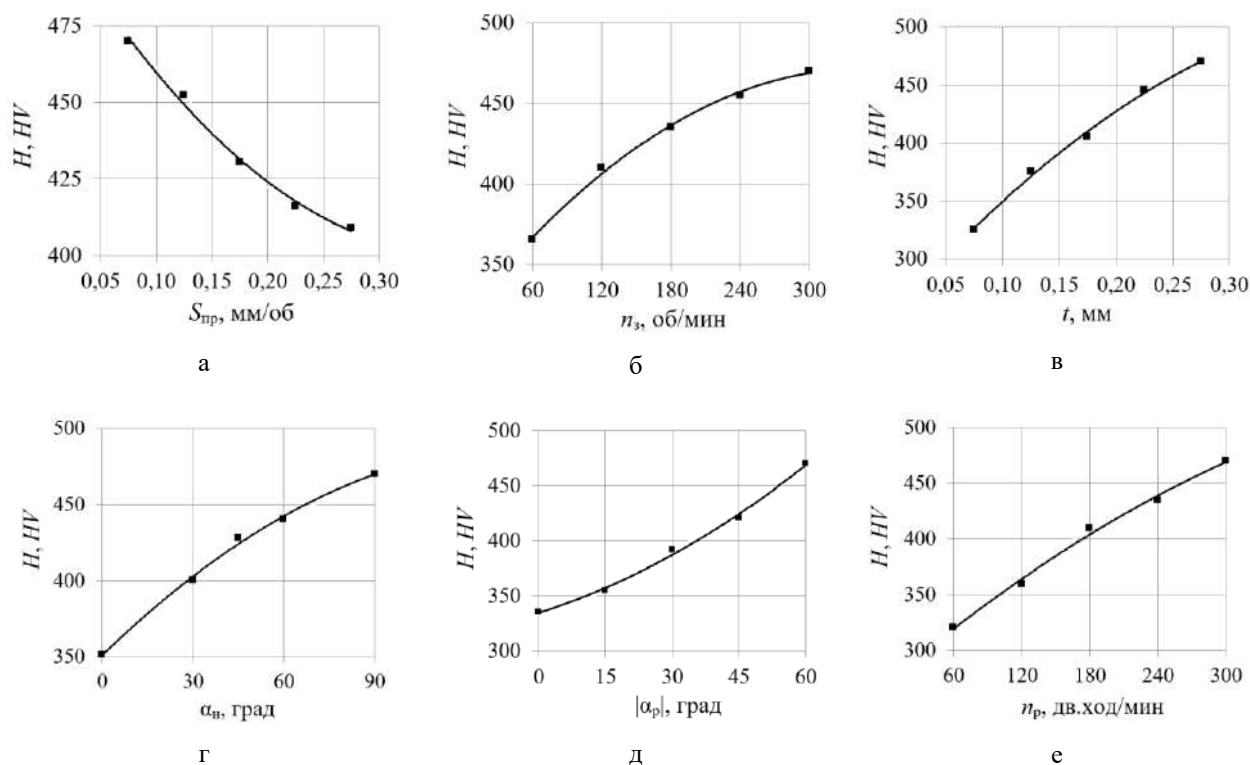


Рис. 2. Изменение микротвердости H от параметров технологического процесса: а – продольная подача $S_{пр}$; б – частота вращения заготовки n_3 ; в – радиальный натяг t ; г – начальный угол установки рабочего инструмента α_n ; д – амплитуда угла реверса рабочего инструмента α_p ; е – частота реверса рабочего инструмента n_p

Fig. 2. Change in microhardness (H) depending on process parameters: а is longitudinal feed ($S_{пр}$); б is workpiece rotation speed (n_3); в is radial interference (t); г is initial angle of installation of the working tool (α_n); д is amplitude of the angle of the working tool reverse (α_p); е is working tool reverse frequency (n_p)

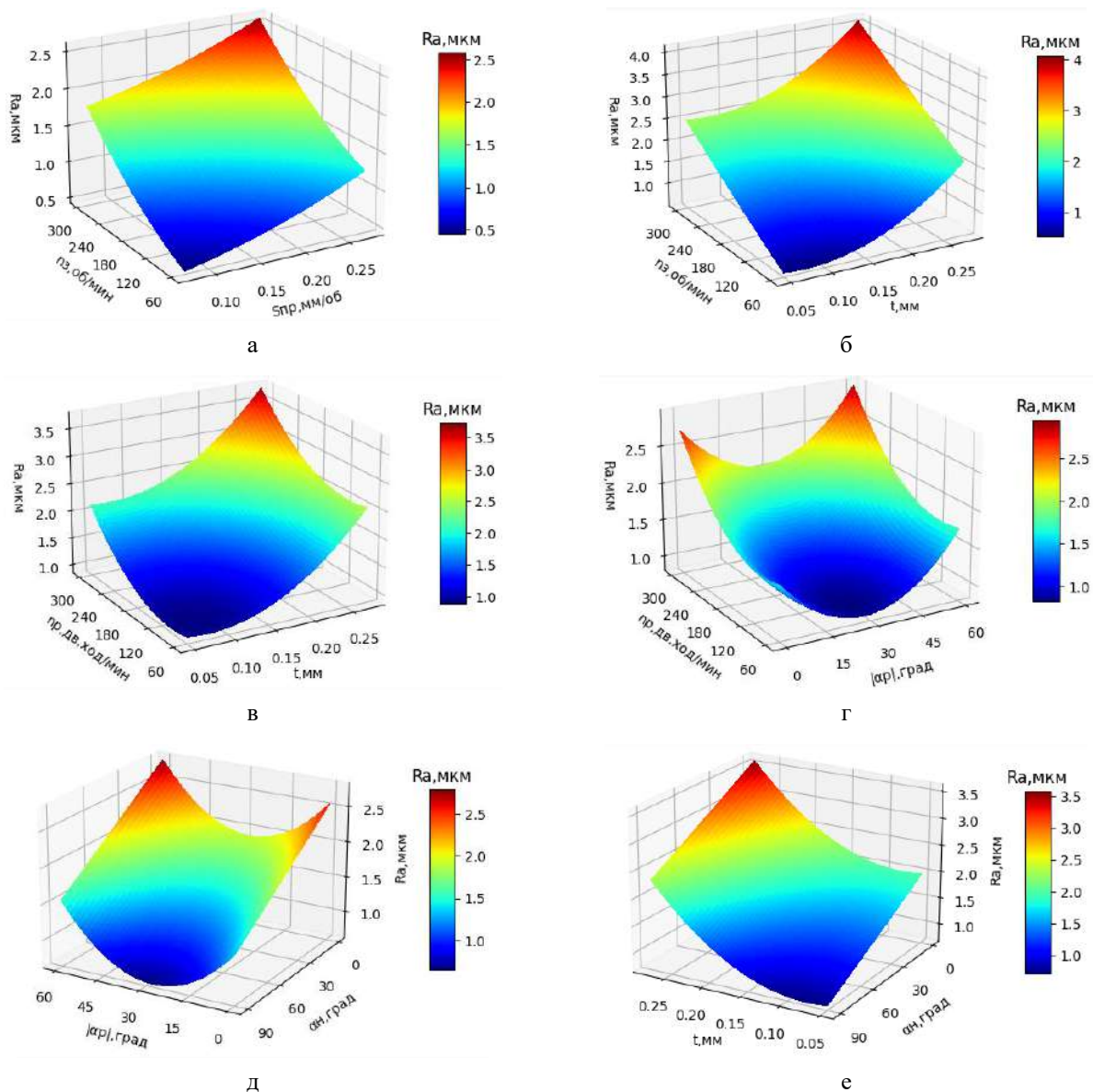


Рис. 3. Зависимость шероховатости Ra от двухфакторных комбинаций параметров реверсивного выглаживания: а – (n_3, S_{pp}) ; б – (n_3, t) ; в – (n_p, t) ; г – (n_p, α_p) ; д – (α_p, α_n) ; е – (t, α_n)

Fig. 3. Dependence between roughness (Ra) and two-factor combinations of reverse burnishing parameters: а is (n_3, S_{pp}) ; б is (n_3, t) ; в is (n_p, t) ; г is (n_p, α_p) ; д is (α_p, α_n) ; е is (t, α_n)

Параметры шероховатости Ra :

$$Ra = \begin{cases} 16S_{pp}^2 + 2,36S_{pp} + 0,301 \\ (2E - 05)n_3^2 + 0,0038n_3 + 0,058 \\ -8,3462t^2 + 14,3t + 0,0717 \\ (6E - 05)n_p^2 - 0,0117n_p + 1,4429 \\ 0,0017\alpha_p^2 - 0,0943\alpha_p + 2,1018 \\ (5E - 06)\alpha_n^2 - 0,0281\alpha_n + 3,009 \end{cases} \quad (1)$$

Отклонение от круглости $\Delta_{кр}$:

$$\Delta_{кр} = \begin{cases} 37,43S_{pp}^2 + 15,16S_{pp} + 3,73 \\ (9E - 05)n_3^2 + 0,0125n_3 + 3,2480 \\ 522,94t^2 - 57,565t + 7,7735 \\ 0,0002n_p^2 - 0,045n_p + 8,1626 \\ 0,0091\alpha_p^2 - 0,5203\alpha_p + 13,551 \\ -0,0004\alpha_n^2 - 0,0432\alpha_n + 12,472 \end{cases} \quad (2)$$

Величина сжимающих остаточных напряжений $\sigma^{ост}$:

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

Высота волнистости W_z :

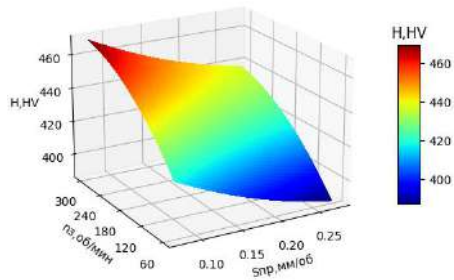
$$W_z = \begin{cases} 14S_{np}^2 + 31,24S_{np} + 2,87 \\ 0,0002n_3^2 - 0,0234n_3 + 5,8977 \\ 449,34t^2 - 60,54t + 8,33 \\ 0,0001n_p^2 - 0,0052n_p + 5,7421 \\ 0,0061\alpha_p^2 - 0,3315\alpha_p + 11,007 \\ 0,0002\alpha_H^2 - 0,1003\alpha_H + 12,5 \end{cases} \quad (5)$$

Микротвердость HV :

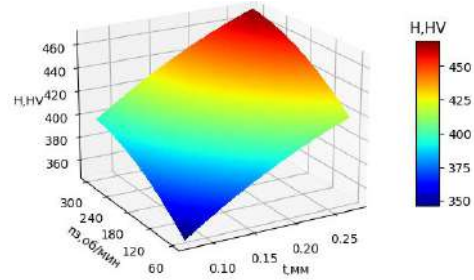
$$HV = \begin{cases} 820S_{np}^2 - 603,6S_{np} + 511,98 \\ -0,0013n_3^2 + 0,8893n_3 + 318 \\ -1168,6t^2 + 1128,4t + 248,32 \\ -0,0007n_p^2 + 0,866n_p + 269,32 \\ 0,016\alpha_p^2 + 1,2724\alpha_p + 334,78 \\ -0,0068\alpha_H^2 + 1,9278\alpha_H + 351,06 \end{cases} \quad (4)$$

Глубина наклепа h :

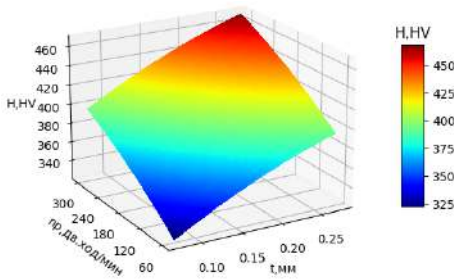
$$h = \begin{cases} 1,11S_{np}^2 - 0,83S_{np} + 0,96 \\ (-1E - 06)n_3^2 + 0,0009n_3 + 0,8058 \\ -3,71t^2 + 4,64t + 0,59 \\ (2E - 06)n_p^2 + 0,0027n_p + 0,61 \\ (-7E - 05)\alpha_p^2 + 0,004\alpha_p + 0,8241 \\ (2E - 06)\alpha_H^2 + 0,0008\alpha_H + 0,8163 \end{cases} \quad (6)$$



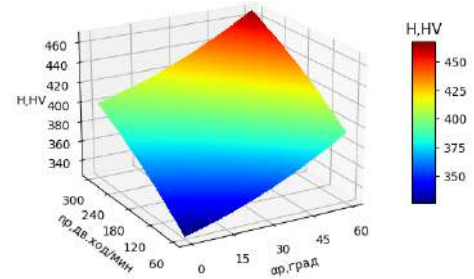
а



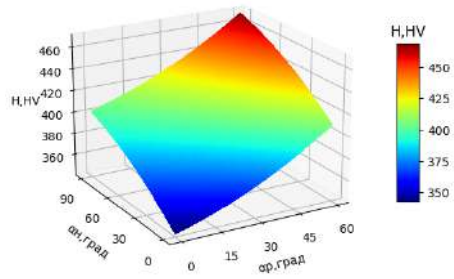
б



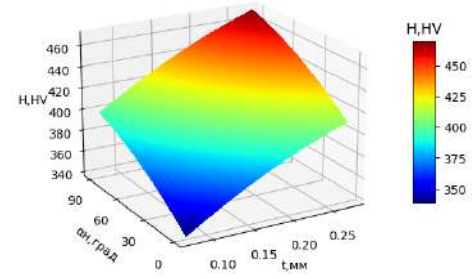
в



г



д



е

Рис. 4. Зависимость микротвердости H от двухфакторных комбинаций параметров реверсивного выглаживания: а – (n_3, S_{np}) ; б – (n_3, t) ; в – (n_p, t) ; г – (n_p, α_p) ; д – (α_p, α_H) ; е – (t, α_H)

Fig. 4. Dependence between microhardness (H) and two-factor combinations of reverse burnishing parameters: а is (n_3, S_{np}) ; б is (n_3, t) ; в is (n_p, t) ; г is (n_p, α_p) ; д is (α_p, α_H) ; е is (t, α_H)

Результаты и их обсуждение

На **рис. 3** представлено несколько примеров статистической обработки по определению рациональных режимов упрочнения, обеспечивающих получение наименьших значений параметров шероховатости поверхности упрочненных деталей, а на **рис. 4** – наибольшей микротвердости поверхностного слоя упрочненных деталей.

На **рис. 3** темно-синим цветом обозначена область, соответствующая наименьшему значению параметра шероховатости поверхности упрочненных деталей. По **рис. 4** установлено, что наименьшая шероховатость (0,5-0,52 мкм) достигается при следующих рациональных значениях технологических параметров реверсивного выглаживания: $S_{пр} = 0,07-0,10$ мм/об; $n_3 = 60-100$ об/мин; $t = 0,07-0,10$ мм; $n_p = 115-125$ дв. ход/мин; $\alpha_n = 90^\circ$ и $\alpha_p = \pm 10-\pm 20^\circ$.

На **рис. 4** темно-красный цвет представляет собой область, соответствующую наибольшему значению максимальной микротвердости поверхностного слоя. Рациональные режимы упрочнения, обеспечивающие максимальную микротвердость (465-470 HV), следующие: $S_{пр} = 0,07-0,08$ мм/об; $n_3 = 280-300$ об/мин; $t = 0,25-0,28$ мм; $n_p = 270-300$ дв. ход/мин; $\alpha_n = 90^\circ$ и $\alpha_p = \pm 55-\pm 60^\circ$.

На основе результатов экспериментальных исследований и численных расчетов, необходимые режимы для параметров процесса реверсивного выглаживания приведены в **таблице**.

Таким образом, по результатам множественной регрессии определены рациональные режимы реверсивного выглаживания, обеспечивающие наилучшие значения показателей качества поверхности деталей. Для получения наименьших значений микрогеомет-

рических показателей поверхности упрочненных деталей (шероховатость, волнистость и отклонение от круглости) установлены следующие режимы упрочнения: $S_{пр} = 0,07-0,10$ мм/об; $n_p = 60-100$ об/мин; $t = 0,08-0,10$ мм; $n_p = 115-120$ дв. ход/мин; $\alpha_n = 90^\circ$ и $\alpha_p = \pm 10-\pm 20^\circ$. Для повышения сжимающих остаточных напряжений и механических свойств поверхностного слоя деталей рекомендуются следующие режимы упрочнения: $S_{пр} = 0,07-0,10$ мм/об; $n_p = 280-300$ об/мин; $t = 0,28-0,30$ мм; $n_p = 290-300$ дв. ход/мин; $\alpha_n = 90^\circ$ и $\alpha_p = \pm 55-\pm 60^\circ$.

Заключение

1. По результатам экспериментальных исследований получена система эмпирических управлений, позволяющая определить значение конкретного параметра качества поверхностного слоя в зависимости от параметров и режимов реверсивного выглаживания.

2. С использованием компьютерной программы *Microsoft Visual Studio 2012* установлены рациональные режимы реверсивного выглаживания, обеспечивающие формирование минимально возможных значений микрогеометрических параметров поверхности при реверсивном выглаживании. Для этого установлены следующие режимы обработки: $S_{пр} = 0,07-0,10$ мм/об; $n_p = 60-100$ об/мин; $t = 0,08-0,10$ мм; $n_p = 115-120$ дв. ход/мин; $\alpha_n = 90^\circ$ и $\alpha_p = \pm 10-\pm 20^\circ$.

3. Для повышения сжимающих остаточных напряжений и механических свойств поверхностного слоя деталей рекомендуются следующие режимы упрочнения: $S_{пр} = 0,07-0,10$ мм/об; $n_p = 280-300$ об/мин; $t = 0,28-0,30$ мм; $n_p = 290-300$ дв. ход/мин; $\alpha_n = 90^\circ$ и $\alpha_p = \pm 55-\pm 60^\circ$.

Таблица. Рациональные режимы реверсивного выглаживания для достижения показателей качества упрочненных деталей

Table. Rational modes of reverse burnishing to achieve quality indicators for hardened parts

Показатели качества	Интервал варьирования	Режимы упрочнения					
		$S_{пр}$, мм/об	n_3 , об/мин	t , мм	α_n , град	$ \alpha_p $, град	n_p , дв. ход/мин
Ra , мкм	0,50-0,52	0,07-0,10	60-100	0,07-0,10	90	10-20	115-125
Wz , мкм	5,3-5,5	0,07-0,10	60-100	0,07-0,10	90	10-20	115-125
Δk_p , мкм	5,0-5,2	0,07-0,10	60-100	0,07-0,10	90	10-20	115-125
$\sigma_{ост}$, МПа	340-345	0,07-0,08	280-300	0,25-0,28	90	55-60	270-300
H , HV	465-470	0,07-0,08	280-300	0,25-0,28	90	55-60	270-300
h , мм	1,63-1,65	0,07-0,08	280-300	0,25-0,28	90	55-60	270-300

Список источников

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
2. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
3. Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
4. Особенности строения поверхностного слоя деталей машин / Мусохранов М.В., Калмыков В.В., Малышев Е.Н., Попков В.М. // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. №7-2. С. 51-54.
5. Иноземцев В.Е. Оценка воздействия управляемых входных критериев на качественные характеристики формируемой поверхности деталей // Научные технологии в машиностроении. 2019. №9 (99). С. 12-17.
6. Анализ взаимосвязи параметров поверхностного слоя и эксплуатационных характеристик внутренних поверхностей деталей в процессе их работы / Кожевникова А.А., Блинов В.С., Субочева Е.Ю., Никитин М.В. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. №1 (236). С. 21-24.
7. Черепанов А.П., Ляпустин П.К. Закономерности снижения ресурса уникальных машин // Современные Технологии. Системный Анализ. Моделирование. 2019. №3 (63). С. 37-45.
8. Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Пыриков И.Л. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием деталей машин с закономерным изменением качества поверхностных слоев // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. №1 (29). С. 22-31.
9. Торопынин С.И., Медведев М.С. Нанесение защитных покрытий по коррозированным поверхностям деталей машин // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2004. №4. С. 138-141.
10. Федонин О.Н. Технологическое воздействие на коррозионную стойкость поверхностных слоев деталей // Научные технологии в машиностроении. 2012. №9 (15). С. 15-17.
11. Махалов М. С., Блюменштейн В. Ю. Механика процесса поверхностного пластического деформирования. Модель упрочняемого упругопластического тела // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2018. № 4. С. 6-20.
12. A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metallic materials / Ning Nie, Lihong Su, Guanyu Deng, Huijun Li, Hailiang Yu, Anh Kiet Tieu // Journal of Materials Research and Technology. 2021, vol. 15, pp. 6574-6607.
13. Enhancing Surface Integrity of Additively Manufactured Inconel 718 by Roller Burnishing Process / Nihal Yaman, Nedim Sunay, Mert Kaya, Yusuf Kaynak // Science Direct. 2022, vol. 108, pp. 681-686.
14. Кропоткина Е.Ю. Управление качеством нежестких деталей методами поверхностного пластического деформирования // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. №2 (14). С. 25-28.
15. Effect of microstructure on the mechanical properties of ultrafine-grained Cu-Al-Ni alloys processed by deformation and annealing / Shuaixin Zhang, Li Wu, Tao Gu, Yucong Shi, Xiaolin Tian, Huanqing Li, Hua Hou, Yuhong Zhao // Journal of Alloys and Compounds. 2022, vol. 923, 166413.
16. Studies on the surface characteristics of Ti60 alloy induced by turning combined with ball burnishing / Kunpeng Han, Liang Tan, Changfeng Yao, Dinghua Zhang, Zheng Zhou // Journal of Manufacturing Processes. 2022, vol. 76, pp. 349-364.
17. Митрофанова К.С. Влияние поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом на структурно-фазовое состояние и микротвердость образцов из стали 45 // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. №3 (151). С. 4-12.
18. Modeling of strengthening mechanisms of surface layers in burnishing process / Reza Teimouri, Marcin Grabowski, Rafał Bogucki, Łukasz S'łusarczyk, Sebastian Skoczypiec // Materials & Design. 2022, vol. 223, 111114.
19. Пат. 2758713 РФ. Способ поверхностного пластического деформирования наружных поверхностей тел вращения / Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай, заявл. 14.01.2021; опубл. 01.11.2021. Бюл. № 31.
20. Буй Т.Д., Нгуен Х.Х., Нгуен В.Х. Влияние геометрии тороидального ролика на напряженно-деформированное состояние цилиндрических деталей при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. ст. Всерос. науч.-техн. конф. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2023. С. 98-102.
21. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на шероховатость упрочненных деталей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 1. С. 120-130.
22. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Влияние реверсивного поверхностного пластического деформирования на параметры волнистости цилиндрических деталей // Научные технологии в машиностроении. 2023. №4 (142). С. 37-48.
23. Хоанг Н.А., Нгуен Х.Х., Нгуен В.Х. Влияние параметров реверсивного поверхностного пластического деформирования на механические свойства упрочненного слоя цилиндрических деталей // Технологии и техника: пути инновационного раз-

вития: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2023. С. 535-540.

24. Зайдес С.А., Нгуен Хыу Хай. Определение остаточных напряжений с использованием шумов Баркгаузена при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 51-61.

References

- Smelyansky V.M. *Mekhanika uprochneniya detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 300 p. (In Russ.)
- Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 328 p. (In Russ.)
- Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detalei mashin* [The quality of the surface layer of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 2000, 320 p. (In Russ.)
- Musokhranov M.V., Kalmykov V.V., Malyshev E.N., Popkov V.M. Features of the structure of the surface layer of machine parts. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii* [Current Trends in the Development of Science and Technology]. 2016;(7-2):51-54. (In Russ.)
- Inozemtsev V.E. Assessing the impact of controlled input criteria on the quality characteristics of the formed surface of parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Knowledge Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2019;(9(99)):12-17. (In Russ.)
- Kozhevnikova A.A., Blinov V.S., Subocheva E.Yu., Nikitin M.V. Analysis of the relationship between the parameters of the surface layer and the operational characteristics of the internal surfaces of parts during their operation. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Izvestiya of Volgograd State Technical University]. 2020;(1(236)): 21-24. (In Russ.)
- Cherepanov A.P., Lyapustin P.K. Patterns of reducing the service life of unique machines. *Sovremennye tekhnologii. Sistemny analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2019; (3(63)):37-45. (In Russ.)
- Fedorov V.P., Nagorkin M.N., Pyrikov I.L. Finishing-hardening treatment by surface plastic deformation of machine parts with a natural change in the quality of surface layers. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2011; (1(29)):22-31. (In Russ.)
- Toropynin S.I., Medvedev M.S. Application of protective coatings on corroded surfaces of machine parts. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University]. 2004;(4):138-141. (In Russ.)
- Fedonin O.N. Technological impact on the corrosion resistance of surface layers of parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Knowledge Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2012; (9(15)):15-17. (In Russ.)
- Makhalov M.S., Blyumenshtein V.Yu. Mechanics of the process of surface plastic deformation. Model of a strengthened elastoplastic body. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working (Technology, Equipment, Tools)]. 2018;(4):6-20. (In Russ.)
- Ning Nie, Lihong Su, Guanyu Deng, Huijun Li, Hailiang Yu, Anh Kiet Tieu. A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metallic materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:6574-6607.
- Nihal Yaman, Nedim Sunay, Mert Kaya, Yusuf Kaynak. Enhancing surface integrity of additively manufactured Inconel 718 by roller burnishing process. *Science Direct*. 2022;108:681-686.
- Kropotkina E.Yu. Quality control of non-rigid parts by surface plastic deformation methods. *Vestnik MGTU «Stankin»* [Bulletin of Moscow State University of Technology Stankin]. 2011;(2(14)):25-28. (In Russ.)
- Shuaixin Zhang, Li Wu, Tao Gu, Yucong Shi, Xiaolin Tian, Huanqing Li, Hua Hou, Yuhong Zhao. Effect of microstructure on the mechanical properties of ultrafine-grained Cu-Al-Ni alloys processed by deformation and annealing. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;923:166413.
- Kunpeng Han, Liang Tan, Changfeng Yao, Dinghua Zhang, Zheng Zhou. Studies on the surface characteristics of Ti60 alloy induced by turning combined with ball burnishing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;76:349-364.
- Mitrofanova K.S. The influence of surface plastic deformation by a multi-radius roller on the structural phase state and microhardness of samples made from steel 45. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. 2022; (3(151)):4-12. (In Russ.)
- Reza Teimouri, Marcin Grabowski, Rafał Bogucki, Łukasz S'łusarczyk, Sebastian Skoczypiec. Modeling of strengthening mechanisms of surface layers in burnishing process. *Materials & Design*. 2022;223:111114.
- Zaides SA, Nguyen Huu Hai. *Sposob poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya naruzhnykh poverkhnostei tel vrashcheniya* [Method for surface plastic deformation of the outer surfaces of bodies of revolution]. Patent RU, no. 2758713, 2021.
- Bui T.D., Nguyen H.H., Nguyen V.H. Influence of toroidal roller geometry on the stress and strain state of cylindrical parts under reverse surface plastic deformation. *Perspektivy razvitiya tekhnologii obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii: sb. nauch. st. Vseros. nauchno-tekhnich. konf.* [Prospects for the

- development of processing technologies and equipment in mechanical engineering. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conferences]. Voronezh: Publishing House of Voronezh State Technical University, 2023, pp. 98-102. (In Russ.)
21. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Influence of parameters of reverse surface plastic deformation on roughness of hardened parts. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University]. 2023;19(1): 120-130. (In Russ.)
22. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. The influence of reverse surface plastic deformation on the parameters of waviness of cylindrical parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Knowledge Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2023;(4(142)):37-48. (In Russ.)
23. Hoang N.A., Nguyen H.H., Nguyen V.H. Influence of parameters of reverse surface plastic deformation on the mechanical properties of the strengthened layer of cylindrical parts. *Tekhnologii i tekhnika. Puti innovatsionnogo razvitiya: sb. nauch. st. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Technologies and equipment: Ways of innovative development. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Voronezh: Publishing House of Voronezh State Technical University, 2023, pp. 535-540. (In Russ.)
24. Zaides S.A., Nguyen Huu Hai. Determination of residual stresses by using Barkhausen noise in the reverse surface plastic deformation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(3):51-61. (In Russ.)

Поступила 13.11.2023; принята к публикации 18.01.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 13/11/2023; revised 18/01/2024; published 27/06/2024

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

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

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

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



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.91.02
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-111-119

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА УВОДА ОСЕЙ ОТВЕРСТИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДВУЗУБЫМИ ЗЕНКЕРАМИ

Дерябин И.П.¹, Токарев А.С.²

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ТТИ НИЯУ «МИФИ»), Трехгорный, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Частая смена номенклатуры изделий в современном мире является актуальным вопросом. Развитие современных станков с ЧПУ происходит слишком стремительно, что не позволяет подстроиться к ритму машиностроительного производства. Повышение качества подготовки производства поможет решить данный вопрос. Это возможно за счет автоматизации систем подготовки различного уровня. Автоматизировать системы – значит проанализировать их действия, разработать математическую модель, которая максимально приблизит к действующей обработке. Современные математические модели не учитывают множество факторов, и порой получаемые результаты различаются в 2-4 раза в отличие от справочных данных. Обработка отверстий играет немаловажную роль в современном производстве. Получение отверстия происходит за несколько переходов, причем погрешность первого перехода перекладывается на второй, второго – на третий и т.д. Прогнозирование величины погрешности и уменьшения значения этой величины поможет существенно повысить экономическую эффективность производства. **Цель работы.** Экспериментально исследовать разработанные математические модели расчета увода оси отверстий при обработке двузубыми зенкерами с различными главными углами в плане. **Используемые методы.** Разработана методика проведения экспериментов с использованием различных марок материала, режимов резания и разных углов заточки режущего инструмента. **Новизна.** Установлено, что дисимметрично заточенные главные углы в плане у режущего инструмента снижают увод оси отверстия при обработке. **Результат.** Получена возможность управления точности расположения оси отверстий при обработке дисимметрично заточенным режущим инструментом. **Практическая значимость.** Разработанная методика расчета увода оси отверстия при обработке дисимметрично заточенным режущим инструментом позволит повысить эффективность проектирования технологических процессов на станки с ЧПУ.

Ключевые слова: заточка инструмента, дисимметрия, обработка отверстий, увод оси отверстий, концевые мерные инструменты, зенкер, монолитный инструмент, погрешность обработки

© Дерябин И.П., Токарев А.С., 2024

Для цитирования

Дерябин И.П., Токарев А.С. Экспериментальное исследование адекватности математической модели расчета увода осей отверстий при обработке двузубыми зенкерами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 111-119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-111-119>



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

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE ADEQUACY OF A MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE DEFLECTION OF THE AXES OF HOLES WHEN MACHINING WITH TWO FLUTE COUNTERSINKS

Deryabin I.P.¹, Tokarev A.S.²

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Trekhgornyy Technological Institute – branch of National Research Nuclear University MEPhI (TTI NRNU MEPhI), Trekhgornyy, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The frequent change of the product range in the modern world is a relevant issue. Modern CNC machines are developing too rapidly, leaving no opportunity to adjust to the rhythm of machine-building production. Improving the quality of pre-production will help solve this issue. This is possible due to the automation of preparation systems at various levels. To automate systems means to analyze their actions, develop a mathematical model that will bring them as close as possible to the current machining. Modern mathematical models do not take into account many factors, and sometimes the results obtained differ 2-4 times in contrast to the reference data. Hole machining plays an important role in modern manufacturing. The hole is made in several transitions, and the error of the first transition is shifted to the second one, the second one to the third one, etc. Forecasting the error value and reducing the value of this parameter will significantly increase the economic efficiency of production. **Objectives.** The study is aimed at an experimental investigation of the developed mathematical models for calculating the deflection of the axes of holes, when machining with two flute countersinks with different main cutting edge angles. **Methods Applied.** A method was developed to conduct experiments using different grades of the material, cutting modes and different sharpening angles of the cutting tool. **Originality.** It was found that the dissymmetrically sharpened main cutting edge angles of the cutting tool reduced the deflection of the hole axis during machining. **Result.** It is possible to control accuracy of the location of the axis of the holes, when machining with a dissymmetrically sharpened cutting tool. **Practical Relevance.** The developed method for calculating the deflection of the hole axis during machining with a dissymmetrically sharpened cutting tool will increase efficiency of designing technological processes for CNC machines.

Keywords: tool sharpening, dissymmetry, hole machining, hole axis deflection, end measuring tools, countersink, monolithic tool, machining error

For citation

Deryabin I.P., Tokarev A.S. An Experimental Study on the Adequacy of a Mathematical Model for Calculating the Deflection of the Axes of Holes when Machining with Two Flute Countersinks. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 111-119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-111-119>

Введение

Малоизученной областью обработки отверстий является обработка концевыми мерными инструментами (КМИ) [1-3]. При обработке деталей типа тел вращения, а также корпусных деталей очень часто приходится производить рассверливание уже имеющегося отверстия, полученного предварительным сверлением, прокатом, ковкой, штамповкой и т.д. [4, 7-9]. Предшествующая обработка так или иначе оказывает влияние на точность расположения оси отверстия, а следовательно, будет наблюдаться факт наследования погрешности при дальнейшей обработке отверстия, что отрицательно скажется на точности расположения оси [11]. Учет наследования погрешности предшествующей обработки необходим, это уже было доказано Козловым А.В., Дерябиным И.П., Токаревым А.С. и др. [5, 6, 10].

Материалы и методы исследования

Для получистой и чистовой обработки отвер-

стий диаметром до 6 мм используют двузубый зенкер по ГОСТ 12489-71.

В работах [5-7] было доказано, что дисимметричная заточка трехзубого режущего осевого инструмента повышает точность расположения оси отверстий. Для того чтобы выяснить, справедливо ли данное утверждение для двузубого режущего инструмента, была разработана математическая модель расчета увода оси отверстия, и для подтверждения ее адекватности необходимо провести экспериментальные исследования.

Был рассмотрен процесс формообразования отверстия монолитным двузубым зенкером, для того чтобы на его основе разработать математическую модель расчета увода оси отверстия (**рис. 1**).

Используя разработанную методику Дерябина И.П. и Токарева А.С. [5, 11] на основании построения срезаемых площадей сечений (см. **рис. 1**), была разработана математическая модель расчета увода оси отверстия при обработке двузубым монолитным зенкером, которая была преобразована в более удобный для расчета вид:

$$e = \frac{1/2 \cdot \left((1,23 \cdot (S \cdot \sin \varphi_2)) \cdot (0,9 \cdot (S \cdot \cos \varphi_1)) + (t \cdot S) + \left(\frac{D - D_0}{2} + e_{п.п} \sin(\psi) \right) \right) + (1/2 \cdot (1/35 \cdot t \cdot \cos \varphi_2) \cdot 1/2 \cdot S) + \left((1/2 \cdot (S \cdot (1/10 \cdot t))) + \left(\frac{D - D_0}{2} + e_{п.п} \sin(\psi) \right) \right)}{\frac{3 \cdot D \cdot E}{L^3}} \cdot \frac{L_{отв}}{S}, \quad (1)$$

где S – подача, мм/зуб; φ_1, φ_2 – главный угол в плане первого и второго зуба соответственно, град; t – глубина резания, мм; ψ – текущий угол поворота инструмента, град; $e_{п.п}$ – погрешность предшествующего перехода, мм; D – диаметр инструмента, мм; D_0 – диаметр отверстия в заготовке, мм; E – модуль упругости первого рода, МПа; L – рабочий вылет сборного зенкера, мм.

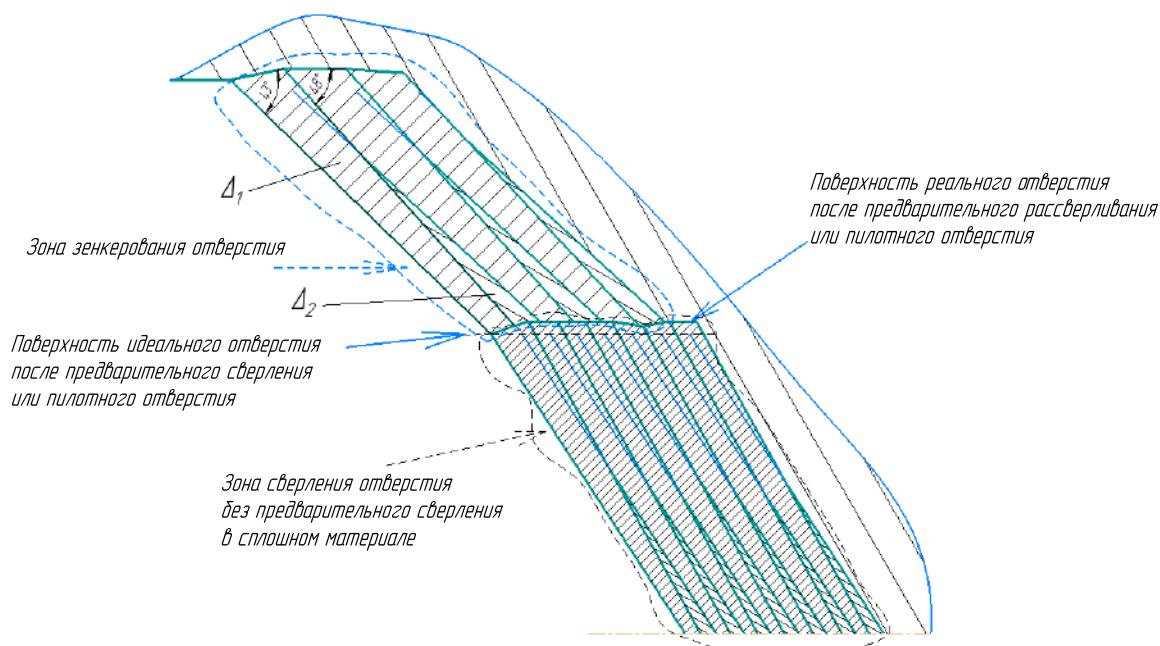


Рис. 1. Схема формообразования срезаемых сечений припуска монолитным зенкером каждым лезвием для варианта главных углов в плане 43-48° после предварительного сверления или в пилотном отверстии: Δ_1 – площадь сечения припуска, срезаемая первым лезвием; Δ_2 – площадь сечения припуска, срезаемая вторым лезвием

Fig. 1. Diagram of the shaping of the cut sections of the allowance with a monolithic countersink with each blade for the option of the main cutting edge angles of 43-48° after pre-drilling or in the pilot hole: Δ_1 is a cross-sectional area of the allowance cut off by the first blade, Δ_2 is a cross-sectional area of the allowance cut off by the second blade

Для подтверждения адекватности разработанной модели расчета увода оси отверстия при обработке двузубым монолитным зенкером были проведены экспериментальные исследования.

Для данного эксперимента были определены основные параметры.

Выбраны диаметры режущего инструмента: цилиндрических сверл диаметрами 2,5 и 5 мм; зенкера диаметрами 3 и 6 мм.

Материал заготовок: сталь 20, количество – 60 шт., диаметр – 60 мм; сталь 12Х18Н10Т, количество – 60 шт., диаметр – 60 мм; сталь ШХ15, количество – 60 шт., диаметр – 60 мм.

Длина заготовок была выбрана таким образом, чтобы получаемое сквозное отверстие было не менее

5D, то есть глубоким.

Режущий инструмент: набор сверл цилиндрических спиральных монолитных HSS; набор сверл цилиндрических спиральных монолитных P9M4K8; зенкера диаметром 3 и 6 мм HSS; зенкера диаметром 3 и 6 мм P9M4K8.

Оборудование – станок с ЧПУ DMG MORI DMU 50.

Для обработки заготовок были выбраны следующие режимы резания:

– Сталь 20:

• сверление диаметр 2,5 мм: S – 0,1 мм/об; n – 2100 об/мин; V – 17 м/мин;

• сверление диаметр 5 мм: S – 0,28 мм/об; n – 490 об/мин; V – 20 м/мин;

- зенкерование диаметр 3 мм: $S - 0,22$ мм/об; $n - 1750$ об/мин; $V - 30$ м/мин;
 - зенкерование диаметр 6 мм: $S - 0,36$ мм/об; $n - 580$ об/мин; $V - 26$ м/мин.
 - Сталь 12Х18Н10Т:
 - сверление диаметр 2,5 мм: $S - 0,03$ мм/об; $n - 2500$ об/мин; $V - 19,6$ м/мин;
 - сверление диаметр 5 мм: $S - 0,12$ мм/об; $n - 1150$ об/мин; $V - 46$ м/мин;
 - зенкерование диаметр 3 мм: $S - 0,12$ мм/об; $n - 2230$ об/мин; $V - 21$ м/мин;
 - зенкерование диаметр 6 мм: $S - 0,20$ мм/об; $n - 1050$ об/мин; $V - 46$ м/мин.
 - Сталь ШХ15:
 - сверление диаметр 2,5 мм: $S - 0,06$ мм/об; $n - 2200$ об/мин; $V - 17,5$ м/мин;
 - сверление диаметр 5 мм: $S - 0,16$ мм/об; $n - 980$ об/мин; $V - 40$ м/мин;
 - зенкерование диаметр 3 мм: $S - 0,18$ мм/об; $n - 1980$ об/мин; $V - 19$ м/мин;
 - зенкерование диаметр 6 мм: $S - 0,24$ мм/об; $n - 990$ об/мин; $V - 40$ м/мин.
- Заточка главных углов в плане у зенкеров:
- Диаметр 3 мм – 45-45° – симметричная заточка;
 - Диаметр 3 мм – 43-48° – дисимметричная заточка;
 - Диаметр 6 мм – 45-45° – симметричная заточка;
 - Диаметр 6 мм – 43-48° – дисимметричная заточка.

Погрешность главного угла в плане при изготовлении инструмента может достигать 3° (ГОСТ 12489-71). Поэтому, опираясь на исследования в работах [5-7], были выбраны именно главные углы в плане равными 43 и 48° (максимально возможные отклонения угла от заданного значения в 45°).

Полученные результаты и их обсуждение

Обработка отверстий двузубым инструментом на этапах обработки сверло-зенкер. Материал Сталь 20. Результаты измерения увода оси отверстия представлены в виде гистограмм (рис. 2-5).

Первым этапом были получены отверстия в заготовках диаметром 2,5 мм двузубым цилиндрическим спиральным сверлом. Результаты измерений представлены на гистограмме на рис. 2. Расчет увода оси производился по разработанной математической модели для двузубых сверл.

По результатам гистограммы на рис. 2 видно, что значения измеренного увода оси не превышают расчетного (допустимых). Это было сделано для обеспечения как можно более лучших условий для последующего зенкерования, то есть увод оси был сведен к минимуму.

Далее была произведена обработка отверстия зенкерами диаметром 3 мм. Была обработана партия заготовок в количестве 15 шт. симметрично заточенным двузубым зенкером и партия заготовок в количестве 15 шт. дисимметрично заточенным зенкером. Предварительно был произведен расчет увода оси по разработанной математической модели. Результаты измерений после зенкерования представлены на рис. 3.

По результатам измерений можно сделать вывод, что при обработке отверстий симметрично заточенным зенкером наблюдается 25% брака даже при использовании расчетной математической модели, в то время как при использовании дисимметрично заточенного режущего инструмента брак в партии отсутствует.

Рассмотрим аналогичное получение отверстия диаметром 6 мм – максимальный диаметр, при котором используются двузубые зенкера. Результаты измерений отверстий после сверления и последующего зенкерования представлены в виде гистограмм на рис. 4 и 5 соответственно.

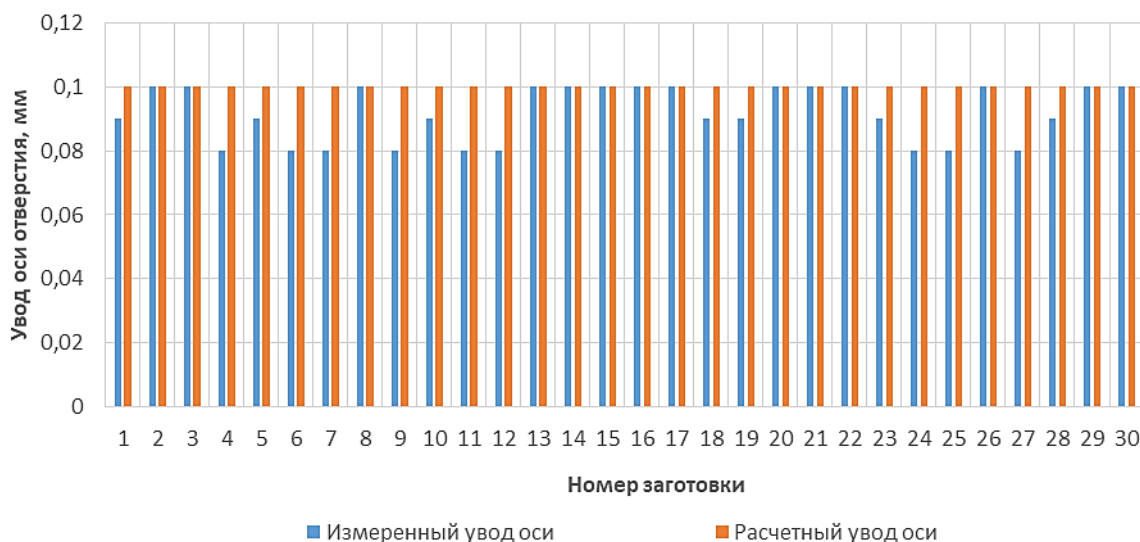


Рис. 2. Результаты измерений увода оси отверстия после сверления сверлом диаметром 2,5 мм (сталь 20)
 Fig. 2. Measurement results of the hole axis deflection after drilling with a drill, 2.5 mm in diameter (steel 20)

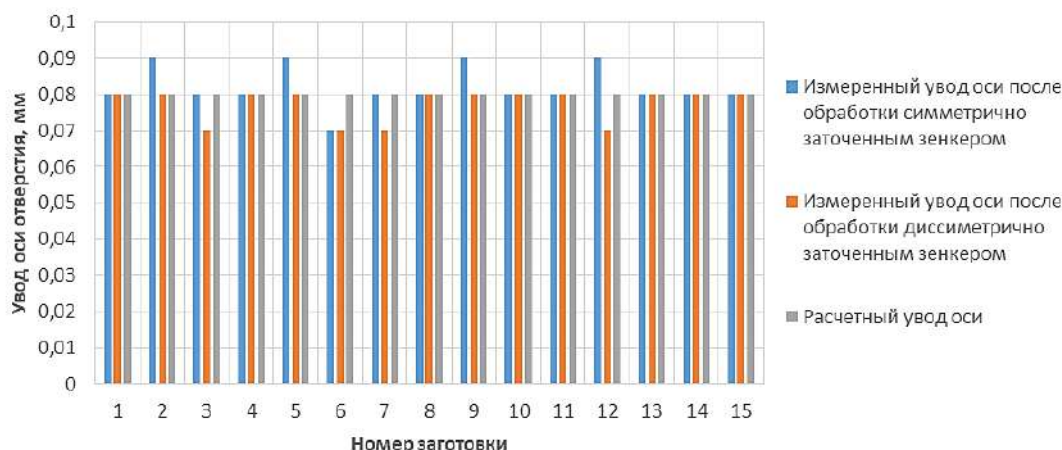


Рис. 3. Гистограмма расчетных и измеренных значений после обработки отверстия симметрично заточенным зенкером и измеренных значений увода оси отверстия после обработки диссимметрично заточенным зенкером (сталь 20)

Fig. 3. Histogram of calculated and measured values after hole machining with a symmetrically sharpened countersink and measured values of the hole axis deflection after machining with a dissymmetrically sharpened countersink (steel 20)

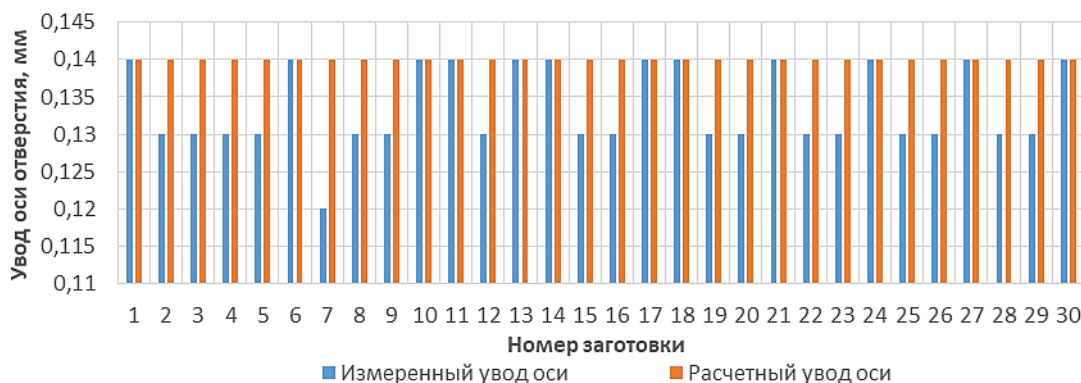


Рис. 4. Результаты измерений увода оси отверстия после сверления сверлом диаметром 2,5 мм (сталь 20)

Fig. 4. Measurement results of the hole axis deflection after drilling with a drill, 2.5 mm in diameter (steel 20)

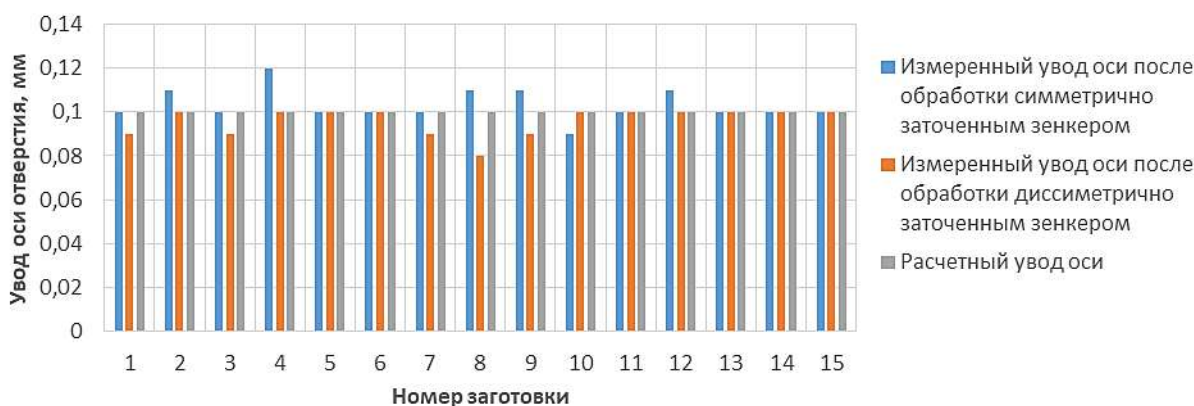


Рис. 5. Гистограмма расчетных и измеренных значений после обработки отверстия симметрично заточенным зенкером и измеренных значений увода оси отверстия после обработки диссимметрично заточенным зенкером (сталь 20)

Fig. 5. Histogram of calculated and measured values after hole machining with a symmetrically sharpened countersink and measured values of the hole axis deflection after machining with a dissymmetrically sharpened countersink (steel 20)

По результатам измерений можно сделать вывод, что при обработке отверстий симметрично заточенным зенкером наблюдается 33% брака даже при использовании расчетной математической модели, в то время как при использовании дисимметрично заточенного режущего инструмента брак в партии отсутствует.

Аналогично были проведены эксперименты с материалами сталей 12X18H10T и ШХ15, результаты которых представлены в виде гистограмм на **рис. 6-13**.

Результаты по эксперименту при обработке отверстий в материале сталь 12X18H10T представлены на **рис. 6-9**.

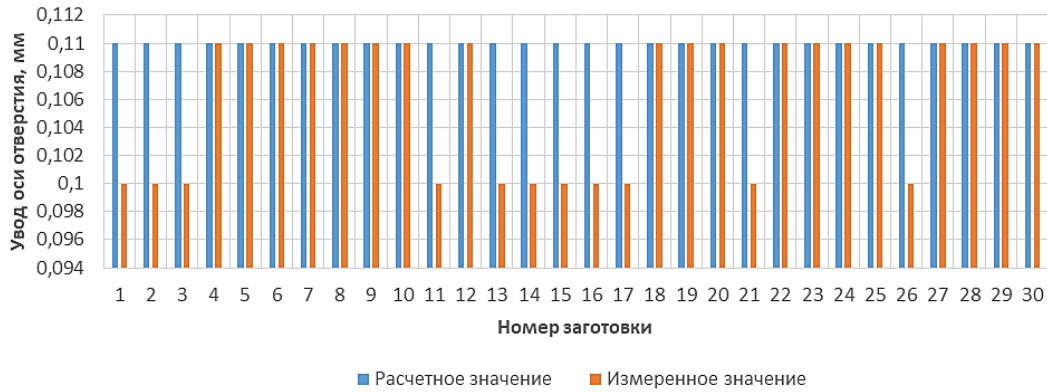


Рис. 6. Результаты измерений увода оси отверстия после сверления сверлом диаметром 2,5 мм (сталь 12X18H10T)

Fig. 6. Measurement results of the hole axis deflection after drilling with a drill, 2.5 mm in diameter (steel 12X18H10T)

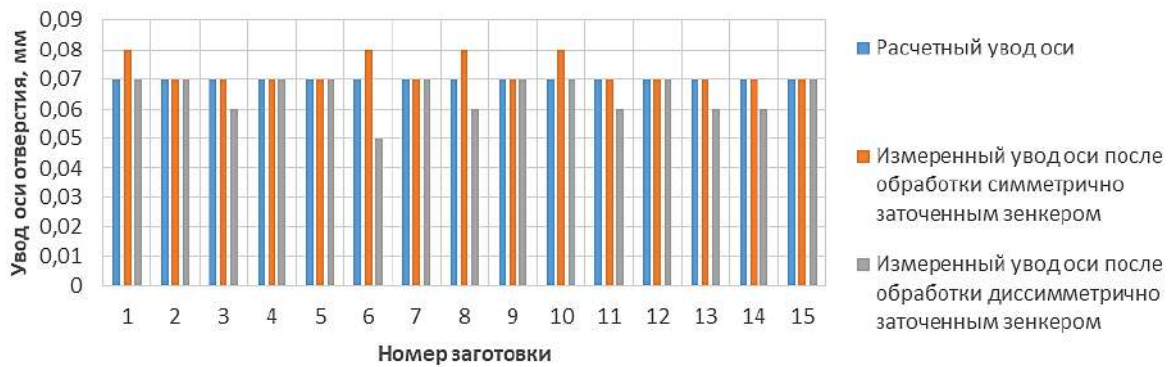


Рис. 7. Гистограмма расчетных и измеренных значений после обработки отверстия симметрично заточенным зенкером и измеренных значений увода оси отверстия после обработки дисимметрично заточенным зенкером (сталь 12X18H10T)

Fig. 7. Histogram of calculated and measured values after hole machining with a symmetrically sharpened countersink and measured values of the hole axis deflection after machining with a dissymmetrically sharpened countersink (steel 12X18H10T)

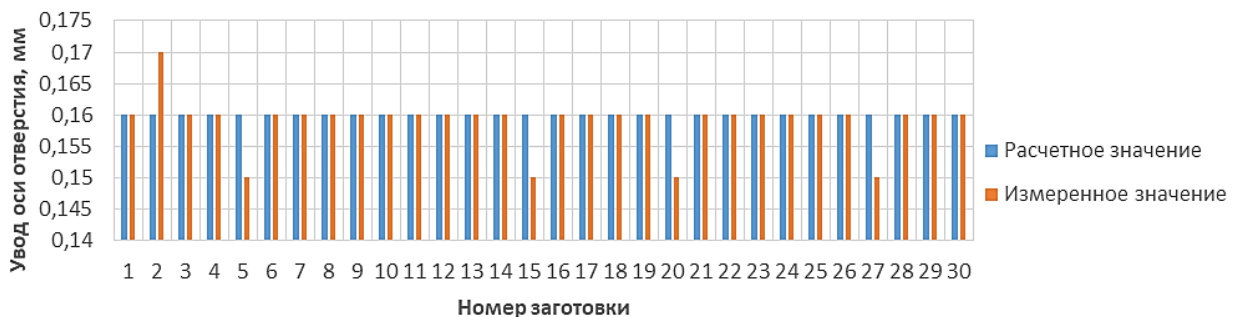


Рис. 8. Результаты измерений увода оси отверстия после сверления сверлом диаметром 5 мм (сталь 12X18H10T)

Fig. 8. Measurement results of the hole axis deflection after drilling with a drill, 5 mm in diameter (steel 12X18H10T)

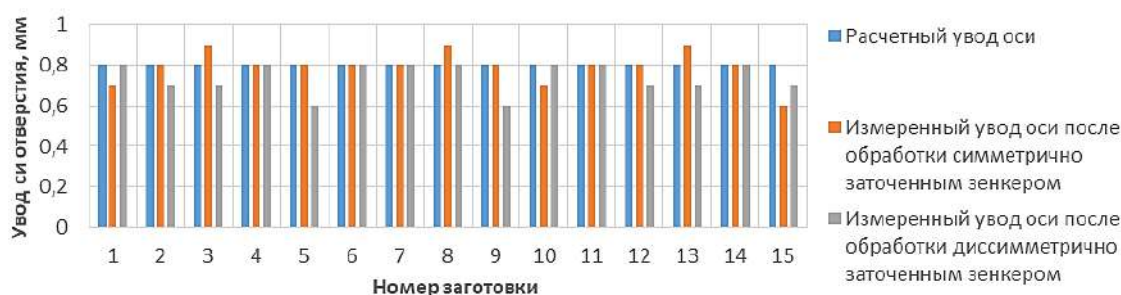


Рис. 9. Гистограмма расчетных и измеренных значений после обработки отверстия симметрично заточенным зенкером и измеренных значений увода оси отверстия после обработки диссимметрично заточенным зенкером (сталь 12Х18Н10Т)

Fig. 9. Histogram of calculated and measured values after hole machining with a symmetrically sharpened countersink and measured values of the hole axis deflection after machining with a asymmetrically sharpened countersink (steel 12X18H10T)

Как и при обработке стали 20, при обработке материала из стали 12Х18Н10Т диссимметрично заточенный зенкер позволяет получить партии заготовок без брака, а использование симметрично заточенного режущего инструмента дает брак 25% при обработке отверстия диаметром 3 мм и 20% – диаметром 6 мм.

Результаты по эксперименту при обработке отверстий в материале ШХ15 представлены в виде гистограмм на рис. 10-13.

При обработке материала из стали ШХ15 ди-

симметрично заточенный зенкер позволяет получить партии заготовок без брака, а использование симметрично заточенного режущего инструмента дает брак 20% при обработке отверстия диаметром 3 мм и 22% – диаметром 6 мм.

Исходя из полученных измерений обработанных отверстий, можно сказать, что повышение точности обработки при использовании диссимметрично заточенного режущего инструмента характерно и для двузубых зенкеров.



Рис. 10. Результаты измерений увода оси отверстия после сверления сверлом диаметром 2,5 мм (сталь ШХ15)

Fig. 10. Measurement results of the hole axis deflection after drilling with a drill, 2.5 mm in diameter (steel ШХ15)

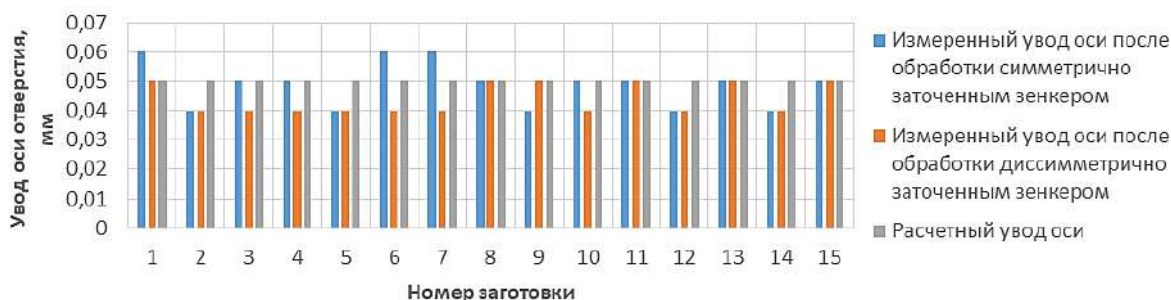


Рис. 11. Гистограмма расчетных и измеренных значений после обработки отверстия симметрично заточенным зенкером и измеренных значений увода оси отверстия после обработки диссимметрично заточенным зенкером (сталь ШХ15)

Fig. 11. Histogram of calculated and measured values after hole machining with a symmetrically sharpened countersink and measured values of the hole axis deflection after machining with a dissymmetrically sharpened countersink (steel ШХ15)



Рис. 12. Результаты измерений увода оси отверстия после сверления сверлом диаметром 5 мм (сталь ШХ15)
 Fig. 12. Measurement results of the hole axis deflection after drilling with a drill, 5 mm in diameter (steel ШХ15)

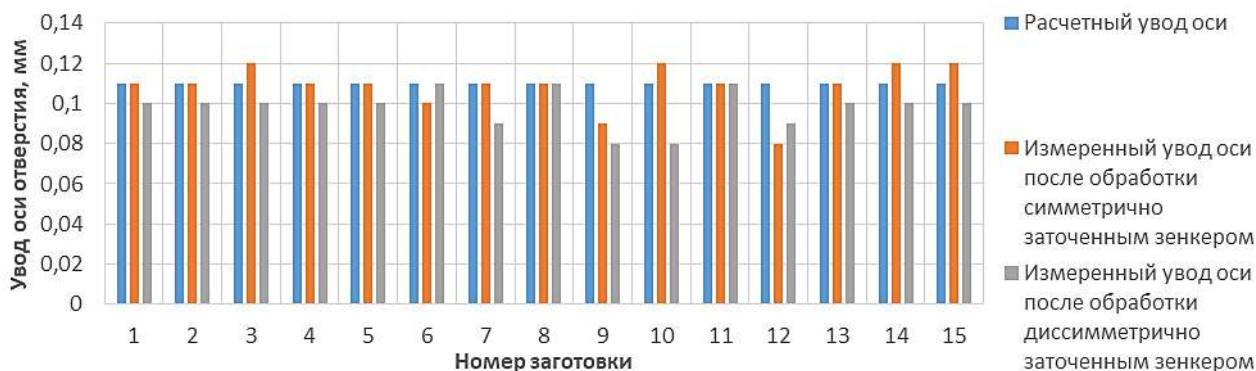


Рис. 13. Гистограмма расчетных и измеренных значений после обработки отверстия симметрично заточенным зенкером и измеренных значений увода оси отверстия после обработки диссимметрично заточенным зенкером (сталь ШХ15)
 Fig. 13. Histogram of calculated and measured values after hole machining with a symmetrically sharpened countersink and measured values of the hole axis deflection after machining with a dissymmetrically sharpened countersink (steel ШХ15)

Заключение

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований показал адекватность разработанной математической модели расчета увода оси отверстия при обработке двузубым монолитным зенкером, а также подтвердил, что применение диссимметрично заточенного инструмента позволяет добиваться необходимой точности расположения оси отверстий.

Список источников

1. Аверченков В.И., Васильев А.С., Хейфец М.Л. Технологическая наследственность при формировании качества изготавливаемых деталей // Научные технологии в машиностроении. 2018. №10. С. 27-32.
2. Баранов А.В., Карачев А.В. Определение технологической наследственности при обработке отверстий в деталях газотурбинных двигателей // Вестник машиностроения. 2021. №11. С. 37-42.
3. К вопросу об учете технологической наследственности при формировании свойств деталей / Гордеева Э.С., Богущкий В.Б., Шрон Л.Б., Ново-

- селов Ю.К. // Механики XXI века. 2018. №17. С. 248-254.
4. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / Дальский А.М., Базаров Б.М., Васильев А.С. и др.; под ред. А.М. Дальского. М.: Изд-во МАИ, 2000. 364 с.
5. Дерябин И.П. Методология параметрического проектирования многопереходной обработки круглых отверстий концевыми мерными инструментами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / И.П. Дерябин. Челябинск, 2009.
6. Дерябин И.П., Гузеев В.И., Кожарина О.А. Исследования наследования погрешностей расположения осей отверстий при многопереходной обработке // Технология машиностроения. 2008. №6. С. 23-25.
7. Дерябин И.П., Козлов А.В. Исследование процессов формообразования отверстий мерными инструментами: монография. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006.
8. Емельянов С.Г., Зубкова О.С., Мержоева М.С. Эффективность использования сборных зенкеров

- со сменными многогранными пластинами // Вестник машиностроения. 2003. №12. С. 60-61.
9. Зайцев А.В., Колупаев Н.А. Методика расчета отклонений оси инструмента при обработке отверстий малого диаметра // Главный механик. 2020. № 11. С. 24-30.
 10. Расторгуев Г.А. Особенности технологического наследования в машиностроительном производстве // Справочник. Инженерный журнал. 2013. №9 (198). С. 8-17.
 11. Токарев А.С., Дерябин И.П., Лопатин Б.А. Экспериментальное определение увода оси отверстий при обработке зенкером с МНП // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2020. Т. 20. №1. С. 55-62.
5. Deryabin I.P. *Metodologiya parametricheskogo proektirovaniya mnogoperekhodnoy obrabotki kruglykh otverstiy kontsevymi mernymi instrumentami: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Methodology of parametric design of multi-pass machining of round holes with end measuring tools. Extended abstract of the doctoral]. Chelyabinsk, 2009. (In Russ.)
 6. Deryabin I.P., Guzeev V.I., Kozharina O.A. Studies on inheritance of errors in the location of hole axes during multi-pass machining. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Mechanical Engineering Technology]. 2008;(6):23-25. (In Russ.)
 7. Deryabin I.P., Kozlov A.V. *Issledovanie protsessov formoobrazovaniya otverstiy mernymi instrumentami: monografiya* [Investigation of the processes of forming holes with measuring instruments: monograph]. Chelyabinsk: South Ural State University, 2006. (In Russ.)
 8. Emelyanov S.G., Zubkova O.S., Merzhoeva M.S. Efficiency of using prefabricated countersinks with replaceable polyhedral plates. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering]. 2003;(12):60-61. (In Russ.)
 9. Zaitsev A.V., Kolupaev N.A. Methodology for calculating tool axis deviations during machining of small diameter holes. *Glavnyi mekhanik* [Chief Mechanical Engineer]. 2020;(11):24-30. (In Russ.)
 10. Rastorguev G.A. Features of technological inheritance in machine-building production. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. Engineering Journal]. 2013;(9(198)):8-17. (In Russ.)
 11. Tokarev A.S., Deryabin I.P., Lopatin B.A. Experimental determination of the hole axis deflection, when machining with countersinks with indexable disposable inserts. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie»* [Bulletin of SUSU. Series: Mechanical Engineering]. 2020;20(1):55-62. (In Russ.)

References

1. Averchenkov V.I., Vasiliev A.S., Kheifets M.L. Technological heredity in the formation of the quality of manufactured parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2018;(10):27-32. (In Russ.)
2. Baranov A.V., Karachev A.V. Determination of technological heredity in machining of holes in gas turbine engine parts. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering]. 2021;(11):37-42. (In Russ.)
3. Gordeeva E.S., Bogutsky V.B., Shron L.B., Novoselov Yu.K. On the issue of factoring into technological heredity in the formation of the properties of parts. *Mekhaniki XXI veku* [Mechanical Engineers to the 21st century]. 2018;(17):248-254. (In Russ.)
4. Dalsky A.M., Bazarov B.M., Vasiliev A.S. et al. *Tekhnologicheskaya nasledstvennost v mashinostroitel'nom proizvodstve* [Technological heredity in machine-building production]. Moscow: Publishing House of Moscow Aviation Institute, 2000, 364 p. (In Russ.)

Поступила 01.02.2024; принята к публикации 26.02.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 01/02/2024; revised 26/02/2024; published 27/06/2024

Дерябин Игорь Петрович – доктор технических наук, профессор,
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: derigp@gmail.com.

Токарев Артем Сергеевич – кандидат технических наук, доцент,
Трехгорный технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (ТТИ НИЯУ «МИФИ»), Трехгорный, Россия. Email: Tokarev_a_s91@mail.ru.

Igor P. Deryabin – DrSc (Eng.), Professor, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: derigp@gmail.com.

Artem S. Tokarev – PhD (Eng.), Associate Professor, Trekhgorny Technological Institute – branch of National Research Nuclear University MEPHI (TTI NRNU MEPHI), Trekhgorny, Russia.
Email: Tokarev_a_s91@mail.ru.



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.73
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-120-127

ПОЛУЧЕНИЕ ГИБРИДНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ОТ4-1 ГОРЯЧЕЙ ОСАДКОЙ С КРУЧЕНИЕМ

Петров П.А.¹, Бурлаков И.А.^{1,2}, Нгуен Хань Тоан¹, Во Фан Тхань Дат¹

¹ Московский политехнический университет, Москва, Россия

² Производственный комплекс «Салют» АО «ОДК», Москва, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены результаты экспериментального исследования качества соединения двух однородных заготовок, изготовленных из титанового сплава ОТ4-1. С применением метода осадки с кручением получено неразъемное соединение за счет пластической деформации. Соединение обеспечивается при температуре 600°C. Условием формирования соединения между заготовками является отсутствие проскальзывания между торцом каждой заготовки и инструментом. Осадка с кручением выполнена на модернизированном гидравлическом прессе модели ДБ-2432 силой 1,6 МН. Приведены результаты натуральных экспериментов по формообразованию гибридной заготовки из титанового сплава ОТ4-1, а также результаты компьютерного моделирования осадки с кручением гибридной заготовки, показана зависимость относительного удлинения образцов сплава от температуры и распределение микротвердости по сечению гибридного образца после осадки с кручением при выбранном режиме деформирования. Натурные эксперименты, выполненные по разным режимам, позволили выбрать режим формообразования осадкой с кручением гибридной заготовки. Выбранный режим характеризуется деформированием пакета из двух заготовок при температуре 600°C в штампе, подогретом до 300°C. Установлено, что выбранный режим формообразования с нагревом заготовок и подогревом штампового инструмента обеспечивает надежное соединение заготовок с высоким качеством. Для подтверждения качества соединения двух однородных образцов сплава ОТ4-1 выполнено металлографическое исследование. Результаты металлографии, полученные при увеличении $\times 2500$ и $\times 5000$ зоны соединения, подтверждают надежность сформированного соединения. Полученные результаты могут быть применены при разработке методики проектирования технологического процесса горячей объемной штамповки поковок из гибридной заготовки.

Ключевые слова: титановый сплав ОТ4-1, гибридные заготовки, осадка с кручением, формообразование с нагревом, микроструктуры, неразъемное соединение пластической деформацией

© Петров П.А., Бурлаков И.А., Нгуен Хань Тоан, Во Фан Тхань Дат, 2024

Для цитирования

Получение гибридных заготовок из титанового сплава ОТ4-1 горячей осадкой с кручением / Петров П.А., Бурлаков И.А., Нгуен Хань Тоан, Во Фан Тхань Дат // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 120-127. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-120-127>



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

PRODUCING HYBRID WORKPIECES FROM TITANIUM ALLOY OT4-1 BY HOT UPSETTING WITH TORSION

Petrov P.A.¹, Burlakov I.A.^{1,2}, Nguyen Khanh Toan¹, Vo Phan Thanh Dat¹

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 on the quality of joining two homogeneous workpieces made of titanium alloy OT4-1. Using the method of upsetting with torsion, a permanent joint was achieved due to plastic deformation. Joining is ensured at a temperature of 600°C. The condition for forming the connection between the workpieces is no sliding between the end of each workpiece and the die. Upsetting with torsion was carried out using a modernized hydraulic press model DB-2432 with a force of 1.6 MN. The article contains results of full-scale experiments on the formation of a hybrid workpiece from titanium alloy OT4-1, as well as the results of computer simulation of upsetting with torsion of the hybrid workpiece, the dependence between relative elongation of alloy samples and temperature, and the distribution of microhardness over the cross section of the hybrid sample after upsetting with torsion in the selected deformation mode. The full-scale experiments carried out in different modes contributed to selecting the mode of forming the hybrid workpiece by upsetting with torsion. The selected mode is characterized by the deformation of a package of two workpieces at a temperature of 600°C between the dies heated to 300°C. It has been established that the selected forming mode with heating of workpieces and heating of the forging tool ensures a reliable joining of workpieces with a high quality. To verify the quality of the joining of two homogeneous samples of the OT4-1 alloy, the authors performed a metallographic study. The metallographic results obtained at magnifications of $\times 2500$ and $\times 5000$ of the joint area confirm reliability of the formed joint. The results obtained can be applied in developing a methodology for designing a technological process for hot die forging of forgings from a hybrid workpiece.

Keywords: titanium alloy OT4-1, hybrid workpieces, upsetting with torsion, forming with heating, microstructures, permanent joint due to plastic deformation

For citation

Petrov P.A., Burlakov I.A., Nguyen Khanh Toan, Vo Phan Thanh Dat. Producing Hybrid Workpieces from Titanium Alloy OT4-1 by Hot Upsetting with Torsion. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 120-127. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-120-127>

Введение

В промышленности в последнее время начинают широко применять так называемые гибридные заготовки, представляющие собой металлический лист, изготовленный из однородных либо разнородных материалов, отличающихся по прочности, маркам и толщине. Использование таких заготовок дает возможность учесть особенности работы готовой детали и, как следствие, такого подхода получать облегченные и экономичные детали. Существует ряд методов получения гибридных заготовок, таких как сварка лазерным лучом [1, 2], электронно-лучевая сварка [3], электродная сварка [4, 5] и сварка трением с перемешиванием (Friction-Stir Welding, FSW) [5-7]. Каждый из упомянутых методов имеет свои преимущества и недостатки.

Одной из малоизученных технологий пластического формоизменения, позволяющей изготавливать тонкостенные осесимметричные поковки, является штамповка (осадка) с кручением [8, 9]. Суть процесса заключается в формообразовании гибридной заготовки вращающимися друг относительно друга бойками. Ось вращения бойков совпадает с осью осаживаемой

заготовки. За счет сил трения на контактной поверхности крутящий момент передается деформируемым заготовкам и производит их диффузионное соединение. В результате приложения к заготовке наряду с осевой силой крутящего момента возникает сложная схема напряженно-деформированного состояния, обеспечивающая, как показали металлографические исследования, практически 100%-й контакт свариваемых заготовок [10]. Анализ отечественной и зарубежной информации позволил установить, что многие технологические важные параметры процесса осадки с кручением недостаточно изучены. В частности, отсутствуют данные о возможности формообразования гибридных заготовок из титановых сплавов, в частности сплава OT4-1, характеризующегося относительно низкими пластическими свойствами.

Целью настоящей работы являлось получение надежного соединения заготовок из титанового сплава OT4-1 осадкой с кручением с изучением микроструктуры в зоне их контакта. Для достижения поставленной цели необходимо было выбрать исследуемый материал, определить распределение температуры в процессе деформации, найти зависимость относительного

удлинения образцов из сплава ОТ4-1 от температуры, определить рациональный режим нагрева заготовок и инструмента, определить свойства полученных гибридных заготовок методом изучения микроструктуры образцов в меридиональном сечении.

Материалы и методы исследования

В качестве исследуемого материала был выбран титановый сплав ОТ4-1. Образцы для исследования выбраны следующих размеров: 1) диаметр (D_0) 18 мм и высота (H_0) 18 мм; 2) диаметр 40 мм и высота 10 мм. Все образцы были изготовлены методом электроэрозионной резки. Соотношение $\lambda = H_0 / D_0$ у исходных образцов различно и составляло соответственно: 1) $\lambda = 1,0$; 2) $\lambda = 0,25$.

Пакет из двух образцов собирался в соответствии со схемой, показанной на рис. 1. За счет осевой нагрузки P обеспечивается уменьшение высоты заготовки и увеличение её диаметра; за счет радиальной нагрузки – крутящего момента M – дополнительное увеличение диаметра заготовки. В результате на поверхности контакта двух исходных заготовок (поверхность А) (см. рис. 1) происходит формирование неразъемного соединения пластической деформацией. Для предотвращения проскальзывания на контактной поверхности инструмента с торцом каждой заготовки в пакете начальное значение силы P установлено равным 0,8 МН (≈ 160 атм).

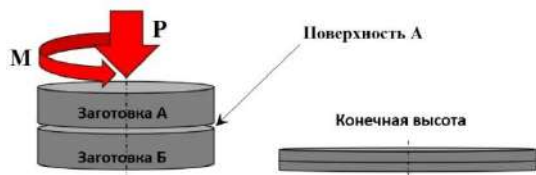


Рис. 1. Схема процесса осадки с кручением составной заготовки

Fig. 1. Scheme of upsetting hybrid workpiece with torsion

Осадку пакета из двух образцов с кручением осуществляли на модернизированном гидравлическом прессе модели ДБ-2432 силой 1,6 МН со скоростью осевого перемещения пуансона 1 мм/с при частоте его вращения 12 об/мин [8]. Соотношение $\lambda_n = H_n / D_n$ пакетов, полученных после совмещения заготовок до начала осадки с кручением, составляло соответственно: 1) $\lambda_n = 0,72$; 2) $\lambda_n = 0,5$. В зависимости от температуры нагрева пакета и инструмента, а также соотношения исходных размеров заготовок (λ), составляющих пакет, его деформация выполнялась до размера 2,79 и 5,2 мм.

Контактные поверхности образцов перед деформацией тщательно зачищались и протирались спиртом. Для изучения микроструктуры и микротвердости осажённые образцы разрезались в меридиональной плоскости с применением метода электроэрозии и исследовались с применением бинокулярного микроскопа «Olympus Delta» с увеличением $\times 100$, $\times 500$, $\times 1000$ и $\times 2500$ и твердомера «DuraScan 20» и электронного микроскопа «FEI Quanta 650» с увеличением $\times 5000$. Замеры микротвердости по Виккерсу были проведены на приборе «LEICA МНТ-10» с нагрузкой на индентор 100 г.

Экспериментальные исследования

В натурном эксперименте исследовано несколько режимов, позволивших выбрать рациональный для формирования неразъемного соединения между заготовками по схеме осадки с кручением (см. рис. 1). В процессе деформации пакета из двух заготовок диаметром 40 мм и высотой 10 мм каждая ($\lambda = 0,25$, $\lambda_n = 0,5$), выполненной при комнатной температуре с применением холодного инструмента, произошло разрушение заготовок в периферийной области (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Заготовка из титанового сплава ОТ4-1 до (а) и после (б) осадки с кручением при комнатной температуре (толщина пакета 5,2 мм)

Fig. 2. The workpiece from titanium alloy ОТ4-1 before (а) and after (б) upsetting with torsion at room temperature (package thickness is 5.2 mm)

В процессе деформации пакета из двух заготовок диаметром 18 мм и высотой 18 мм каждая ($\lambda = 1,00$, $\lambda_{п} = 0,72$), выполненной при температуре 600°C с применением нижнего инструмента (неподвижного), подогретого до температуры 300°C, сформирована составная заготовка толщиной 2,79 мм (рис. 3). В этом случае до выполнения сжатия с кручением исходные заготовки диаметром 18 мм и высотой 18 мм

предварительно осаживались между плоскими плитами при температуре 600°C (рис. 3, а). Каждая из заготовок сжималась до высоты ≈ 9 мм.

Для изучения микроструктуры полученные заготовки разрезались в меридиональной плоскости методом электроэрозии. Результат представлен на рис. 4. Видно, что несмотря на разрушение в крае, есть соединение в центре зоны соединения.



а



б

Рис. 3. Заготовка из титанового сплава ОТ4-1 до (а) и после (б) осадки с кручением при температуре 600°C
Fig. 3. The workpiece from titanium alloy OT4-1 before (a) and after (б) upsetting with torsion at 600°C



а



б

Рис. 4. Микроструктура гибридного образца из сплава ОТ4-1 в центре зоны соединения с увеличением $\times 100$ (а) и $\times 500$ (б)
Fig. 4. Microstructure of a hybrid sample from the OT4-1 alloy in the center of the joint zone magnified at $\times 100$ (a) and $\times 500$ (б)

Титановый сплав ОТ4-1 относится к группе сплавов повышенной пластичности, однако при комнатной температуре она редко превышает 20%. Как видно из графика зависимости относительного удлинения образцов из сплава ОТ4-1, полученного анализом литературных и собственных данных (рис. 5), пластичность материала начинает резко увеличиваться при 600°C и выше. Поэтому пакет из двух исходных заготовок предварительно нагревали в печи до 650°C с учетом падения температуры при переносе заготовок в штамп, подогретый до температуры 300°C. При этом в начальный момент контакта верхнего инструмента с верхней заготовкой создавалось давление, эквивалент-

ное силе 1 МН, что обеспечивало отсутствие проскальзывания между торцом каждой заготовки и инструментом (верхним вращающимся и нижним неподвижным).

Осадка в рассмотренных условиях позволила получить заготовки с хорошим качеством соединения (рис. 6).

Если исходная заготовка имела равноосные α-зерна размером 10-15 мкм (рис. 7), то, как видно на рис. 8, в зоне контакта наблюдается интенсивное измельчение зерен, и структура представляет собой механическую смесь, вблизи зоны контакта микроструктура начинает укрупняться и постепенно переходит в структуру основного материала.

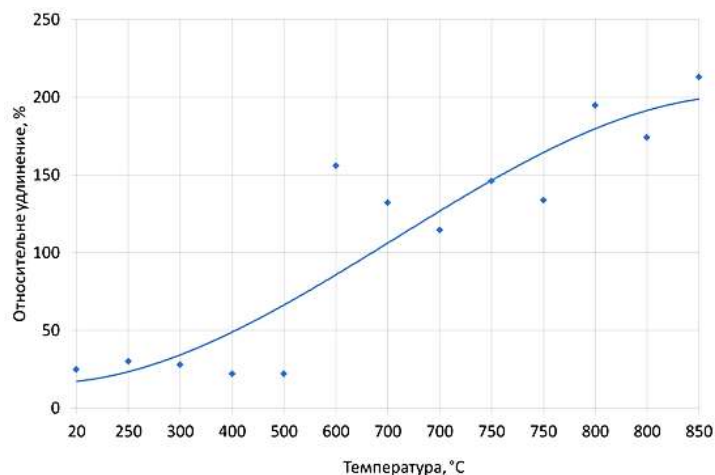


Рис. 5. Зависимость относительного удлинения образцов из сплава ОТ4-1 от температуры
 Fig. 5. The dependence between relative elongation of the samples from alloy OT4-1 and temperature

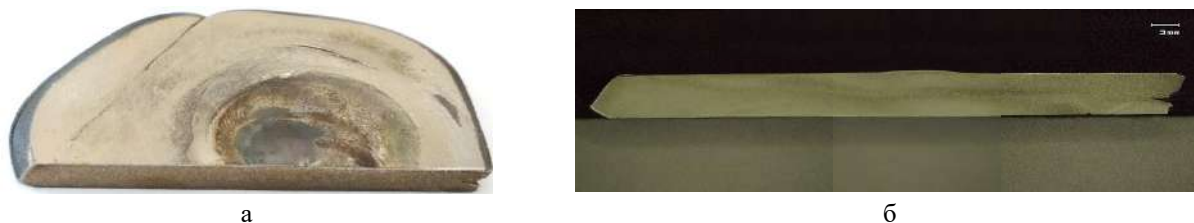


Рис. 6. Гибридная заготовка (половина от целой) из сплава ОТ4-1, полученная осадкой с кручением (а) при температуре заготовок 600°C и скорости вращения верхнего инструмента 12 об/мин и ее сечение (б)
 Fig. 6. The hybrid workpiece (half of a full one) from alloy OT4-1 produced by upsetting with torsion (a) at 600°C and an upper die velocity of 12 rpm and its cross section (б)



Рис. 7. Структура исходного образца сплава ОТ4-1 при температуре 20°C до нагрева под проведение осадки с кручением, увеличение ×100
 Fig. 7. The structure of the initial sample of alloy OT4-1 at 20°C before its heating for upsetting with torsion, ×100 magnification

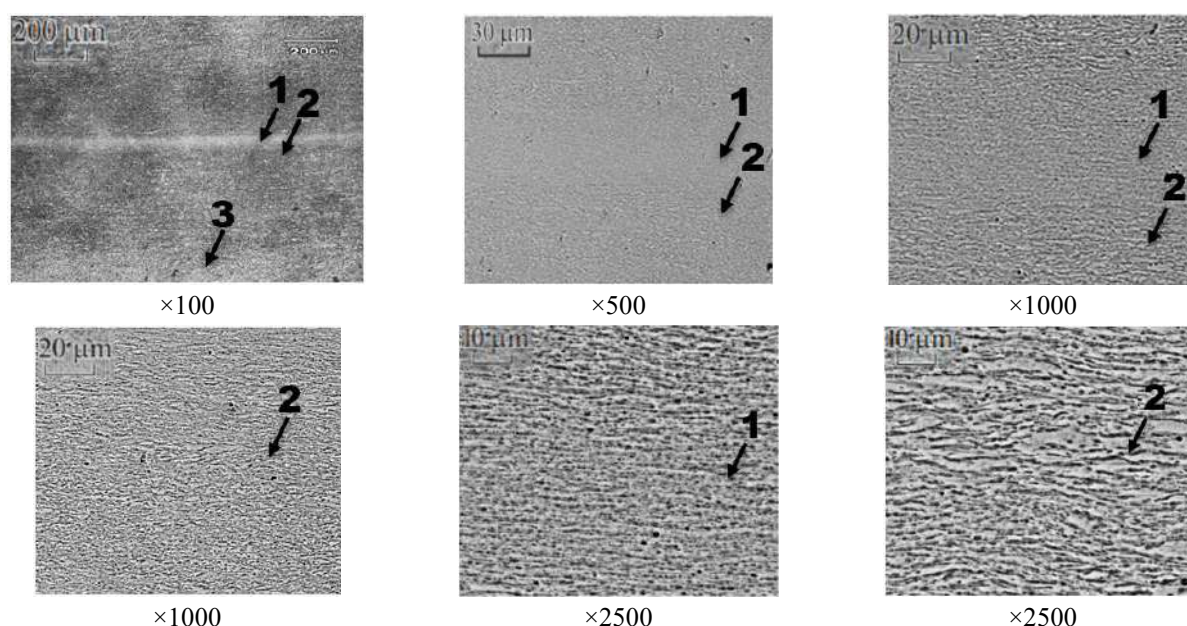


Рис. 8. Микроструктура в меридиональном сечении гибридного образца из сплава ОТ4-1 после его осадки с кручением при температуре 600°C и скорости вращения верхнего инструмента 12 об/мин:

1 – зона соединения; 2 – вблизи зоны соединения; 3 – зона основного металла

Fig. 8. Microstructure in the meridional section of the hybrid sample from the OT4-1 alloy produced by upsetting with torsion at 600°C and an upper die velocity of 12 rpm: 1 is a joining zone; 2 is near the joining zone; 3 is a base metal zone

Металлографическое исследование зоны соединения на электронном микроскопе указывает на отсутствие различия микроструктуры вблизи зоны контакта и в зоне соединения, что подтверждает его высокое качество (рис. 9).

Изучение влияния осадки с кручением на изменение микротвердости по Виккерсу проведено для центральной части гибридного образца (рис. 10, а). Результаты металлографического исследования показали, что микротвердость незначительно изменяется по высоте образца. Замер микротвердости проводился от поверхности к сердцевине образца, в которой расположена зона соединения (см. рис. 8, ×100). Шаг замера микротвердости от поверхности к сердцевине образца составил 0,2 мм. Наблюдается незначительное повышение значения микротвердости у поверхности и в центральной зоне (рис. 10, б).

Закключение

1. Настоящая работа показала, что использование горячего формоизменения позволяет существенно расширить область применения процесса осадки с кручением за счет применения ее для пластической обработки труднодеформируемых материалов.

2. Применение найденной зависимости относительного удлинения образцов из сплава ОТ4-1 от температуры позволило определить температурный режим нагрева заготовок и инструмента и получить гибридные заготовки из титанового сплава ОТ4-1 с хорошим качеством соединения, подтвержденное исследованием микроструктуры в меридиональном сечении образца.

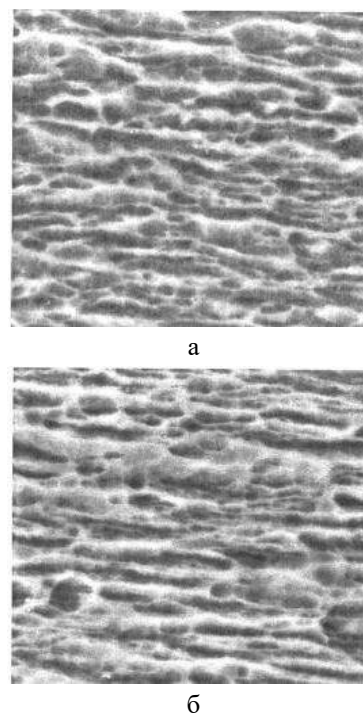
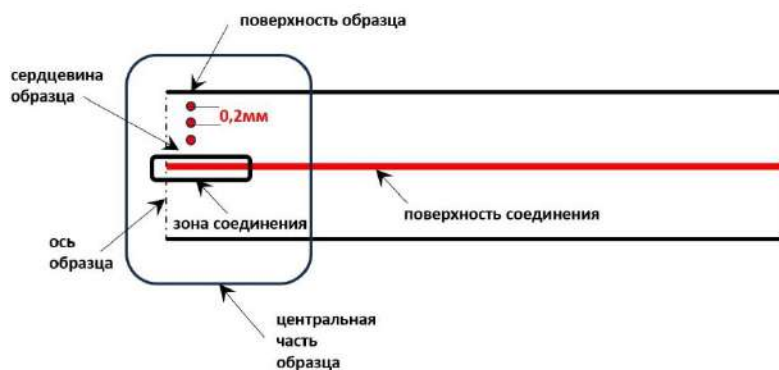
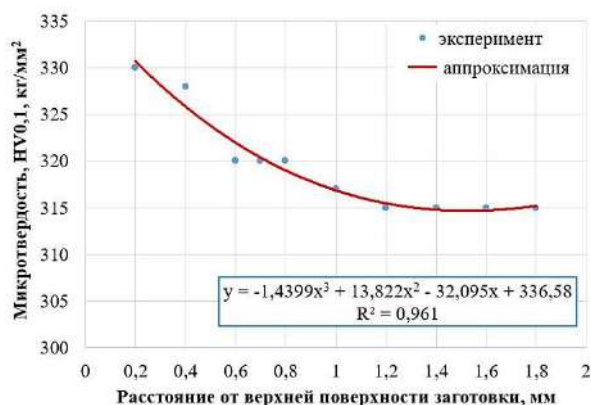


Рис. 9. Микроструктура зоны соединения (а) и вблизи соединения (б) (см. зоны 1 и 2 на рис. 8, ×100) в гибридном образце, полученная на электронном микроскопе, ×5000

Fig. 9. Microstructure of the joining zone (a) and near the joining zone (б) (see zone 1 and 2 in Fig. 8, ×100) in the hybrid sample obtained with SEM, ×5000



а



б

Рис. 10. Распределение микротвердости по толщине гибридного образца в центральной зоне (а) и график распределения микротвердости (б)
 Fig. 10. Distribution of microhardness over thickness of the hybrid sample in the central zone (a) and the microhardness distribution curve (b)

Список источников

1. Xiao Rongshi, Zhang Xinyi. Problems and issues in laser beam welding of aluminum-lithium alloys // Journal of Manufacturing Processes. 2014, vol. 16, no. 2, pp. 166-175.
2. Kashaev N., Ventzke V., Çam G. Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications // Journal of Manufacturing Processes. 2018, vol. 36, pp. 571-600.
3. Slobodyan M. Resistance, electron- and laser-beam welding of zirconium alloys for nuclear applications: A review, Nuclear Engineering and Technology. 2021, vol. 53, iss. 4, pp. 1049-1078. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.005>.
4. Kang Zhou, Ping Yao. Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019, vol. 124, no. 1, pp. 170-198.
5. Singh V.P., Patel S.K., Ranjan A., Kuriachen B. Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium-magnesium alloys: a critical review // Journal of Materials Research and Technology. 2020, vol. 9, no. 3, pp. 6217-6256.
6. Fengxiang Xu, Guangyong Sun, Guangyao Li, Qing

- Li, Experimental investigation on high strength steel (HSS) tailor-welded blanks (TWBs) // Journal of Materials Processing Technology. 2014, vol. 214, pp. 925-935.
7. Joining by plastic deformation / Mori K., Bay N., Fratini L., Micari F., Tekkaya A.E. // CIRP Annals. 2013, vol. 62, no. 2, pp. 673-694.
8. Штамповка с кручением: монография / Субич В.Н., Демин В.А., Шестаков Н.А., Власов А.В. М.: МГИУ, 2008. 389 с.
9. Носков Ф.М., Квеглис Л.И., Лесков М.Б. Структурообразование в зоне контакта металлов при совместной пластической деформации: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. 200 с.
10. Петров П.А., Бурлаков И.А., Нгуен Хань Тоан. Перспективы применения гибридных заготовок в машиностроении // Технология металлов. 2021. №8. С. 10-23.

References

1. Xiao Rongshi, Zhang Xinyi. Problems and issues in laser beam welding of aluminum-lithium alloys. Journal of Manufacturing Processes. 2014;16(2):166-175.
2. Kashaev N., Ventzke V., Çam G. Prospects of laser

- beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;36:571-600.
- Slobodyan M. Resistance, electron- and laser-beam welding of zirconium alloys for nuclear applications: A review. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021;53(4):1049-1078. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.10.005>
 - Kang Zhou, Ping Yao. Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019;124(1):170-198.
 - Singh V.P., Patel S.K., Ranjan A., Kuriachen B. Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium-magnesium alloys: a critical review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(3):6217-6256.
 - Fengxiang Xu, Guangyong Sun, Guangyao Li, Qing Li, Experimental investigation on high strength steel (HSS) tailor-welded blanks (TWBs). *Journal of Materials Processing Technology*. 2014;214:925-935.
 - Mori K., Bay N., Fratini L., Micari F., Tekkaya A.E. Joining by plastic deformation. *CIRP Annals*. 2013;62(2):673-694.
 - Subich V.N., Demin V.A., Shestakov N.A., Vlasov A.V. *Shtampovka s krucheniem: monografiya* [Die forging with torsion: monograph]. Moscow: Moscow State Industrial University, 2008, 389 p. (In Russ.)
 - Noskov F.M., Kveglis L.I., Leskov M.B. *Strukturoobrazovanie v zone kontakta metallov pri sovmestnoy plasticheskoy deformatsii: monografiya* [Structure formation in the contact zone of metals during joint plastic deformation: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2019, 200 p. (In Russ.)
 - Petrov P.A., Burlakov I.A., Nguyen Khanh Toan. Prospects of applying hybrid workpieces in the mechanical engineering industry. *Tekhnologiya metallov* [Technology of Metals]. 2021;(8):10-23. (In Russ.)

Поступила 05.12.2023; принята к публикации 09.03.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 05/12/2023; revised 09/03/2024; published 27/06/2024

Петров Павел Александрович – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработка материалов давлением и аддитивные технологии, Московский политехнический университет, Москва, Россия. Email: petrov_p@mail.ru.

Бурлаков Игорь Андреевич – главный специалист производственного комплекса «Салют» АО «ОДК», Москва, Россия. Email: i.burlakov@uecrus.com.

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

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

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

Igor A. Burlakov – Chief Specialist, Production Complex Salyut, JSC United Engine Corporation, Moscow, Russia. Email: i.burlakov@uecrus.com.

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

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

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.982.5
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-128-138



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОСАДКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ МОНОЛИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Пашков А.Е., Пашков А.А., Исаченко А.С., Дук А.А., Рыбак А.М.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Крупногабаритные монолитно-фрезерованные панели являются одними из наиболее сложных элементов в конструкции самолета. Совокупность больших габаритных размеров вместе с переменной кривизной на фоне малой жесткости обуславливает сложность изготовления данных деталей. В силу необходимости достижения высокой точности формы данных панелей процесс их производства также осложняется за счёт конструктивных особенностей – тонкостенности, наличия подкрепляющих ребер и малых значений кривизны, для достижения которой нужна общая деформация, соизмеримая с упругой составляющей. Результаты формообразования панелей зависят от большого количества взаимовлияющих факторов, которые, в свою очередь, влияют на формирование напряженно-деформированного состояния (НДС) и формы деталей. Одним из перспективных методов изготовления данных деталей является использование метода посадки ребер. Данный процесс широко применяется для формообразования профилей и балок. Имеющиеся публикации методик расчёта режимных параметров процесса посадки ребер монолитных панелей в настоящее время имеют малое освещение. **Цель работы.** Совершенствование методик расчёта режимных параметров обработки металлов методами локального пластического деформирования на примере посадки ребер панелей. **Используемые методы.** Конечно-элементное моделирование процесса локального пластического деформирования. **Новизна.** Концепция моделирования формообразования монолитно-фрезерованных панелей методом посадки. **Практическая значимость.** Разработанная конечно-элементная модель представляет собой входные данные для расчета режимных параметров процесса посадки ребер монолитно-фрезерованных панелей. **Результаты.** Разработана методика построения и анализа конечно-элементной модели с целью определения внутренних силовых факторов, возникающих в монолитно-фрезерованных панелях в процессе их обработки методом посадки.

Ключевые слова: посадка ребер панелей, пластическое деформирование, обработка металлов давлением, остаточные напряжения, напряженно деформированное состояние

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

© Пашков А.Е., Пашков А.А., Исаченко А.С., Дук А.А., Рыбак А.М., 2024

Для цитирования

Исследование процесса посадки крупногабаритных монолитных панелей / Пашков А.Е., Пашков А.А., Исаченко А.С., Дук А.А., Рыбак А.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 128-138. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-128-138>



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

STUDY ON A FITTING PROCESS OF LARGE-SIZED MONOLITHIC PANELS

Pashkov A.E., Pashkov A.A., Isachenko A.S., Duk A.A., Rybak A.M.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Large-sized monolithic machined panels are one of the most complicated elements in the plane design. A set of large overall dimensions and variable camber of low rigidity determine difficulties with manufacturing such parts. As it is required to achieve high accuracy of the shape of such panels, their manufacturing process is also complicated by structural features, namely thin walls, stiffening ribs and low camber, to whose achievement total deformation should be proportional to an elastic component. The results of the panel geometry generation depend on many interdependent factors, which, in their turn, influence the stress and strain state and shape of parts. One of promising methods of manufacturing such parts is a method of fitting of ribs. This process is widely used for the geometry generation of sections and beams. Now, available methods for calculating mode parameters of fitting ribs of monolithic parts are not enough covered in publications. **Objective.** The research is aimed at improving procedures for calculating mode parameters of metal treatment by local plastic deformation methods. **Methods Applied.** Finite element modeling of a local plastic deformation process using the example of fitting of panel ribs. **Originality.** A concept of simulation of the geometry generation of monolithic machined panels by a fitting method. **Practical Relevance.** The developed finite element model represents input data for calculating mode parameters of the process of fitting ribs of monolithic machined panels. **Results.** The authors developed a procedure for building and analyzing the finite element model to determine internal force factors, occurring in monolithic machined panels during their fitting.

Keywords: fitting of panel ribs, plastic deformation, metal forming, residual stresses, stress and strain state

The research was carried out within the framework of the Priority-2030 academic leadership program.

For citation

Pashkov A.E., Pashkov A.A., Isachenko A.S., Duk A.A., Rybak A.M. Study on a Fitting Process of Large-Sized Monolithic Panels. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 128-138. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-128-138>

Введение

В современном авиастроении для повышения эксплуатационного ресурса и снижения веса планера самолета широко применяются крупногабаритные монолитные панели. Данные детали характеризуются большими габаритными размерами, переменной кривизной и наличием элементов внутреннего набора в виде ребер в продольном и поперечном направлении, осложняющих процесс формообразования [1]. Классический подход к формообразованию панелей, а именно прессовая гибка, отличается сравнительно высокой трудоемкостью и в некоторых случаях может привести к возникновению огибки и трещин [2]. Альтернативным способом придания пространственной формы панелям является использование метода локальных деформаций ребер с помощью процессов посадки или раскатки.

Раскатка ребра – это процесс непрерывной обработки участка ребра детали, при котором деформируемое ребро зажимается с регулируемым давлением парой роликов с перемещением раскатного инструмента за счет вращения роликов. Перемещение раскатного инструмента вдоль деформируемого ребра за счет самозатягивания роликов приводит к его удлинению и

вызывает формирование выпуклой со стороны ребра поверхности детали [3]. Подходы к определению режимных параметров в рамках реализации комбинированного процесса формообразования, содержащего операции раскатки ребер роликами и дробеударного формообразования, приведены в работе [4].

Посадка ребра – это процесс дискретной (инкрементальной) обработки участка ребра детали, при котором деформируемое ребро подвергается сложному нагружению – одновременному сдавливанию и сведению двух пар контактных накладок инструмента для посадки ребер.

Определение зависимости получаемой кривизны детали от деформирующего воздействия является сложной технологической задачей, которую можно решить методом конечно-элементного моделирования по аналогии с раскаткой роликами [5].

Конструктивно-технологические особенности панелей с поперечным оребрением

На рис. 1 представлен общий вид крупногабаритной монолитной панели с поперечными ребрами, подходящей под формообразование методом посадки ребер в целях получения поперечной кривизны.

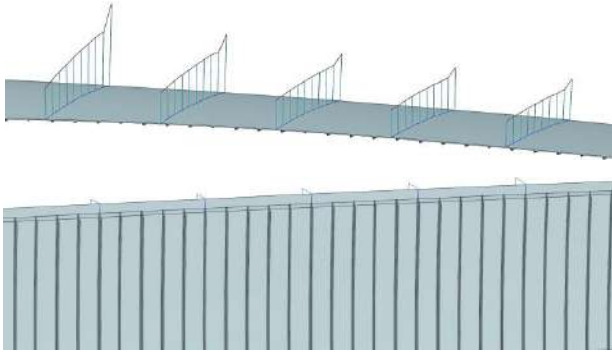


Рис. 1. Общий вид панели с поперечными ребрами
Fig. 1. General view of the panel with transverse ribs

Для проведения моделирования крупногабаритные панели разбиваются на множество элементарных образцов, а именно пластин с полотном (деталь таврового сечения). Геометрические формы длинномерных панелей могут достигать длины до 30 м и более и делятся на следующие типы:

- сравнительно узкие (до 1000 мм) панели с монокристаллическим оребрением;
- обшивки панелей большой ширины (до 2500-4500 мм) в виде разнотолщинных плит с усилениями;
- клиновидные плиты шириной около 1500 мм.

Панели данного типа можно представить как совокупность взаимосвязанных участков в виде полотна с ребром (рис. 2), где A – ширина полотна, H – толщина полотна, L – длина полотна, B – высота ребра, h – толщина ребра, R – радиус скругления.

Ввиду того, что монолитные панели конструктивно представляют собой обшивку, подкрепленную продольными ребрами жесткости, и в случае когда жесткость ребер превосходит изгибную жесткость полотна, панель с оребрением рассматривают чаще всего как систему балок на упругом основании, в качестве которого выступает полотно панели [6], исследование процесса посадки целесообразно начать с определения зависимости кривизны участка детали в виде полотна с ребром от деформирующего воздействия процесса посадки.

Теоретические основы процесса посадки

Исследования, приведенные в [7], основаны на аналитических расчетах потенциальной энергии деформирования монолитной ребристой панели. Энергия

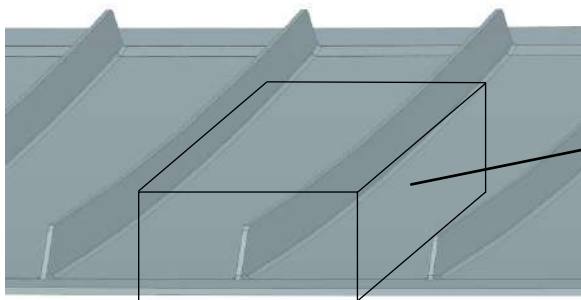


Рис. 2. Размерные параметры элементарного образца
Fig. 2. Dimensional parameters of an elementary sample

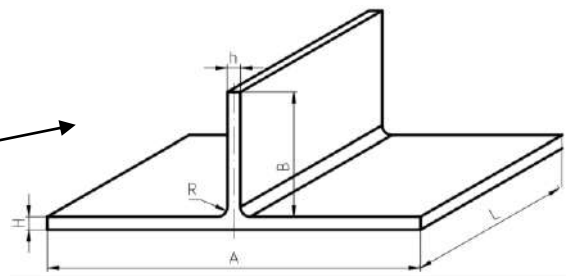
одного воздействия штампа, необходимого для формообразования панели двойной кривизны с оребрением, с заданными поперечными и продольными радиусами кривизны, имеет вид

$$W_i^t = \frac{KSR_n}{L_p^i R_c} \left[\sum_{n=1}^{2n} \left(\cos \frac{y_i}{R_c} - \cos \frac{l}{R_c} \right) \right]^{-1} \times \left\{ \sum_{i=1}^n EF_p \int_{-l}^l e_{i1}^2 dx + \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \int_{-l}^l \int_{-p}^p \left(e_1^2 + 2\nu e_1 e_2 + e_2^2 + \frac{1-\nu}{2} e_{i2}^2 \right) dx dy + \frac{Eh^3}{24(1-\nu^2)} \int_{-l}^l \int_{-p}^p (a^2 + 2\nu ab + b^2) dx dy + \sum_{i=1}^n Ei \left[F_p e^2 + I_p - 2eS_p \right] \int_{-l}^l b^2 dx \right\},$$

где W_i^t – энергия одного воздействия штампа; a , b – параметры, подлежащие определению; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; F_p – площадь одного ребра; e_{i1} – продольная деформация растяжения-сжатия i -го ребра панели, равная продольной деформации срединной поверхности полотна панели на уровне расположения ребра; $2n$ – общее число ребер панели; I_p и S_p – соответственно момент инерции и статический момент сечения ребра панели относительно нейтральной оси полотна; L_p^i – длина i -го ребра; K – допускаемая относительная деформация; S – величина деформируемого участка панели вдоль оси ребра при одном технологическом воздействии.

В работе [8] описываются результаты моделирования в системе ANSYS процесса посадки ребер, содержащие данные деформаций, напряжений и прогибов образца панели в момент действия нагрузки и после снятия. Схема процесса посадки, применяемая при моделировании, представляющая из себя схему местной гибки, приведена на рис. 3, а. Результаты моделирования в виде величины остаточных деформаций в ребре панели, вызванных приложением момента к ребру после снятия нагрузки, показаны на рис. 3, б.

Работа [9] посвящена исследованиям производственных параметров процесса крафт-формования, определению производственных стратегий обработки методом посадки и разводки и использует результаты имитационной модели процесса посадки/разводки, созданной в программе PamStamp 2G. Схема процесса посадки/разводки приведена на рис. 4.



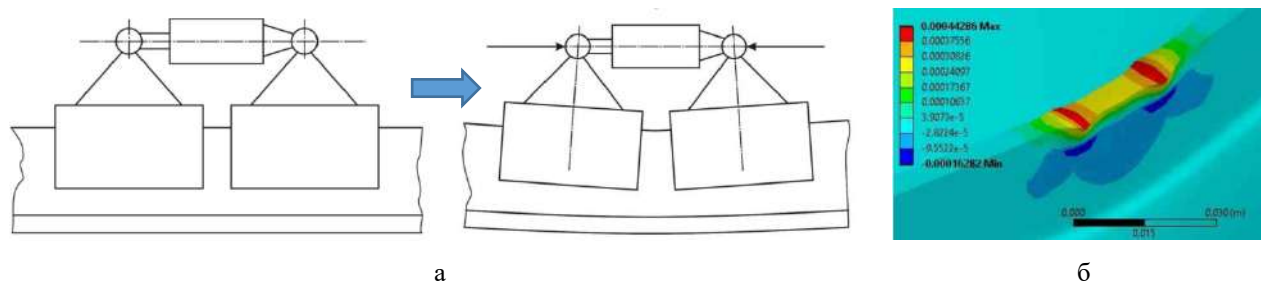


Рис. 3. Моделирование процесса посадки методом местной гибки: а – схема нагружения; б – результаты моделирования

Fig. 3. Modeling of the fitting process using the local bending method: а is a loading diagram; б is simulation results

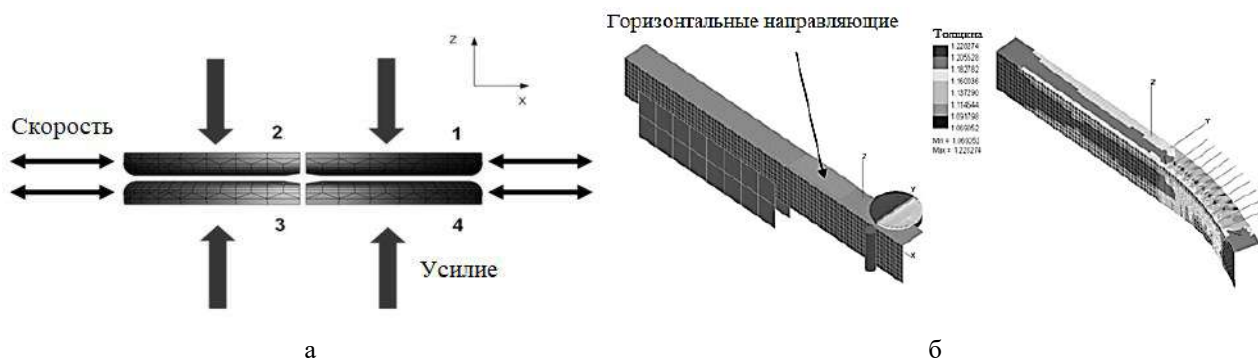


Рис. 4. Моделирование процесса посадки методом натурального нагружения: а – схема нагружения; б – результаты моделирования

Fig. 4. Modeling of the fitting process using the full-scale loading method: а is a loading diagram; б is simulation results

Таким образом, большинство исследований процесса посадки ребер направлено на моделирование формоизменения образца без исследования напряженного и деформационного состояния сжатой/растянутой области.

Оборудование для реализации процесса посадки

Лидером в области производства оборудования для местной посадки является компания Eckold [10].

На рис. 5 представлен станок для посадки/разводки деталей типа полотна с подкреплением KF 675 (см. рис. 3, а). Схема процесса посадки, реализуемая на представленном оборудовании, приведена на рис. 3, б.

Данное оборудование может оснащаться сменным инструментом (рис. 6) для обработки уголков (рис. 6, а), оболочек (рис. 6, б), швеллеров и тавров (рис. 6, в) [11] толщиной до 6 мм. Однако обработка габаритных панелей на данном оборудовании представляется невозможной ввиду конструктивных особенностей.

Патентный анализ решений в области посадки конструктивных элементов деталей (рис. 7) показывает, что большинство изобретений представляет из себя наборы матриц с установленными в них пакетами направляющих клиньев, которые устанавливаются в кривошипные прессы. Общее качество, связывающее все разработки компании Eckold в области оборудования для посадки/разводки, – это возможность обработки деталей типа полотна с ребром ограниченных габаритных размеров.

Разработка конечно-элементной модели процесса единичного нагружения ребра методом посадки

Входными данными для построения модели процесса посадки являются:

- кинематическая схема нагружающего инструмента;
- величина нагрузки, действующей на инструмент в процессе обработки;
- параметры и свойства материала детали и инструмента.

За основу была взята кинематическая схема, широко используемая фирмой Eckold, показанная на рис. 8, а. Принцип действия инструмента для посадки ребер заключается в одновременном воздействии на ребро сжимающей по толщине F_x и стягивающей вдоль ребра F_y компонентами нагрузки F (рис. 8, б), приводящей к деформации сжатия обрабатываемого участка детали (рис. 9) и сокращению общей длины ребра, что влечет за собой общую изгибную деформацию полотна.

Таким образом, для проведения моделирования была разработана схема инструмента для посадки, показанная на рис. 10, а. Модель упрощалась путем создания оболочечных объектов по срединным поверхностям [15]. На основе предложенной схемы была создана конечно-элементная сетка нажимных элементов инструмента для посадки (рис. 10, б) в среде ANSYS LS-Dyna.

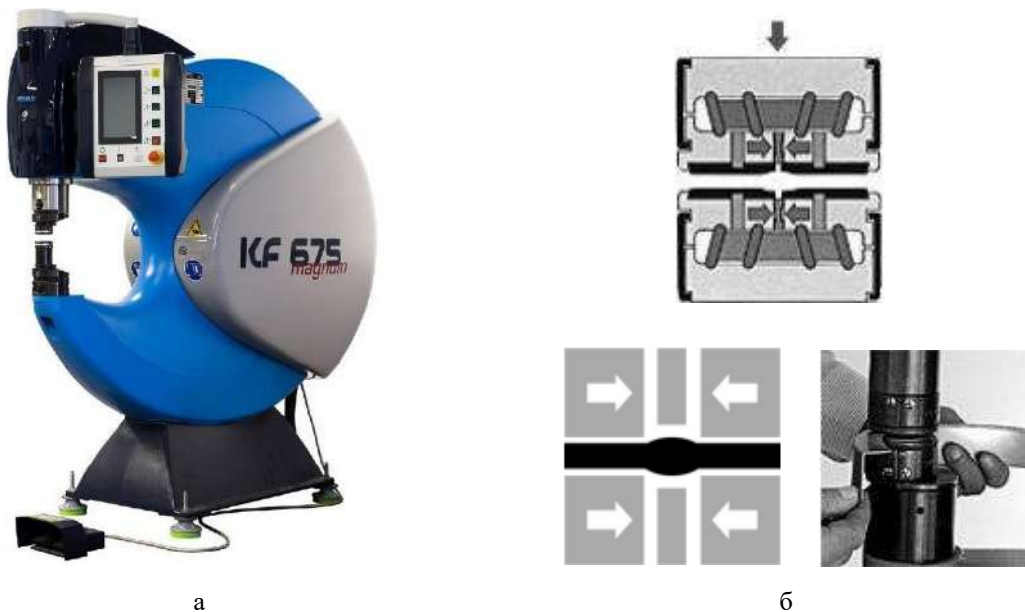


Рис. 5. Крафт-формер Eckold KF 675 (а), схема посадки ребер инструментом Eckold (б)
 Fig. 5. Eckold KF 675 Kraftformer (a), a diagram of fitting ribs with the Eckold tool (б)

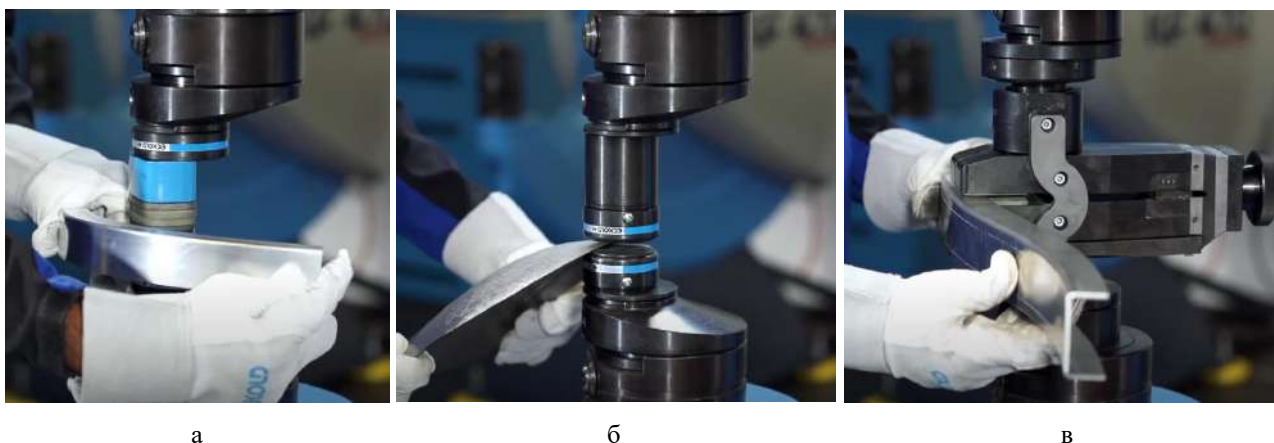


Рис. 6. Обработка уголков и тавров (а), оболочек (б), швеллеров (в) на Eckold KF 675
 Fig. 6. Processing of corners and tees (a), shells (б), channels (в) on Eckold KF 675

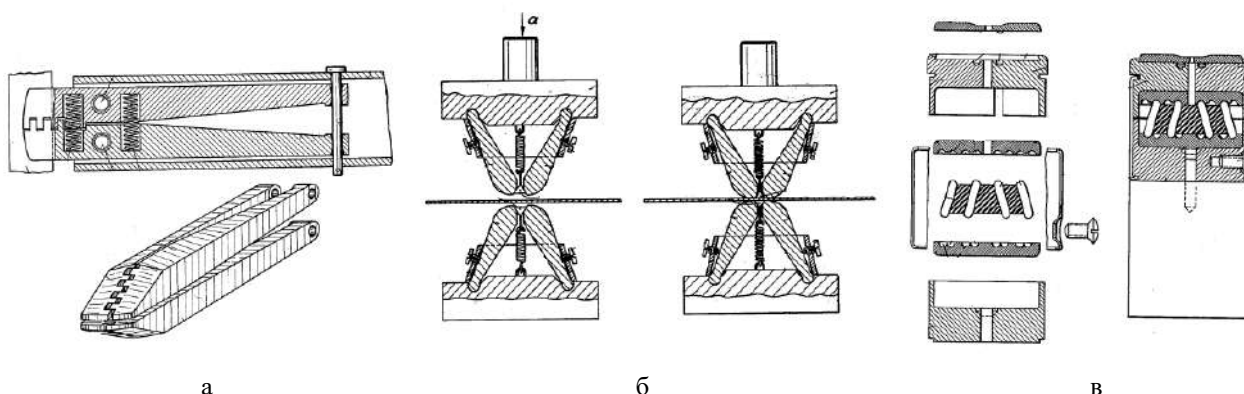


Рис. 7. Инструмент для правки или растяжки листового металла (а) [12], инструмент для формообразования листового металла (б) [13], инструмент для формообразования листового металла или профилей (в) [14]
 Fig. 7. A tool for leveling or stretching sheet metal (a) [12] (a); a tool for changing the shape of sheet metal (б) [13]; a tool for changing the shape of sheet metal or sections (в) [14]

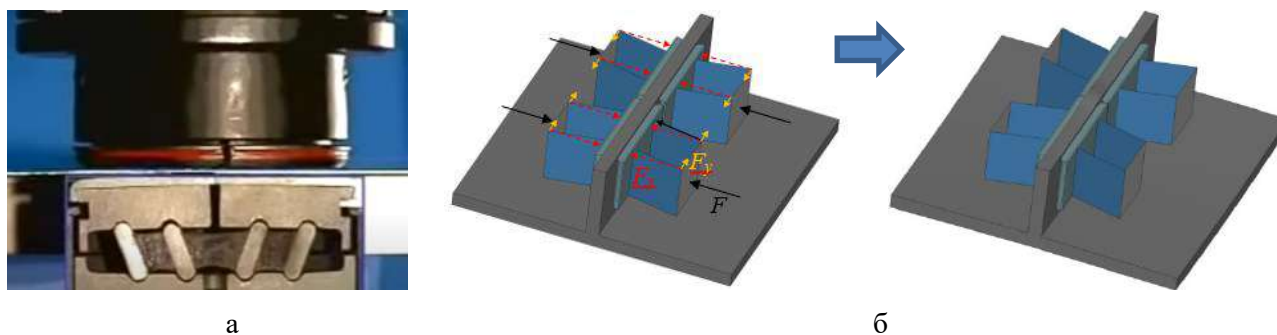


Рис. 8. Схема нагружения, применяемая для построения модели и компоненты нагрузки F при реализации операции посадки

Fig. 8. The loading diagram used to build the model and load component F during the fitting operation

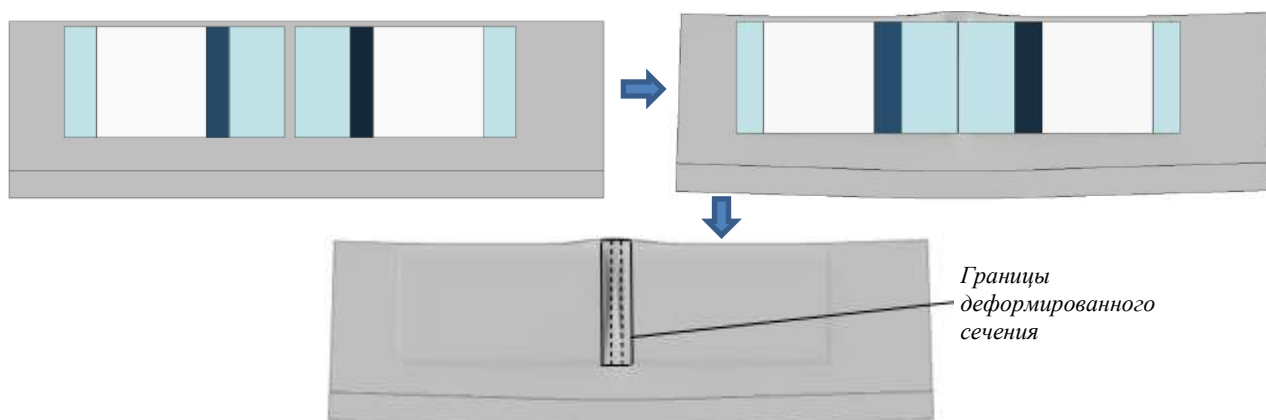


Рис. 9. Деформация сжатия участка детали при обработке методом посадки

Fig. 9. Deformation of compression of a section of a part during fitting

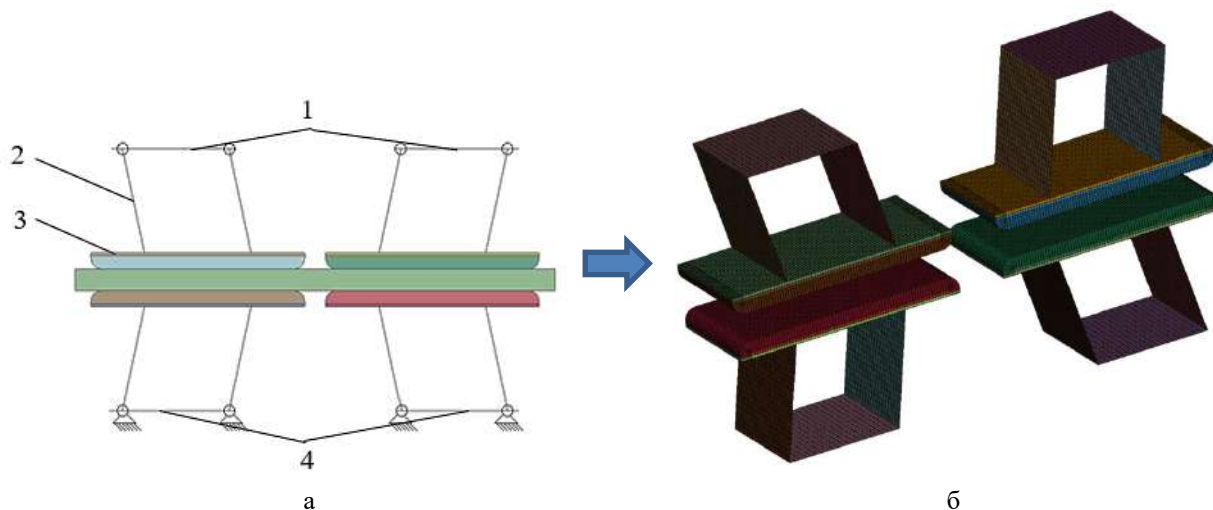


Рис. 10. Общий вид модели нажимных элементов инструмента для посадки (а) и конечно-элементная модель (б): 1 – нажимные элементы; 2 – клиновые элементы; 3 – контактные накладки; 4 – опоры

Fig. 10. General view of the model of the pressing elements of the tool for fitting (a) and the finite element model (b): 1 is pressing elements; 2 is wedge elements; 3 is contact pads; 4 is supports

Параметрирование модели выполнялось в следующей последовательности [16-18]:

- создание упругопластической модели материала для обрабатываемой детали и абсолютно упругой модели для контактных накладок;
- создание контактов между контактными накладками и обрабатываемой деталью типа «поверхность – поверхность» (surface to surface) с указанием параметров трения, определяемых экспериментально;
- создание демпфирования;
- создание нагружения. Нагружение осуществлялось путем задания перемещений нажимных элементов с последующей разгрузкой;
- создание параметров расчета, то есть настройка решателя в явной постановке задачи динамики.

Параметрирование модели материала В95пчТ2 для обрабатываемой детали: ρ – массовая плотность – 2850 кг/м³; E – модуль упругости – $0,74 \cdot 10^5$ МПа; ν – коэффициент Пуассона – 0,33; $\sigma_{\text{Г}}$ – Предел текучести – 457 МПа.

Параметрирование модели материала Д19 для обрабатываемой детали: ρ – массовая плотность – 2760 кг/м³; E – Модуль упругости – $0,7 \cdot 10^5$ МПа; ν – коэффициент Пуассона – 0,33; $\sigma_{\text{Г}}$ – предел текучести – 300 МПа.

В качестве допущения модель контактных накладок была определена как абсолютно упругая.

В ходе экспериментальных испытаний был определен коэффициент трения между контактными накладками и обрабатываемой деталью $F_s = 0,5$.

Нажимное усилие прикладывается на нажимную пластину размерами 20×73 мм и размерами элементов

1×0,5 мм. К каждому узлу данной пластины прикладываются силы, сумма которых эквивалентна усилию величиной в 25 т. График приложения нагрузки показан на рис. 11.

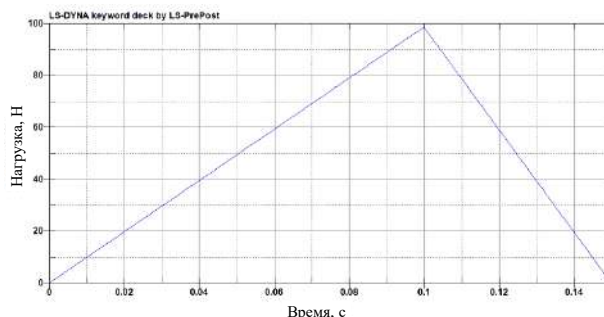


Рис. 11. График приложения нагрузки
Fig. 11. Loading chart

Размерные параметры элементарного образца, мм:

- ширина полотна $A = 200$;
- толщина полотна $H = 2$;
- длина полотна $L = 90$;
- высота ребра $B = 38$;
- толщина ребра $h = 5$.

С использованием приведенной расчетной модели была выполнена симуляция единичного хода нагружения деформируемой детали при помощи нажимных элементов инструмента для посадки (рис. 12) для пяти пластин с разными толщинами ребер – 2,5, 3, 3,5, 4, 5 мм и двух материалов В95пчТ2, Д19Т и были измерены относительные сужения деформированной области после разгрузки (рис. 13).

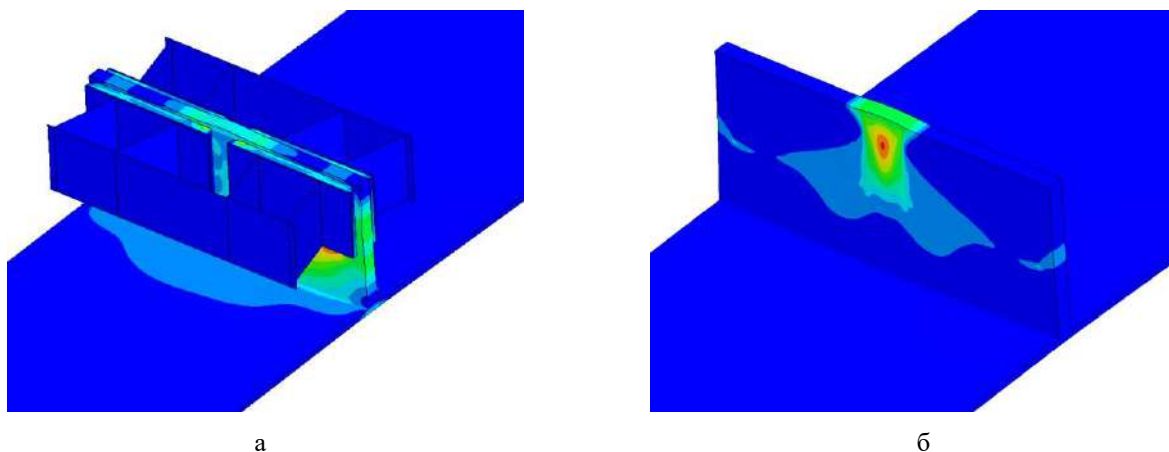
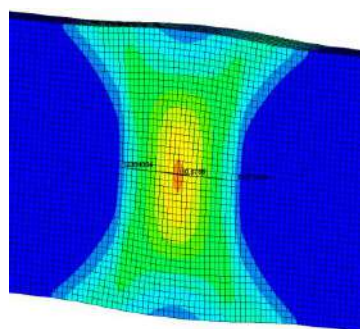
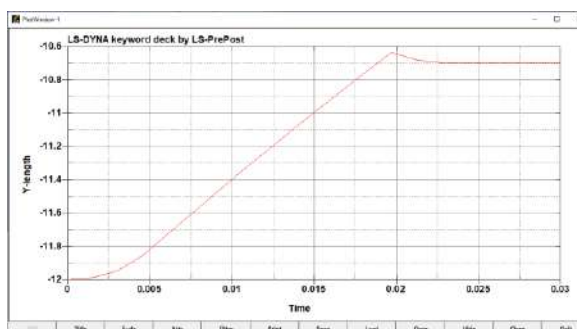


Рис. 12. Результаты моделирования в виде распределений интенсивности напряжений по Мизесу для участков деталей типа тавра (а) и местных пластических деформаций (б)

Fig. 12. Simulation results as the von Mises stress intensity distributions for sections of tee-type parts (a) and local plastic deformations (б)



а



б

Рис. 13. Измерение сужения по границам области остаточных пластических деформаций (а) и график расстояния между измеряемыми узлами (б)

Fig. 13. Measurement of narrowing along the boundaries of the area of residual plastic deformations (a) and a graph of the distance between the measured nodes (б)

Анализ результатов моделирования

По результатам работы можно сформулировать следующие положения:

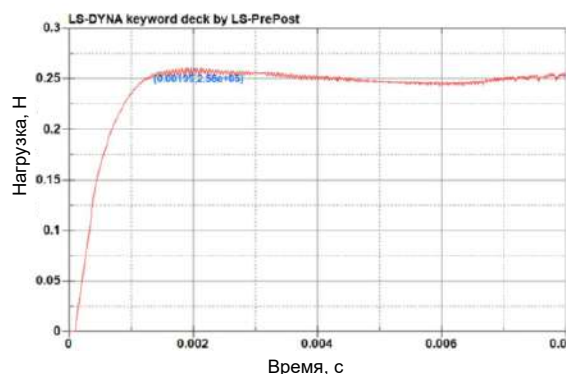
- размеры конечных элементов детали, обеспечивающих оптимальное соотношение времени расчетов и адекватности картины остаточного напряженно-деформированного состояния детали, составляют $0,5-0,7 \text{ мм}^3$;
- расчетная величина нагрузки на нажимные элементы при обработке детали с толщиной ребра 5 мм достигают 25 т, что подтверждается данными диссертационного исследования [9] (рис. 14);
- одного локального воздействия недостаточно для получения значимой компоненты кривизны на конструктивном элементе детали [19]. Поэтому требуется применять итерационную обработку участка детали [20].

Заключение

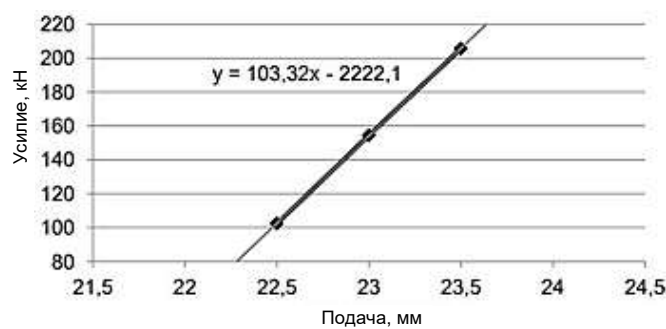
В современном мире важность совершенствования методов расчета режимных параметров обработки металлов становится все более актуальной. В данной работе исследуется метод локального пластического деформирования на основе конечно-элементного моде-

лирования процесса посадки ребер крупногабаритных панелей. Разработанная в среде конечно-элементного моделирования и анализа ANSYS LS-Dyna модель процесса посадки позволяет оценить напряженно-деформированное состояние и силовые параметры нагружения локального участка детали.

Новизна исследования заключается в разработке концепции и методики моделирования формообразования монолитно-фрезерованных панелей методом посадки. Полученные данные позволят более тонко изучить процесс посадки, что в перспективе даёт возможность прогнозировать и управлять напряженно-деформированным состоянием деталей для достижения максимальной производительности и точности процесса. Выполненная работа является отправной точкой для комплексного исследования процесса посадки ребер, включающего исследование контактных взаимодействий детали и инструмента, конструктивных особенностей инструмента, разработки методик инкрементального нагружения. Для полноценного анализа требуется дальнейшее исследование, которое позволит углубить понимание процесса и повысить эффективность методик.



а



б

Рис. 14. Величина нагрузки при обработке детали с толщиной ребра 5 мм (а) и результаты моделирования [9] в виде зависимости усилия от подачи величины хода нажимного элемента (б)

Fig. 14. Structural load when processing a part with a rib thickness of 5 mm (a) and simulation results [9] as a relation between force and the feed of the stroke of the pressing element (б)

Список источников

1. Разработка методики анализа геометрических параметров длинномерных панелей / Пашков А.Е., Пашков А.А., Фалеев С.Ю., Самойленко О.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №2. С. 102-113. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-102-113>
2. Hamouche E., Loukaides E.G. Classification and selection of sheet forming processes with machine learning // *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 2018, vol. 31, no. 9, pp. 921-932. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1429668>
3. Макарук А.А., Минаев Н.В. Повышение эффективности формообразования и правки мало жестких подкрепленных ребрами деталей раскаткой роликами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №12(107). С. 63-70.
4. Определение внутренних силовых факторов, возникающих при упрочнении подкрепленных ребрами деталей / Макарук А.А., Пашков А.А., Хамаганов А.М., Самойленко О.В. // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. №10(141). С. 29-37. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-29-37. EDN: QKKZCJ.
5. Минаев Н.В. К созданию предсказательной модели процесса формообразования и правки подкрепленных панелей раскаткой роликами // Современные авиационные технологии. 2023. С. 15-25.
6. Баушев В.Н., Львин Я.Б., Кушнаренко С.Г. Расчет параметров технологического процесса формообразования монолитных ребристых панелей отрицательной гауссовой кривизны больших прогибов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: темат. сб. науч. тр. Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1985. С. 123-133.
7. Сикульский В.Т., Кашеева В.Ю., Сикульский С.В. Методика расчета осесимметричного формоизменения монолитных ребристых панелей двойной кривизны с жесткими ребрами последовательным деформированием // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2016. №74. С. 78-87.
8. Сикульский В.Т., Сикульский С.В. Моделирование процесса формообразования монолитных панелей локальным деформированием ребер // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2018. №80. С. 63-70.
9. Hoffmann H., Hautmann R., & Petry R. Studies for the Development of a Simulation Basis for Numerically Controlled Driving of Sheet Metal // *Advanced Materials Research.* (2005). no. 6-8, pp. 517-524. <https://doi:10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.517>
10. From art to part: Learning from the traditional smith in developing flexible sheet metal forming processes / Daniel T. Bowen, Iacopo M. Russo, Christopher J. Cleaver, Julian M. Allwood, Evripides G. Loukaides // *Journal of Materials Processing Technology.* January 2022, vol. 299, 117337.
11. Универсальные станки для холодного формования листового металла и профилей без стружки: холодная обработка листов и профилей ECKOLD Kraftformer KF 675: Каталог. Германия, 10.06.2023. 28 с.
12. Пат. 1,809,168, Германия. Tool for upsetting or stretching sheet metal / Н. Junkers; заявл. 12.12.1929, Serial No. 413,604; опублик. 09.06.1931.
13. Пат. 2,010,996, Германия. Tool for producing a change of form in sheet metal / Н. Junkers; заявл. 24.09.1932, Serial No. 634,737; опублик. 13.08.1935.
14. Пат. 2,798,388, Германия. Apparatus for deforming, especially upsetting or stretching, sheets or profiles / W. Eckold; заявл. 12.05.1954, Serial No. 452,195; опублик. 09.07.1957.
15. Shell Models with Enhanced Kinematics for Finite Elements in Sheet Metal Forming Simulations / Tobias Willmann, Manfred Bischoff // *The 12th European LS-DYNA Conference At: Koblenz. Germany, 2019.*
16. Numerical modelling and deformation mechanics of the english wheel process / Bowen D.T., Music O., Shokrani A., Loukaides E.G. // *The 13th International Conference On the Technology of Plasticity, Ohio State University, 2021.*
17. Oliveira M.C., & Fernandes J.V. Modelling and Simulation of Sheet Metal Forming Processes // *Metals.* 2019, vol. 9, no. 12, 1356. <https://doi.org/10.3390/met9121356>
18. Cherouat A., Borouchaki H., & Jie Z. Simulation of Sheet Metal Forming Processes Using a Fully Rheological-Damage Constitutive Model Coupling and a Specific 3D Remeshing Method // *Metals.* 2018, vol. 8, no. 12, 991. <https://doi.org/10.3390/met8120991>
19. Gatea S., Ou H., McCartney G. Review On the influence of process parameters in incremental sheet forming // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, vol. 87, no. 1-4, pp. 479-499. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8426-6>
20. Gohil A., Modi B. Review of the effect of process parameters on performance measures in the incremental sheet forming process // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: Eng. Manuf.* 2021, vol. 235, no. 3, pp. 303-332. <https://doi.org/10.1177/0954405420961215>

References

1. Pashkov A.E., Pashkov A.A., Faleev S.Yu., Samoilenko O.V. Development of a methodology for analyzing geometric parameters of long panels. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(2):102-113. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-2-102-113>
2. Hamouche E., Loukaides E.G. Classification and selection of sheet forming processes with machine learning. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 2018;31(9):921-932. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1429668>
3. Makaruk A.A., Minaev N.V. Increasing efficiency of shaping and straightening low-rigid parts reinforced with ribs by rolling with rollers. *Vestnik Irkutskogo*

- gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2015;(12(107)):63-70. (In Russ.)
4. Makaruk A.A., Pashkov A.A., Khamaganov A.M., Samoilenko O.V. Determination of internal force factors arising during hardening of parts reinforced with ribs. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2018;22(10(141)):29-37. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-29-37. EDN: QKKZCJ.
 5. Minaev N.V. Towards the creation of a predictive model of the process of shaping and straightening reinforced panels by rolling with rollers. *Sovremennye aviatsionnye tekhnologii. International Conference on Aviation Engineering: Materialy XVI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern Aviation Technologies. International Conference on Aviation Engineering: Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Conference]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2023, pp. 15-25. (In Russ.)
 6. Baushev V.N., Lvin Ya.B., Kushnarenko S.G. Calculation of the parameters of the technological process of forming monolithic ribbed panels of negative Gaussian curvature of high deflection. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruksiy letatelnykh apparatov: temat. sb. nauch. tr.* [Issues of designing and manufacturing of aircraft structures]. Kharkiv: Kharkiv Aviation Institute, 1985, pp.123-133. (In Russ.)
 7. Sikulsky V.T., Kashcheeva V.Yu., Sikulsky S.V. Methodology for calculating the axisymmetric shape change of monolithic ribbed panels of double curvature with rigid ribs by sequential deformation. *Otkrytye informatsionnye i kompyuternye integrirovannye tekhnologii* [Open Information and Computer Integrated Technologies]. 2016;(74):78-87. (In Russ.)
 8. Sikulsky V.T., Sikulsky S.V. Modeling of the process of shaping monolithic panels by local deformation of the ribs. *Otkrytye informatsionnye i kompyuternye integrirovannye tekhnologii* [Open Information and Computer Integrated Technologies]. 2018;(80):63-70. (In Russ.)
 9. Hoffmann H., Hautmann R., Petry R. Studies for the development of a simulation basis for numerically controlled driving of sheet metal. *Advanced Materials Research*. 2005;(6-8):517-524. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.6-8.517>
 10. Daniel T. Bowen, Iacopo M. Russo, Christopher J. Cleaver, Julian M. Allwood, Evripides G. Loukaides. From art to part: Learning from the traditional smith in developing flexible sheet metal forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2022;299:117337.
 11. Universal machines for cold forming of sheet metal and sections without chips: Cold processing of sheets and sections. ECKOLD Kraftformer KF 675: Catalog. Germany, 10.06.2023, 28 p.
 12. Junkers H. Tool for upsetting or stretching sheet metal. Patent Germany, no. 1,809,168, 1931.
 13. Junkers H. Tool for producing a change of form in sheet metal. Patent Germany, no. 2,010,996, 1935.
 14. Eckold W. Apparatus for deforming, especially upsetting or stretching, sheets or profiles. Patent Germany, no. 2,798,388, 1957.
 15. Tobias Willmann, Manfred Bischoff. Shell models with enhanced kinematics for finite elements in sheet metal forming simulations. The 12th European LS-DYNA Conference. Koblenz, Germany, 2019.
 16. Bowen D.T., Music O., Shokrani A., Loukaides E.G. Numerical modelling and deformation mechanics of the English wheel process. The 13th International Conference on the Technology of Plasticity. Ohio State University, 2021.
 17. Oliveira M.C., Fernandes J. V. Modelling and simulation of sheet metal forming processes. *Metals*. 2019;9(12):1356. <https://doi.org/10.3390/met9121356>
 18. Cherouat A., Borouchaki H., Jie Z. Simulation of sheet metal forming processes using a fully rheological-damage constitutive model coupling and a specific 3D remeshing method. *Metals*. 2018;8(12):991. <https://doi.org/10.3390/met8120991>
 19. Gatea S., Ou H., McCartney G. Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016;87(1-4):479-499. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8426-6>
 20. Gohil A., Modi B. Review of the effect of process parameters on performance measures in the incremental sheet forming process. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: Eng. Manuf.* 2021;235(3):303-332. <https://doi.org/10.1177/0954405420961215>

Поступила 12.01.2024; принята к публикации 08.02.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 12/01/2024; revised 08/02/2024; published 27/06/2024

Пашков Андрей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: pashkov@istu.edu.

Пашков Александр Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: pashk0ff@mail.ru.

Исаченко Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: isachenkoas@ex.istu.edu.

Дук Андрей Александрович – научный сотрудник, кафедра технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: dukaa@ex.istu.edu.

Рыбак Антон Михайлович – научный сотрудник, кафедра технологии и оборудования машиностроительных производств, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: antoxa.rybak.bik@gmail.com.

Andrei E. Pashkov – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: pashkov@istu.edu.

Aleksandr A. Pashkov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: pashkOff@mail.ru.

Aleksei S. Isachenko – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: isachenkoas@ex.istu.edu.

Andrei A. Duk – Researcher, Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: dukaa@ex.istu.edu.

Anton M. Rybak – Researcher, Department of Machine-Building Production Technology and Equipment, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: antoxa.rybak.bik@gmail.com.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.19
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-139-144



НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОСАДОК ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Рогов Е.Ю.¹, Овсянников В.Е.², Кулемина А.А.², Ковенский И.М.²

¹ Курганский институт железнодорожного транспорта, Курган, Россия

² Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Подшипники качения являются самыми распространенными опорами для вращающихся частей машин. Наряду с неоспоримыми преимуществами, основными среди которых являются высокий коэффициент полезного действия и компактность, имеется ряд недостатков. Главным недостатком являются высокие требования к точности посадочных поверхностей. Применительно к опорным шейкам предъявляются требования к точности размеров, шероховатости поверхности и точности взаимного расположения посадочных поверхностей. Определенным пробелом в данном случае является недостаточно четко сформулированные и обоснованные требования в части точности формы посадочных поверхностей в поперечном сечении. **Цель работы.** Исследование влияния точности формы (отклонений от круглости) посадочных поверхностей валов на качество посадок подшипников качения. **Используемые методы.** В работе использованы методы технологии машиностроения, расчетов посадок деталей, методы исследования точности формы и метод конечных элементов. **Новизна.** На основании комплексного технико-экономического анализа получено обоснование величины точности формы посадочных поверхностей под подшипники качения, которые обеспечивают требуемые параметры посадки при оптимальной себестоимости. **Результат.** Проведены исследования влияния погрешности формы посадочных поверхностей в поперечном сечении на параметры посадки с натягом. В программном пакете Компас исследовалось влияние отклонений формы в поперечном сечении на величину контурного коэффициента трения в месте посадки подшипника качения на вал. Получены зависимости данного показателя от погрешности формы и проведено экономическое обоснование полученных результатов. **Практическая значимость.** Разработанная конечно-элементная модель дает возможность исследовать взаимодействие посадочных поверхностей валов и внутренних колец подшипников качения. При этом имеется возможность изменения физико-механических свойств материала деталей, действующих нагрузок и других параметров взаимодействия. Использование полученных результатов на стадии проектирования узлов машин дает возможность повысить качество продукции за счет снижения числа проворотов внутреннего кольца подшипника и, как следствие, снижения интенсивности изнашивания данных сопряжений.

Ключевые слова: посадка, натяг, погрешность, подшипник, контакт

© Рогов Е.Ю., Овсянников В.Е., Кулемина А.А., Ковенский И.М., 2024

Для цитирования

Некоторые аспекты технологического обеспечения качества посадок подшипников качения / Рогов Е.Ю., Овсянников В.Е., Кулемина А.А., Ковенский И.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 139-144. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-139-144>



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

SOME ASPECTS OF PROCESS QUALITY ASSURANCE OF ROLLER BEARING FIT

Rogov E.Yu.¹, Ovsyannikov V.E.², Kulemina A.A.², Kovenskii I.M.²

¹ Kurgan Institute of Railway Transport, Kurgan, Russia

² Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). Roller bearings are the most widely used supports for rotating parts of machines. Along with the undeniable advantages, whose main ones include high efficiency and compactness, there are a number of disadvantages. The main disadvantages are high requirements for accuracy of mounting surfaces. Requirements for support necks are dimensional accuracy, surface roughness, and accuracy of relative positioning of mounting surfaces. A certain gap in this case is insufficiently clearly formulated and justified requirements in terms of accuracy of the shape of mounting surfaces in the cross section. **Objectives.** The research is aimed at studying the influence of the shape accuracy (out-of-roundness) of the shaft mounting surfaces on the quality of roller bearing fits. **Methods Applied.** The research uses methods of mechanical engineering technology, calculations of part fits, methods of studying accuracy of the shape and the finite element method. **Originality.** A comprehensive technical and economic analysis contains a rationale for accuracy of the shape of the mounting surfaces for roller bearings, which provide the required mounting parameters at the optimal cost. **Result.** The authors studied the influence of mounting surface shape error in the cross-section on interference fit parameters. The Kompas software suite was applied to investigate the effect of shape deviations in the cross-section on the value of the contour coefficient of friction at the place of fitting the roller bearing on the shaft. The authors determined the relationship between this indicator and the shape error and provided an economic rationale for the results. **Practical Relevance.** The developed finite element model makes it possible to investigate the interaction between the mounting surfaces of the shafts and the inner rings of the roller bearings. It is possible to change physical and mechanical properties of a material of parts, acting loads and other parameters of the interaction. Using the obtained results at the stage of designing machine assemblies makes it possible to improve the quality of products by reducing the number of turns of the inner bearing ring and, as a result, reducing the intensity of wear of these interfaces.

Keywords: fit, tightness, error, bearing, contact

For citation

Rogov E.Yu., Ovsyannikov V.E., Kulemina A.A., Kovenskii I.M. Some Aspects of Process Quality Assurance of Roller Bearing Fit. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 139-144. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-139-144>

Введение

Подшипники качения являются самыми распространенными опорами для вращающихся частей машин. Основные преимущества от использования в конструкциях машин подшипников качения хорошо известны. Одними из основных плюсов является высокий коэффициент полезного действия. Вместе с тем у подшипников качения имеются и определенные недостатки. Одним из главных являются повышенные требования к точности установки. Учитывая специфику производства подшипников, которая заключается в том, что их изготавливают в условиях массового производства с отклонениями, которые не зависят от посадки их в изделия, имеет смысл рассмотреть требования к сопряженным поверхностям.

Долговечность работы подшипника во многом зависит от обоснованного выбора и дальнейшего технологического обеспечения посадки наружного кольца в корпус и внутреннего на вал. Известно, что выбор посадки зависит, прежде всего, от типа нагружения подшипника. Выделяют местное, циркуляционное и колебательное нагружение [1]. Если говорить о

распространенности, то наиболее распространенным типом нагружения в машинах является местное. В данном случае внутреннее кольцо подшипника устанавливается на вал неподвижно. Обоснованность выбора данного вида посадки была получена экспериментально. В работе [2] показано, что долговечность подшипников при местном типе нагружения, которые установлены на вал с натягом, в среднем на 25% выше, чем при использовании посадки с зазором.

Величину минимального натяга, который необходимо создать в контакте внутреннего кольца подшипника и посадочной поверхности вала, можно определить по формуле [3]

$$N_{\min} > \left[\frac{d+3}{d} \right] \cdot \left(0,08 \sqrt{\frac{dF_r}{B^l}} + d \cdot 0,0015 \cdot \Delta T \right), \quad (1)$$

где d – номинальный диаметр сопряжения, мм; B^l – рабочая ширина места посадки (ширина подшипника минус фаски), мм; F_r – радиальная нагрузка, которая действует на подшипник, Н; ΔT – величина разности температур подшипника во время передачи нагрузки и окружающей среды, °С.

Исследования, проведенные в работе [4], показывают, что использование зависимости (1) при назначении посадок позволяет увеличить качество посадок подшипников качения. Однако около 25% пар все равно допускают проворот внутреннего кольца подшипника качения относительно посадочной поверхности вала.

Поэтому для более корректного рассмотрения процессов, происходящих в зоне контакта, имеет смысл воспользоваться понятием «контурный коэффициент трения» [4, 5]. При этом учитывается влияние погрешности формы на параметры посадки.

Влияние отклонений от круглости на характеристики посадок исследовано в работах [4, 5]. При этом зависимость для коэффициента трения в контакте имеет вид

$$f_c = \tau_0 \cdot \left(\frac{A_c}{P_N} \right)^{\frac{1}{2\nu+1}} \cdot \left(\frac{2,35 \cdot b^{2\nu} \cdot \sigma_T \cdot R^{0,5} \cdot (1-\mu^2)}{2^{2\nu} \cdot 0,04 \cdot h_{\max}^{0,5} \cdot E} \right) + \beta, \quad (2)$$

где τ_0 – сопротивление на срез, МПа; A_c – контурная площадь касания, мм²; P_N – нормальная сила давления, Н; ν и b – параметры кривой опорной поверхности; σ_T – предел текучести материала, МПа; R – радиус контакта, мм; μ – коэффициент Пуассона; h_{\max} – максимальная высота выступа, мкм; E – модуль продольной упругости, МПа; β – константа в биномиальном законе трения.

При этом взаимосвязь между параметрами натяга и значениями коэффициента трения в паре выражается следующей формулой [6]:

$$N_{\min} = \frac{\sqrt{P^2 + \left(\frac{2M}{d} \right)^2}}{f_c \cdot \pi \cdot l} \cdot \left(\frac{c_1}{E_1} + \frac{c_2}{E_2} \right), \quad (3)$$

где l – длина сопряжения, мм; E – модуль продольной упругости материалов контактирующих деталей; c – приведенный радиус контакта, мм; P – действующая сила, Н; M – действующий крутящий момент, Н·м.

Анализируя зависимости (1)-(3), можно сделать вывод, что при прочих равных условиях на качество посадки существенное влияние оказывает параметр A_c (контурная площадь касания). При этом контурная площадь касания в значительной степени зависит от точности формы посадочной поверхности в поперечном сечении.

Материалы и методы исследования

В работе рассматривались валы редукторов поворота от мини-погрузчика. Диаметр посадочной поверхности под подшипник 40 и 50 мм. Материал валов – сталь 45 ГОСТ 1050-88. Термическая обработка – улучшение. В качестве исходных данных для построения трехмерных моделей были использованы круглограммы поверхностей, обработанных чистовым и тонким точением. В качестве режущих инструментов использовались резцы с пластинами из твердых спла-

вов и сверхтвердых материалов. Значения режимов резания принимались согласно рекомендациям [7-9]. Измерение отклонений от круглости производилось непосредственно на станке. Схема измерений представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема измерения
Fig. 1. Measurement diagram

После измерения результаты подвергались предварительной обработке, которая заключалась в разложении в ряд Фурье и последующем отсеивании погрешности установки, эксцентриситета и т.д. Обработка выполнялась в специально разработанной компьютерной программе [10]. Интерфейс программы приведен на рис. 2.

Полученные круглограммы использовались для построения 3d-моделей контакта посадочной поверхности вала и кольца подшипника. Пример расчетной схемы приведен на рис. 3.

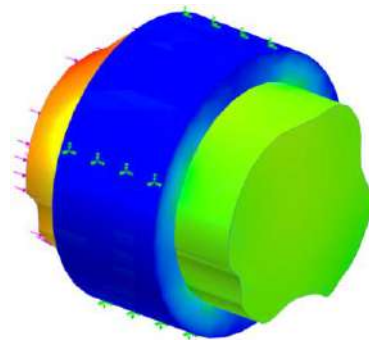


Рис. 3. Схема измерения
Fig. 3. Design diagram

Также был выполнен расчет себестоимости обработки в зависимости от требований к точности формы (отклонению от круглости Δ). Расчеты проводились по следующей формуле [9]:

$$C_{\text{оп}} = Z_0 + Z_{\text{в.р.}} + A_0 + A_{\text{т.о.}} + P_0 + И + Л_0 + П_{\text{л}} + П_{\text{пр}} + Z_{\text{бр}}, \quad (4)$$

где Z_0 – заработная плата станочника; $Z_{\text{в.р.}}$ – заработная плата наладчика; A_0 – амортизационные отчисления от стоимости основного оборудования; $A_{\text{т.о.}}$ – амортизационные отчисления от стоимости технологического оснащения; P_0 – затраты на ремонт и обслуживание оборудования; $Л_0$ – затраты на силовую электроэнергию; $П_{\text{л}}$ – затраты на содержание площадей; $П_{\text{пр}}$ – затраты на разработку управляющей программы; $Z_{\text{бр}}$ – затраты на устранение брака.

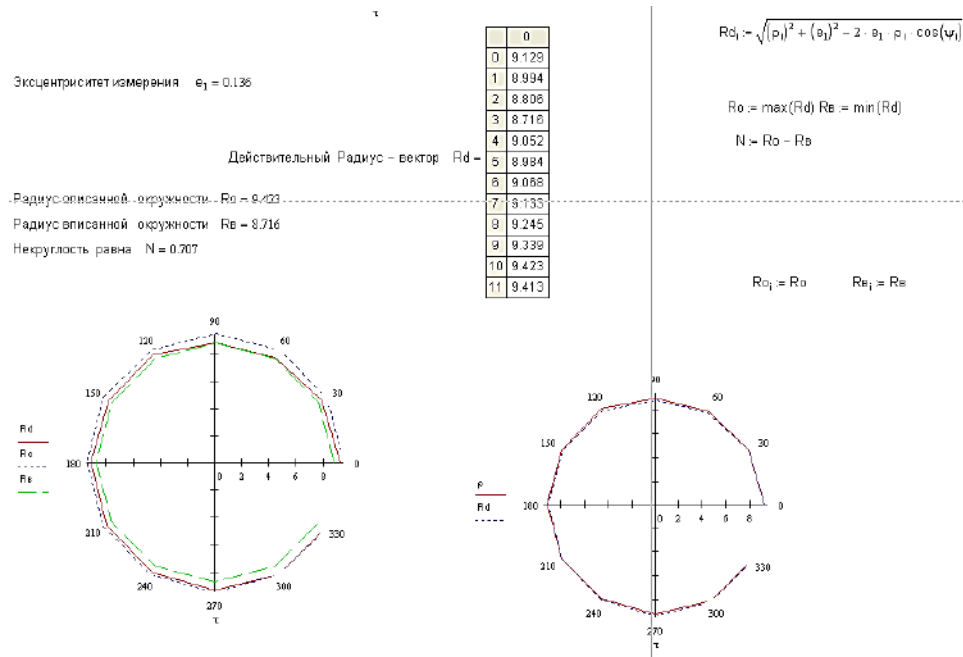


Рис. 2. Интерфейс программы для анализа отклонений от круглости
 Fig. 2. Interface of the program to analyze out-of-roundness

Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 4 показан пример определения величины контурной площади касания.

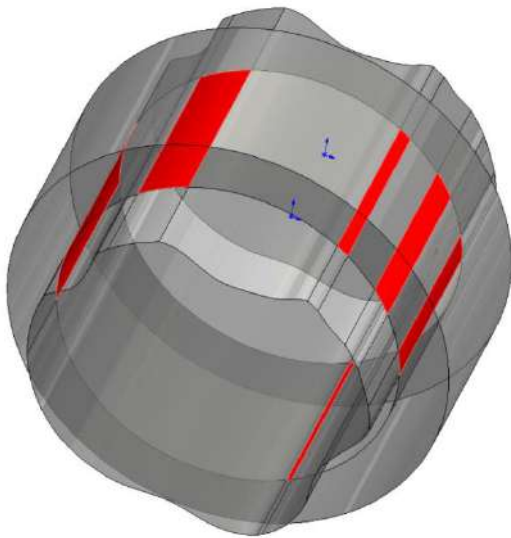


Рис. 4. Пример определения величины контурной площади касания
 Fig. 4. Example of determining the contour contact area

Используя указанный выше инструментарий, была определена зависимость изменения величины Δf_c от овальности сечения посадочной поверхности вала Δ , которая представлена на рис. 5.

На рис. 6 представлена зависимость изменения величины $\Delta C_{оп}$ от овальности сечения посадочной поверхности вала Δ .

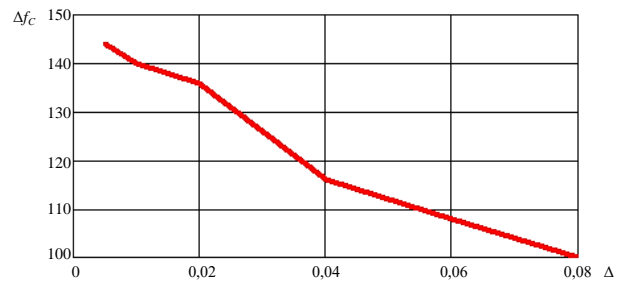


Рис. 5. Зависимость изменения величины Δf_c от овальности сечения посадочной поверхности вала Δ , мкм

Fig. 5. Relationship between a variation of Δf_c and out-of-roundness of the section of the mounting surface of shaft Δ , μm

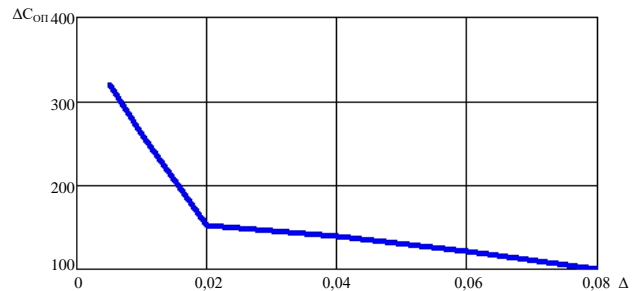


Рис. 6. Зависимость изменения величины $\Delta C_{оп}$ от овальности сечения посадочной поверхности оси колесной пары Δ , мкм

Fig. 6. Relationship between a variation of $\Delta C_{оп}$ and out-of-roundness of the section of the mounting surface of wheelset axle Δ , μm

Заключение

Таким образом, на основе выполненных расчетов было установлено, что уменьшение погрешности формы с 0,02 до 0,005 мкм не дает существенного изменения Δf_c . Однако чрезмерный рост требований к точности приводит к увеличению затрат. Таким образом, назначение допуска формы, которые ограничивает круглость в пределах 0,01-0,02 мм является оптимальным как с технической, так и с экономической точки зрения.

Анализируя нормативную документацию по назначению требований к посадочным поверхностям валов под подшипники качения (например, ГОСТ 520-71), можно сказать, что там отсутствуют сформулированные рекомендации по назначению отклонений от круглости. Поэтому, используя рассматриваемый в данной статье методологический подход, возможно определить оптимальные требования к посадочным поверхностям в части точности формы и для других подшипниковых пар.

Список источников

1. Основы взаимозаменяемости: учеб. пособие для вузов / Голыгин Н.Х., Педь С.Е., Дружинин П.В., Бойцов А.Г. М.: Изд-во МИИГАиК, 2020. 316 с.: ил.
2. Куликов А.А., Сапожников И.И. Обеспечение взаимозаменяемости в посадках колец подшипников качения // Технико-технологические проблемы сервиса. 2020. №2(52). С. 17-20.
3. Кокорев Ю.А., Звягин Ф.В. Способы расчета точностных характеристик деталей и узлов приборов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 211 с.
4. Куприянов А.Ю. Прочность соединения с натягом при наличии погрешности геометрии формы // Вестник Херсонского национального технического университета. 2015. №3. С. 145-150.
5. Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения: монография. М.: Инфра-инженерия, 2021. 356 с.
6. Огар П.М., Горохов Д.Б., Турченко А.В. Механика контактирования шероховатых поверхностей. Братск: БрГУ, 2016. 282 с.
7. Козлов А.А., Козлов А.М. Расчет режимов резания: учеб. пособие. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2017. 96 с.
8. Дудак Н.С., Касенов А.Ж. Расчет режимов резания: учеб. пособие. Алматы: Эверо, 2015. 128 с.
9. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 756 с.: ил.
10. Расчет параметров корреляционной модели профиля поверхностей, обрабатываемых резанием /

Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю.; заявитель и патентообладатель Уральский государственный университет путей и сообщения. – №2012611804; дата рег. 17.02.2012.

References

1. Golygin N.Kh., Ped S.E., Druzhinin P.V., Boitsov A.G. *Osnovy vzaimozamenyaemosti: ucheb. posobie dlya vuzov* [Basics of interchangeability: study guide for universities]. Moscow: Moscow State University of Geodesy and Cartography, 2020, 316 p. (In Russ.)
2. Kulikov A.A., Sapozhnikov I.I. Ensuring interchangeability in fitting roller bearing rings. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa* [Technical and Technological Problems of Service]. 2020;(2(52)):17-20. (In Russ.)
3. Kokorev Yu.A., Zvyagin F.V. *Sposoby rascheta tochnostnykh kharakteristik detaley i uzlov priborov* [Methods of calculating the accuracy characteristics of parts and components of instruments]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2018, 211 p. (In Russ.)
4. Kupriyanov A.Yu. Strength of a joint with tension in case of the shape geometry error. *Vestnik Kherсонского natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kherson National Technical University]. 2015;(3):145-150. (In Russ.)
5. Bezyazychny V.F. *Metod podobiya v tekhnologii mashinostroeniya: monografiya* [A similarity method in mechanical engineering technology: monograph]. Moscow: Infra-inzheneriya, 2021, 356 p. (In Russ.)
6. Ogar P.M., Gorokhov D.B., Turchenko A.V. *Mekhanika kontaktirovaniya sherokhovatykh poverkhnostey* [Rough surface contact mechanics]. Bratsk: Bratsk State University, 2016, 282 p. (In Russ.)
7. Kozlov A.A., Kozlov A.M. *Raschet rezhimov rezaniya: ucheb. posobie* [Calculation of cutting modes: study guide]. Lipetsk: Lipetsk State Technical University, 2017, 96 p. (In Russ.)
8. Dudak N.S., Kasenov A.Zh. *Raschet rezhimov rezaniya: ucheb. posobie* [Calculation of cutting modes: study guide]. Almaty: Evero, 2015, 128 p. (In Russ.)
9. Vasilyev A.S., Kutin A.A. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya* [Mechanical engineer's reference book]. In 2 vol. Vol. 1. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2018, 756 p. (In Russ.)
10. Ostapchuk A.K., Ovsyannikov V.E., Rogov E.Yu. *Raschet parametrov korrelyatsionnoy modeli profilya poverkhnostey, obrabatyvaemykh rezaniem* [Calculation of correlation model parameters of the profile of surfaces machined by cutting]. Patent RU, no. 2012611804, 2012.

Поступила 09.01.2024; принята к публикации 01.02.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 09/01/2024; revised 01/02/2024; published 27/06/2024

Рогов Евгений Юрьевич – преподаватель,
Курганский институт железнодорожного транспорта, Курган, Россия.
Email: evro-evgen@yandex.ru. ORCID 0009-0007-5918-3015

Овсянников Виктор Евгеньевич – доктор технических наук, доцент,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: vik9800@mail.ru. ORCID0000-0002-8775-0781

Кулемина Алёна Александровна – кандидат технических наук, доцент,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: kuleminaaa@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-2076-166X

Ковенский Илья Моисеевич – доктор технических наук, профессор,
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия.
Email: kovenskijim@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-3241-8084

Evgenii Yu. Rogov – Senior Lecturer,
Kurgan Institute of Railway Transport, Kurgan, Russia.
Email: evro-evgen@yandex.ru. ORCID 0009-0007-5918-3015

Viktor E. Ovsyannikov – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: vik9800@mail.ru. ORCID 0000-0002-8775-0781

Alena A. Kulemina – PhD (Eng.), Associate Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: kuleminaaa@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-2076-166X

Ilya M. Kovenskii – DrSc (Eng.), Professor,
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.
Email: kovenskijim@tyuiu.ru. ORCID 0000-0003-3241-8084

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.562.012.7
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-145-152



РАЗВИТИЕ АДАПТИВНЫХ ПРИНЦИПОВ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

Голубчик Э.М., Полякова М.А.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В условиях крупного металлургического предприятия, как правило, номенклатура выпускаемой продукции представляет собой сотни, а порой и тысячи позиций, как по маркам стали, так и по размерному сортаменту, ориентированному на огромное количество потребителей-заказчиков. При этом технологический процесс и применяемое оборудование в достаточной степени унифицировано. Однако зачастую возникает ситуация, когда появляется заказ на новый вид металлопродукции с жестко нормируемыми показателями качества, технико-технологические возможности изготовления которой на первый взгляд не всегда очевидны. В этих условиях необходимо и возможно применение адаптивных принципов управления качеством. **Цель работы.** Изучение возможности принципов технологической адаптации показателей качества применительно к иерархически сложным системам на основе выбора прецедента. **Используемые методы.** Анализ существующих иерархически сложных технологических систем, декомпозиция технологических систем на основе построения метрик и основные положения квалиметрии. **Новизна.** Разработана концепция управления показателями качества на основе их технологической адаптации к постоянно изменяющимся внешним воздействиям. **Результат.** Разработан алгоритм технологической адаптации показателей качества металлопродукции на основе прецедента в технологической системе. **Практическая значимость.** На примере проектирования технологии производства монетной ленты показаны возможности применения адаптивных принципов управления качеством металлопродукции в многовариантных технологических системах.

Ключевые слова: адаптация, показатели качества, металлопродукция, прецедент

© Голубчик Э.М., Полякова М.А., 2024

Для цитирования

Голубчик Э.М., Полякова М.А. Развитие адаптивных принципов управления качеством металлопродукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 145-152. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-145-152>



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

DEVELOPMENT OF ADAPTIVE PRINCIPLES OF METAL PRODUCTS QUALITY MANAGEMENT

Golubchik E.M., Polyakova M.A.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). In a large metallurgical enterprise, as a rule, the product range consists of hundreds and sometimes thousands of items, both by steel grade and by a size range, aimed at a huge number of customers. At the same time, the technological process and the equipment used are sufficiently unified. However, there is often a situation when a customer places an order for a new type of metal products with strictly standardized quality indicators, and the technical and technological capabilities of its manufacturing are not always obvious at first glance. In these conditions, it is necessary and possible to use adaptive principles of quality management. **Objectives.** Research is aimed at studying the possibility of principles of technological adaptation of quality indicators in relation to hierarchically complex systems based on the choice of a precedent. **Methods Applied:** the analysis of existing hierarchically complex technological systems; a decomposition of technological systems based on the construction of metrics; basic provisions of qualimetry. **Originality.** A concept has been developed to manage quality indicators based on their technological adaptation to constantly changing external influences. **Result.** An algorithm has been developed for technological adaptation of quality indicators of metal products based on a precedent in the technological system. **Practical Relevance.** Using the example of designing a technology for the production of strips for stamping coins, the authors show the possibilities to apply adaptive principles of metal products quality management in multiple-option technological systems.

Keywords: adaptation, quality indicators, metal products, precedent

For citation

Golubchik E.M., Polyakova M.A. Development of Adaptive Principles of Metal Products Quality Management. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 145-152. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-145-152>

Введение

Одной из сложно решаемых проблем современного рынка инновационных видов металлопродукции с высокой добавленной стоимостью является установление баланса желаний и запросов потребителей, с одной стороны, и технико-технологических возможностей производителей – с другой. В связи с этим появляется потребность в создании и формулировке новых подходов и концепций проектирования технологических процессов, обеспечивающих требуемый уровень качества выпускаемой продукции и, соответственно, организации такого производства.

В настоящее время в современной мировой технологической практике управления производством эффективно развиваются концепции, основанные на принципах адаптивного управления качеством продукции. Одним из таких направлений может служить применение принципов «технологической адаптации показателей качества» [1, 2]. В практике управления качеством разработаны и реализованы адаптационные алгоритмы функционирования автономных производственных систем (AMS, IMS-CA), которые базируются на когнитивных технологиях анализа и учета производственных помех, так называемый робастный подход [3, 4]. Кроме того, получают широкое внедрение методы «интеллектуального адаптивного производства». В них используются подходы на ос-

нове адаптации лиц, принимающих решения (ЛПР) по управлению технологическими процессами [5]. Продолжают развиваться методы адаптивного ведения бизнес-процессов на уровне предприятия при ее взаимодействии и адаптации с внешней средой [6]. Получают дальнейшее развитие методы адаптивного управления производством на основе оперативного анализа возникающих проблем и принятия соответствующих корректирующих мероприятий либо использующие решения адаптационных задач на основе прошлого опыта [7-10].

Согласно методологии управления сложными техническими системами, представленной в работах [11, 12], общий принцип управления системой представляет собой определенную последовательность операций по формулировке целей управления, определению объекта управления, синтезу модели и последующей реализации управления. При этом базовым в системе управления является определение и выбор прецедента. Однако описанный в работах метод выбора прецедента не рассматривается с точки зрения управления показателями качества. Наиболее проблемными с точки зрения адаптации показателей качества являются технологии, обеспечивающие выпуск металлопродукции с глубокой степенью переработки, к которой можно отнести, например, продукцию четвертого (лента, трубы) и пятого (метизы) переделов.

Материалы и методы исследования

В МГТУ им. Г.И. Носова разработан новый подход к управлению качеством, основанный на принципах технологической адаптации показателей качества металлопродукции на основе выбора прецедента и его дальнейшей адаптации [13-15]. В рассматриваемом подходе под термином «технологическая адаптация» понимается процесс целенаправленной корректировки технологической системы в соответствии с заданными критериями приспособления ее структуры и функций к условиям внешней среды. При этом должны быть обеспечены цели эффективного функционирования системы (ожидания потребителей, требования нормативной документации). Под прецедентом понимается базовый вариант технологического процесса, который позволяет сформировать максимально приближенный уровень нормируемых потребителем показателей качества металлопродукции. При этом весь процесс непосредственно адаптации представляется как набор отдельных составляющих элементов, то есть реально возможных различных направлений решения задачи освоения производства конкретного вида продукции с заданными значениями показателей качества. Таким образом, выбор вариантов заключается в определении необходимых элементов адаптации и их сочетаний с учетом адаптации прецедента (рис. 1).

Очевидно, что в условиях многовариантных технологических систем, к которым можно отнести современные производства металлопродукции с глубокой степенью переработки, для реализации процедур адаптации показателей качества проблема выбора прецедента как «наиболее подходящего аналога» является одной из наиболее сложных. Это связано с определением критерия выбора требуемого прецедента. Для решения данной задачи возможно использование подхода, в соответствии с которым необходимо провести сравнение технологического процесса, обеспечивающего достижение показателей качества в текущей базовой ситуации (например, существующий на предприятии базовый набор технологических операций) и в выбранных для анализа технологиях-прецедентах (возможная корректировка набора операций либо направления модернизации технологии и оборудования).

В разработанном подходе адаптивного управления качеством применяется метод «ближайшего соседа» или «принцип одиночной связи», который достаточно активно развит в теории информационных систем. Его основу составляет метод измерения степени близости прецедента и текущего случая по каждому признаку (показателю качества), который можно считать полезным для достижения цели. Для формализации принципа измерения формируется метрика (расстояние) на пространстве всех показателей качества. При этом в исследуемом пространстве находится точка, соответствующая рассматриваемому текущему случаю, и в рамках этой метрики определяется ближайшая к ней точка из всех точек, представляющих собой прецеденты. Непосредственная

оценка показателей качества осуществляется на основе базовых положений теории квалиметрии, то есть каждому показателю качества присваивается весовой показатель (весомость), который учитывает его относительную ценность. Общую степень близости прецедента по всем признакам (показателям качества) можно вычислить по обобщенной формуле типа

$$\frac{\sum_j w_j \cdot \text{sim}(x_{ij}, x_{kj})}{\sum_j w_j},$$

где w_j – вес j -го показателя качества; sim – функция подобия (метрика); x_{ij} и x_{kj} – значения показателя качества X_j для текущего случая и прецедента соответственно.

В условиях иерархически сложно организованных технологических систем применение методики адаптивного управления качеством на основе прецедента с использованием метода ближайшего соседа приводит к необходимости оценивать не только отдельные показатели качества продукции, но и результат коррекционного воздействия на них, а также на систему в целом. При этом количество процедур адаптации, которые необходимы для обеспечения достижения нормируемых значений показателей качества в выбранной технологической схеме производства, должно быть минимальным. Поэтому очевидно, что наиболее близким можно будет принять прецедент, позволяющий достигать цели за минимальное число шагов. В таких условиях может появиться многоуровневая метрика, так как выход на требуемый уровень качества металлопродукции может быть обеспечен не прямолинейно, а через промежуточные ее состояния. Тогда в общем случае можно представить многоуровневую метрику, где прецеденты сравниваются по состоянию до воздействия, во время воздействия и состоянию после воздействия. В отдельных случаях найденный прецедент может быть полным аналогом текущей ситуации (исходной базовой технологией).

Стадия адаптации прецедента должна содержать следующие ключевые процедуры: определение вариантов адаптации; их проверку на обеспечение требуемого уровня показателей качества; переход к производству с занесением результатов в технологическую базу данных с ее последующим накоплением.

В рамках рассматриваемого подхода адаптации показателей качества по прецеденту различают три вида соответствующих элементов технологической адаптации:

- A^1 – адаптация технологических режимов в данной операции (параметрическая адаптация);
- A^2 – адаптация технологической схемы производства (структурно-параметрическая адаптация);
- A^3 – адаптация требуемого набора показателей качества в исходном состоянии (например, свойства исходной заготовки).

Следовательно, возникает задача выбора рационального варианта адаптации прецедента (рис. 2).

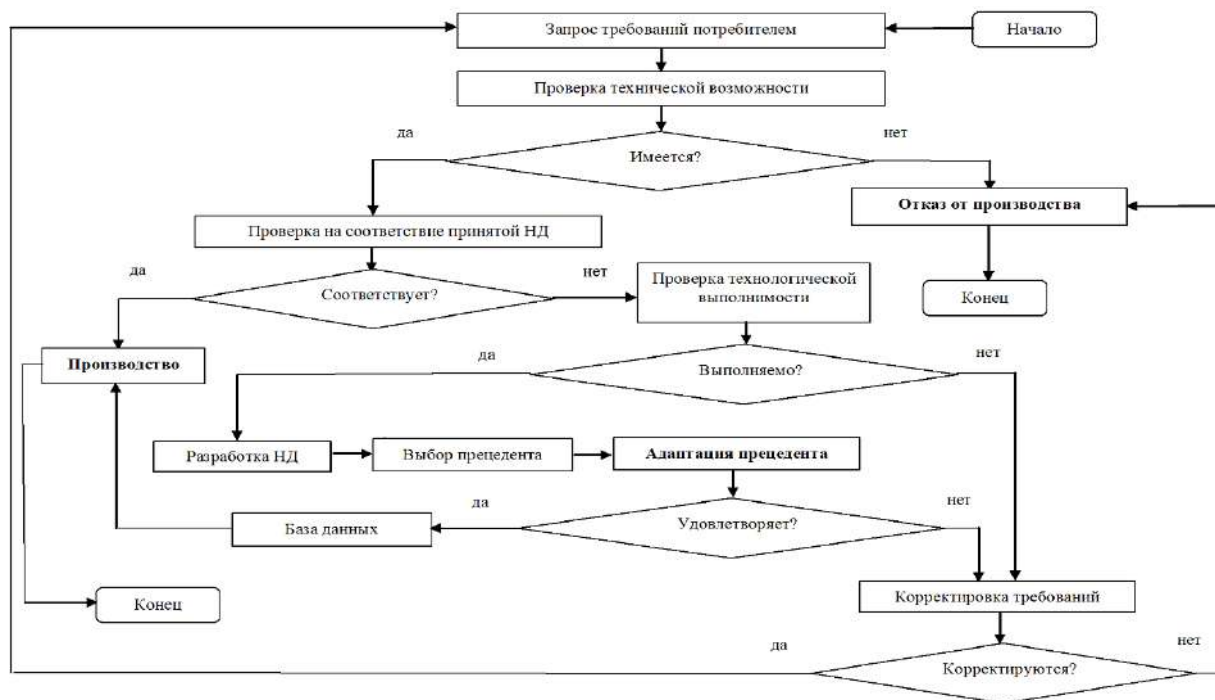


Рис. 1. Алгоритм технологической адаптации показателей качества металлопродукции на основе прецедента в технологической системе

Fig. 1. An algorithm for technological adaptation of the metal products quality indicators based on a precedent in the technological system



Рис. 2. Алгоритм адаптации прецедента в условиях технологической адаптации показателей качества

Fig. 2. An algorithm for adaptation of a precedent in conditions of technological adaptation of the quality indicators

Полученные результаты и их обсуждение

Одним из примеров реализации разработанного подхода адаптивного управления качеством на базе выбора прецедента является разработка технологии изготовления стальной холоднокатаной ленты для монетных заготовок. В качестве базовой технологии производства ленты (прецедент) была взята имеющаяся на металлургическом предприятии технология, включающая следующие основные операции: продольный роспуск широкой горячекатаной полосы (подката) на узкие полосы; солянокислотное непрерывное травление узкого горячекатаного подката; холодную прокатку травленной ленты на конечную толщину; термообработку холоднокатаной ленты в колпаковых печах с защитной азото-водородной атмосферой; дрессировку термообработанной холоднокатаной ленты; продольный роспуск дрессированной ленты на заказную ширину.

Следует отметить, что особенностью рассматриваемого производства ленты является технологическая многовариантность, то есть возможность осуществления нескольких прокаток и термообработок. Таким образом, при проектировании эффективной технологии изготовления монетной ленты возникла проблема выбора исходного прецедента. Кроме того, при выборе технологии-прецедента требовалось учитывать особенности непосредственно монетной ленты, к которым можно отнести сложно сочетаемый набор нормируемых потребителем показателей качества, среди которых наиболее значимыми являются: твердость поверхности в узком диапазоне ($HR15T = 72-76$ ед.) для обеспечения процесса чеканки и снижения при этом износа рабочего инструмента, а также для бездефектной высокоскоростной вырубki монетной заготовки, исключения частых переналадок оборудования; низкие значения шероховатости поверхности ленты (Ra не более $0,8$ мкм; влияет на расход и качество никелевого покрытия на монете); высокая точность изготовления по толщине ленты ($\Delta h = 0/-0,06$ мм), что связано с весом и геометрией монеты. При проектировании и разработке технологии изготовления монетной ленты наиболее сложным оказалось обеспечение нормируемой твердости поверхности ленты, что связано со сложностями достижения узкого диапазона твердости горячекатаного подката в силу специфики процесса горячей прокатки.

Таким образом, выбор прецедента сводился к управлению качеством по обеспечению твердости при возможной адаптации других показателей качества. При этом на основе комплексных исследований, связанных с определением химического состава стали, режимов горячей и холодной прокатки, режимов термообработки и дрессировки ленты, применялись принципы адаптации технологических режимов (эле-

мент адаптации A^3), а также адаптации характеристик подката (элемент адаптации A^2) (см. рис. 2). Причем элемент технологической адаптации, предусматривающий изменение непосредственно характеристик подката (A^3) для монетной ленты, также учитывал подбор рационального сочетания химического состава стали (был предложен химический состав стали: марка стали типа IF), а также температурных режимов горячей прокатки и смотки горячекатаной полосы в рулон.

На основе указанного выше для выработки эффективного механизма технологической адаптации по описанному алгоритму было принято решение производить контроль механических свойств горячекатаного подката. Так, с учетом нормирования показателя твердости холоднокатаной ленты HR15T проводились испытания горячекатаного подката на определение твердости по Роквеллу (HRB), выбранной в качестве единого интегрального показателя механических свойств подката. Было установлено, что независимо от применяемых технологических режимов прокатки, термообработки и дрессировки ленты с увеличением твердости исходного горячекатаного подката возрастает и твердость готовой холоднокатаной монетной ленты. Вследствие этого при выработке адаптационных решений для обеспечения требуемого уровня твердости готовой монетной ленты обязателен учет качественных характеристик подката (в рассматриваемом случае твердости HRB), чего не предусматривалось ранее в базовой технологии производства ленты.

При этом из анализа результатов проведенных исследований было определено, что для гарантированного обеспечения требуемого диапазона твердости готовой ленты $HR15T = 72-76$ ед. для выбранного прецедента необходимы следующие адаптационные условия: твердость исходного горячекатаного подката $46-49$ ед. HRB; суммарное относительное обжатие при холодной прокатке $60-75\%$; температура окончательной выдержки при рекристаллизационном отжиге ленты 730°C ; относительное обжатие при дрессировке $1,1-1,4\%$. Таким образом, при неизменности базовой технологической схемы производства ленты, характерной для выбранного прецедента, адаптационным воздействиям подверглись исходные характеристики подката и режимы технологических операций холодного передела при изготовлении указанной ленты. На рис. 3 представлено полученное частотное распределение значений показателя качества готовой монетной ленты – твердость HR15T при достижении всех остальных нормируемых показателей качества.

На рис. 4 представлено соотношение освоенных толщин монетной ленты и монет Российской Федерации.

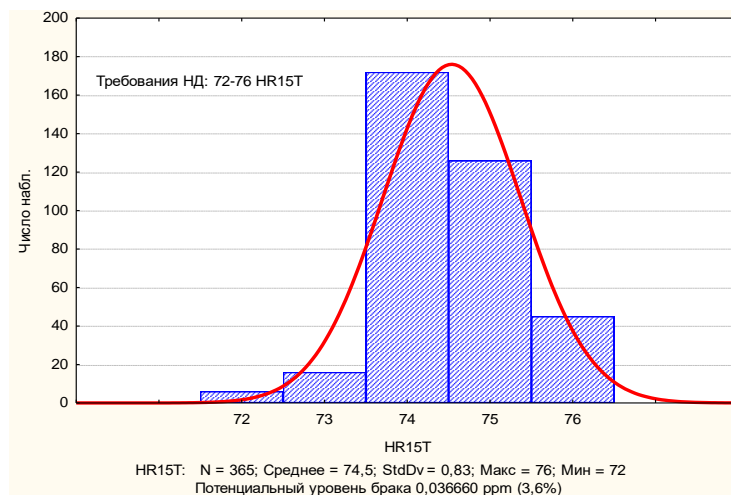


Рис. 3. Гистограмма частотного распределения твердости HR15T холоднокатаной монетной ленты
 Fig. 3. A frequency histogram of hardness HR15T of cold rolled strips for coins



Рис. 4. Освоенные толщины холоднокатаной ленты для изготовления монетных заготовок
 Fig. 4. Mastered thicknesses of cold rolled strips for manufacturing coin blanks

Заключение

Таким образом, разработанный подход адаптивного управления качеством металлопродукции на основе прецедента применительно к сложным многовариантным технологическим системам позволяет эффективно обеспечивать устойчивый баланс интересов (запросов) потребителей и возможности производителей. При этом у предприятия-производителя металлопродукции даже при явной в первом приближении невозможности обеспечить запрашиваемый потребителем уровень ее показателей качества появляется возможность проанализировать свои ресурсы и максимально использовать технологические резервы для удовлетворения интересов потребителя.

Список источников

1. Голубчик Э.М. Адаптивное управление качеством металлопродукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1(45). С. 63-69.
2. Применение адаптационных механизмов для повышения качества продукции с глубокой степенью переработки / Голубчик Э.М., Корчунов А.Г.,

Пивоварова К.Г., Лысенин А.В. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. №5. С. 131-134.

3. Park H.S., Tran N.-H. An autonomous manufacturing system for adapting to disturbances // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. October 2011, vol. 56, iss. 9-12, pp. 1159-1165.
4. Park H.S., Tran N.-H. A cognitive agent based manufacturing system adapting to disturbances // International Journal of Control, Automation and Systems. August 2012, vol. 10, iss. 4, pp. 806-816.
5. Sokol M.B. Adaptation to difficult designs: Facilitating use of new technology // Journal of Business and Psychology. Spring 1994, vol. 8, iss. 3, pp. 277-296.
6. Kim N., Pae J.H. Utilization of new technologies: organizational adaptation to business environments // Journal of the Academy of Marketing Science. June 2007, vol. 35, iss. 2, pp. 259-269.
7. Žapčević S., Butala P. Adaptive process control based on a self-learning mechanism in autonomous manufacturing systems // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. June 2013, vol. 66, iss. 9-12, pp. 1725-1743.

8. Akwei C., Zhang L. Integrating risk and performance management in quality management systems for the development of complex bespoke systems (CBSs) // *Production Planning & Control*. 2018, vol. 29(15), pp. 1275-1289.
9. Analysis and synthesis of complex technological systems / Ohrimenko O.I., Vilisova M.L., Rokotyanskaya V.V., Bidova B.B., Popovskaya A.S. // *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*. 2019, vol. 14(6), pp. 322-328.
10. Technology of Quality and Reliability of Complex Technical Systems Characteristics Stage-by-stage Improvement on Examples of Rocket-Space Technology Objects / Ivanov V.P., Zawadzki V.K., Kablova E.B., Klenovaya L.G. // *Advances in Systems Science and Applications*. 2019, vol. 19(2), pp. 1-7.
11. Растрингин Л.А., Мафжаров Н.Е. Введение в идентификацию объектов управления. М.: Энергия, 1977. 214 с.
12. Растрингин Л.А. Адаптация сложных систем // *Известия АН Латвийской ССР*. 1978. №5(370). С. 87-97.
13. Golubchik E., Polyakova M., Gulin A. Adaptive approach to quality management in combined methods of materials processing // *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 656, pp. 497-506.
14. Golubchik E.M., Polyakova M.A., Chikishev D.N. Modern approaches to product quality adaptive control // *International Journal for Quality Research*. 2024, vol. 18(1), pp. 199-208.
15. Голубчик Э.М., Полякова М.А. Особенности управления качеством металлопродукции в многообъектных технологических системах // *Качество. Инновации. Образование*. 2023. №4(186). С. 3-11.
4. Park H.S., Tran N.-H. A cognitive agent based manufacturing system adapting to disturbances. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2012;10(4):806-816.
5. Sokol M.B. Adaptation to difficult designs: Facilitating use of new technology. *Journal of Business and Psychology*. 1994;8(3):277-296.
6. Kim N., Pae J.H. Utilization of new technologies: organizational adaptation to business environments. *Journal of the Academy of Marketing Science*. 2007;35(2):259-269.
7. Žapčević S., Butala P. Adaptive process control based on a self-learning mechanism in autonomous manufacturing systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;66(9-12):1725-1743.
8. Akwei C., Zhang L. Integrating risk and performance management in quality management systems for the development of complex bespoke systems (CBSs). *Production Planning & Control*. 2018;29(15):1275-1289.
9. Ohrimenko O.I., Vilisova M.L., Rokotyanskaya V.V., Bidova B.B., Popovskaya A.S. Analysis and synthesis of complex technological systems. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*. 2019;14(6):322-328.
10. Ivanov V.P., Zawadzki V.K., Kablova E.B., Klenovaya L.G. Technology of quality and reliability of complex technical systems characteristics stage-by-stage improvement on examples of rocket-space technology objects. *Advances in Systems Science and Applications*. 2019;19(2):1-7.
11. Rastrigin L.A., Mafzharov N.E. *Vvedenie v identifikatsiyu obektov upravleniya* [Introduction to identification of control objects]. Moscow: Energiya, 1977, 214 p. (In Russ.)
12. Rastrigin L.A. Adaptation of complex systems. *Izvestiya AN Latvyskoy SSR* [News of the Academy of Sciences of the Latvian Soviet Socialist Republic]. 1978;(5(370)):87-97. (In Russ.)
13. Golubchik E., Polyakova M., Gulin A. Adaptive approach to quality management in combined methods of materials processing. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;656:497-506.
14. Golubchik E.M., Polyakova M.A., Chikishev D.N. Modern approaches to product quality adaptive control. *International Journal for Quality Research*. 2024;18(1):199-208.
15. Golubchik E.M., Polyakova M.A. Features of steel products quality management in multi-object technological systems. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education]. 2023;(4(186)):3-11. (In Russ.)

References

Поступила 26.03.2024; принята к публикации 11.04.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 26/03/2024; revised 11/04/2024; published 27/06/2024

Голубчик Эдуард Михайлович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: e.golubchik@magtu.ru. ORCID 0000-0003-3064-1311

Полякова Марина Андреевна – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

Eduard M. Golubchik – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: e.golubchik@magtu.ru. ORCID 0000-0003-3064-1311

Marina A. Polyakova – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: m.polyakova@magtu.ru. ORCID 0000-0002-1597-8867

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.562, 621.763
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-153-162



ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЗАДАНЫМИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Антипова Т.Н., Бабкин Д.С.

Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова, Королев, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В результате анализа исследований по управлению качеством композиционных материалов выявлено, что оценке и управлению информационного обеспечения не уделялось должного внимания. Следовательно, при применении информационных систем с ненадлежащим качеством падает эффективность управления процессами, что приводит к ухудшению качества выпускаемой продукции. Анализируя существующие информационные подсистемы для управления качеством композиционных материалов, следует отметить отсутствие системного подхода к их построению. При построении концептуальных схем управления, как правило, учитываются три основных этапа, а именно контроль исходных материалов, технологических параметров и показателей качества конечной продукции. В связи с этим невозможно выполнение перспективных задач планирования, для чего необходима прогнозная информация. Следовательно, требуется совершенствование элементов методологии построения информационных подсистем и разработки концептуальных положений для обоснования новой структуры информационного обеспечения. **Цель работы.** Разработать основные положения концепции и структуру системы информационного обеспечения производства металломатричного слоистого композиционного материала системы Ti-Cu, включающую весь комплекс управляемых факторов и обеспечивающую планирование и оперативное управление технологическим процессом. **Используемые методы.** Представленная работа основана на методологии системного и процессного подходов, также применены методы графического и математического моделирования, сравнительный и риск-ориентированный анализ. **Новизна.** Разработаны основные положения концепции информационного обеспечения производства металломатричных слоистых композиционных материалов. Обоснована структура системы информационного обеспечения производства изделий из металломатричного композиционного материала. **Результат.** Полученные результаты исследования являются развитием теоретических положений в области управления качеством продукции из металломатричного слоистого композиционного материала. **Практическая значимость.** Разработанные основные положения концепции и структура системы информационного обеспечения позволяют осуществлять оперативное управление технологическими операциями с учетом характеристик применяемого оборудования, что гарантирует соблюдение всех технологических операций и получение качественной продукции с заданными заказчиком свойствами. Данная система информационного обеспечения включает весь комплекс управляемых факторов и позволяет осуществлять мониторинг на всех стадиях производства и планирование производства новой продукции.

Ключевые слова: управление качеством продукции, информационное обеспечение, концепция, модели, металломатричный слоистый композиционный материал

© Антипова Т.Н., Бабкин Д.С., 2024

Для цитирования

Антипова Т.Н., Бабкин Д.С. Обоснование структуры информационного обеспечения системы управления качеством металломатричных слоистых композиционных материалов с заданными потребительскими свойствами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 153-162. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-153-162>



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

PROVIDING A RATIONALE FOR THE STRUCTURE OF INFORMATION SUPPORT FOR THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM OF METAL MATRIX LAYERED COMPOSITE MATERIALS WITH SPECIFIC CONSUMER PROPERTIES

Antipova T.N., Babkin D.S.

Leonov University of Technology, Korolev, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The analysis of research on quality management of composite materials revealed that due attention was not paid to the assessment and management of information support. Consequently, when using information systems with inadequate quality, the efficiency of process management decreases leading to deterioration in the quality of products. Analyzing existing information subsystems for managing the quality of composite materials, it should be noted that there is no systematic approach to their construction. When constructing conceptual management schemes, as a rule, three main stages are taken into account, namely control of source materials, technological parameters and quality indicators of the final product. In this regard, it is impossible to carry out long-term planning tasks requiring forecast information. Consequently, it is necessary to improve the elements of the methodology for constructing information subsystems and developing conceptual provisions to provide a rationale for the new structure of information support. **Objectives.** The study aims at developing the basic principles of the concept and the structure of the information support system for the production of metal matrix layered composite material of the Ti-C-Cu system, which includes the entire complex of controlled factors and ensures planning and operational control of the technological process. **Methods Applied.** The presented research is based on the methodology of system and process approaches; we also apply methods of a graphical and mathematical simulation, and a comparative and risk-based analysis. **Originality.** We developed the main provisions of the concept of information support for the production of metal matrix layered composite materials. The article provides the rationale for the structure of the information support system for manufacturing products from metal matrix composite materials. **Result.** The obtained research results are the development of theoretical principles in the field of quality management of products made from metal matrix layered composite materials. **Practical Relevance.** The developed basic provisions of the concept and the structure of the information support system contribute to the operational management of technological operations, taking into account the characteristics of the equipment used, which guarantees compliance with all technological operations and the production of high-quality products with the properties specified by the customer. This information support system includes the entire complex of controllable factors, monitors all stages of production and plans manufacturing of new products.

Keywords: product quality management, information support, concept, models, metal matrix layered composite material

For citation

Antipova T.N., Babkin D.S. Providing a Rationale for the Structure of Information Support for the Quality Management System of Metal Matrix Layered Composite Materials with Specific Consumer Properties. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 153-162. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-153-162>

Введение

На основе анализа опубликованных источников выявлено, что научному обоснованию структуры информационного обеспечения уделялось недостаточно внимания. Также не в полной мере проанализирован и обобщен накопленный опыт в этой области, что препятствует разработке единого методологического подхода для применения в системах управления различного уровня и назначения [1-3].

Одним из направлений повышения эффективности российской авиационной и ракетно-космической техники является применение композиционных материалов, в том числе металломатричных слоистых композиционных материалов, основными характеристиками которых являются удельная прочность, плотность, жесткость и жаропрочность, которые можно использовать в качестве конструкционных [4-8].

Для управления качеством металломатричных слоистых композиционных материалов требуется научно обоснованная информационная подсистема (информационное обеспечение). Система информационного обеспечения предназначена для сбора, анализа и хранения информации, необходимой для принятия управленческих решений и, прежде всего, для обоснования технологии производства.

В результате анализа опубликованных источников выявлено, что в настоящее время информационное обеспечение производства композиционных материалов направлено только на решение оперативных задач управления и не охватывает весь комплекс факторов, влияющих на качество продукции [9, 10].

Следовательно, научные исследования по совершенствованию информационных подсистем являются актуальными, особенно учитывая, что большинство подсистем эксплуатируются в динамических условиях, которые связаны как с течением времени, так и с

изменением требований заказчика и должны обеспечить не только оперативное управление, но и планирование изготовления новой продукции.

Таким образом, целью данного исследования является обоснование структуры информационного обеспечения системы управления качеством металлматричных слоистых композиционных материалов с заданными потребительскими свойствами.

Методика исследований

В данной работе были применены методы системного и процессного подходов, методы графического и математического моделирования, сравнительный и риск-ориентированный анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

Информационное обеспечение непрерывно связано с технологией изготовления металлматричных композиционных материалов, в том числе нового металлматричного слоистого композиционного материала системы Ti-Cu-C. На начальном этапе производства объект управления представляет собой совокупность дискретных исходных материалов: углеродный холст, газ монометилсилан, фольги титана и меди. Особенностью объекта управления является то, что вследствие прохождения технологических операций объект управления постоянно преобразовывается до получения конечного материала. Следовательно, данные преобразования можно представить в виде потока веществ (рис. 1).

Преобразование объекта управления на этапах производства происходит путем применения управляющих воздействий на каждой стадии изготовления металлматричного слоистого композиционного материала.

На основании изучения существующих методологических подходов и концептуальных моделей построения информационных подсистем сделан вывод об их недостаточности для решения задач управления производством металлматричных слоистых композиционных материалов. Одним из основных элементов методологии является концепция информационных под-

систем в системах управления качеством металлматричных слоистых композиционных материалов.

Предлагаются следующие основные положения (требования) концепции подсистемы информационного обеспечения производства металлматричных композиционных материалов:

1. Информационную подсистему следует рассматривать как неотъемлемую часть системы управления производством.

2. Информационная подсистема ориентирована на потребителя.

3. Информационная подсистема предназначена для сбора, хранения, анализа ретроспективной и прогнозной информации для оперативного управления и планирования создания перспективных материалов.

4. Информационная подсистема включает следующие элементы: показатели качества конечной продукции, характеристики объекта управления (полуфабрикаты по каждой операции), управляющие воздействия, информацию обратной связи (по каждому полуфабрикату и конечной продукции), характеристики исходных материалов и параметров оборудования.

5. Информационная подсистема должна иметь возможность обосновывать технологические параметры для получения заданных показателей качества на основе соответствующих математических и графических моделей.

6. Информационная подсистема должна прогнозировать возможность изготовления новой продукции с заданными свойствами с учетом технологических возможностей и на основе экспериментально полученных математических моделей.

7. Информация должна отвечать требованиям по достоверности, актуальности, своевременности, достаточности, а также другим требованиям, исходя из специфических требований формирования информационных баз данных.

8. Информационная подсистема должна иметь структурированную процедуру формирования информационной базы.

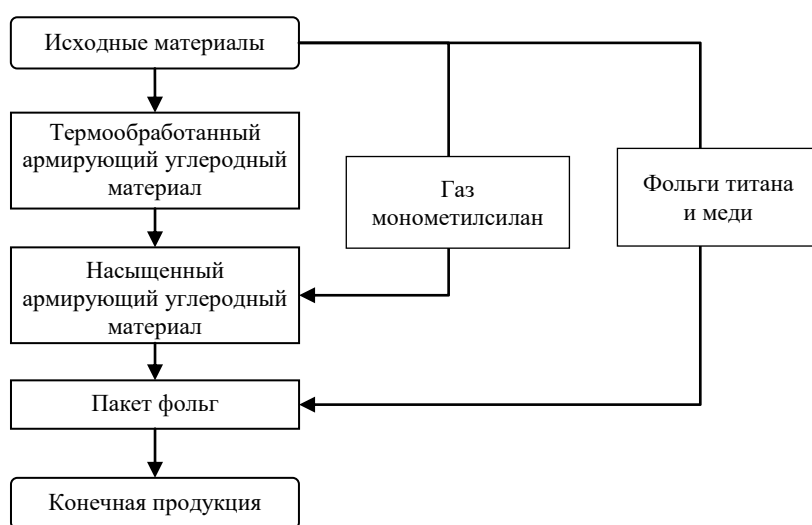


Рис. 1. Блок-схема потока веществ при изготовлении металлматричного слоистого композиционного материала
Fig. 1. Block diagram of the flow of substances in manufacturing the metal matrix layered composite material

Таким образом, на основании представленной концепции разработана следующая структура информационного обеспечения изготовления металломатричных слоистых композиционных материалов (рис. 2), включающая следующие блоки:

- оценки качества конечной продукции – основываются на требованиях заказчика и соответствующей нормативной документации (ГОСТ, СТО, ТУ и др.) [11-13];
- оценки качества исходных материалов – основываются на анализе рынка и требований технологии;

- оценки качества промежуточной продукции (полуфабрикатов);
- управляющих воздействий (технологические параметры);
- характеристик средств реализации управляющих воздействий (оборудование);
- прогнозной информации, обеспечивающей необходимые данные для планирования производства новой продукции, совершенствования технологических процессов, наличия или разработки необходимого оборудования.



Рис. 2. Структура информационной подсистемы производства металломатричных слоистых композиционных материалов

Fig. 2. Structure of the information subsystem for manufacturing metal matrix layered composite materials

Предлагается математическую модель, описывающую процесс формирования показателей качества продукции, представить в виде функции характеристик исходных материалов, полуфабрикатов, оборудования и параметров технологических операций:

$$y_i = f(a_1, \dots, a_n; x_1, \dots, x_n; c_1, \dots, c_n; b_1, \dots, b_n), \quad (1)$$

где a_n – характеристика n -го исходного материала; x_n – n -й параметр технологической операции; c_n – n -я характеристика качества полуфабриката; b_n – n -я характеристика оборудования; y_n – n -й показатель качества конечной продукции (МСКМ).

Информационное обеспечение является неотъемлемой частью системы управления качеством изготовления металломатричного слоистого композиционного материала (рис. 3) и включает следующие блоки:

1. Блок исходных материалов:

- a_1 – гидросплетенный углеродный холст;
- a_2 – газ монометилсилан;
- a_3 – фольги титана и меди.

2. Блок технологических (управляющих) параметров:

- X_i^1 – технологические параметры на этапе термообработки углеродного армирующего холста (температура, время выдержки);
- X_i^2 – технологические параметры на этапе нанесения интерфазного покрытия на углеродный армирующий холст (температура, время выдержки, давление, скорость осаждения, расход газа);
- X_i^3 – технологические параметры на этапе формирования пакетов фольг (толщина, схема выкладки);
- X_i^4 – технологические параметры на этапе горячего вакуумного прессования (температура, время выдержки, давление, степень вакуумирования).

3. Блок характеристик полуфабрикатов:

- C_1 – характеристики термообработанного углеродного холста;
- C_2 – характеристики термообработанного углеродного холста с нанесенным интерфазным покрытием;
- C_3 – характеристики пакета с чередующимися в определённом порядке углеродного холста, фольги титана и фольги меди.

4. Блок характеристик оборудования:

- b_1 – характеристики муфельной печи;
- b_2 – характеристики печи химического осаждения из газовой фазы;
- b_3 – характеристики ручных гильотинных ножниц;
- b_4 – характеристики вакуумной печи горячего прессования.

После получения конечной продукции необходимо провести анализ соответствия металломатричного слоистого композиционного материала требованиям заказчика. Требования заказчика представляют собой численные характеристики, обусловленные назначением и свойствами, необходимыми для выполнения поставленных задач.

Требования заказчика определяются в зависимости от предполагаемой сферы применения материала (поставленной цели) и, соответственно, могут варьироваться.

Следовательно, неотъемлемой частью оценки качества продукции является блок сравнения показателей качества продукции (МСКМ) с предъявляемыми требованиями от заказчика по следующей формуле:

$$K_{n \min} \leq y_4 < K_{n \max},$$

где $K_{n \min}$ – минимальные требуемые показатели качества конечной продукции, полученные от заказчика; $K_{n \max}$ – максимальные требуемые показатели качества конечной продукции, полученные от заказчика; y_4 – показатели качества конечной продукции.

Если данные требования выполняются, продукция отправляется заказчику, если результат не соответствует, тогда требуется проведение анализа полученных результатов и внесение изменений в систему управления получения металломатричного слоистого композиционного материала.

На основании математической модели (формула (1)) разработан комплекс математических зависимостей характеристик качества полуфабрикатов для каждой операции и показателей качества конечной продукции.

В результате первой операции получается полуфабрикат – термообработанный армирующий углеродный холст:

$$C_1 = f(a_1; x_i^1; b_i^1). \quad (2)$$

Вторая операция – нанесение интерфазного покрытия на армирующий углеродный холст:

$$C_2 = f(c_1; a_2; x_i^2; b_i^2). \quad (3)$$

Третья операция – формирование пакетов фольг:

$$C_3 = f(c_2; a_3; x_i^3; b_i^3). \quad (4)$$

Четвертая операция – вакуумное горячее прессование:

$$y_4 = f(c_3; x_i^4; b_i^4). \quad (5)$$

Также значение каждого технологического воздействия x_n является функцией характеристик оборудования b_i на каждом этапе технологического процесса:

$$X_n^i = f(b_1, b_2, \dots, b_i). \quad (6)$$

Принципиальной новизной модели (рис. 3) системы управления являются элементы, которые связаны вещественными и информационными потоками, характеризуют специфику производства металломатричного слоистого композиционного материала с учетом характеристик оборудования и требований пооперационного контроля характеристик полуфабрикатов, что гарантирует надлежащий уровень качества конечной продукции.

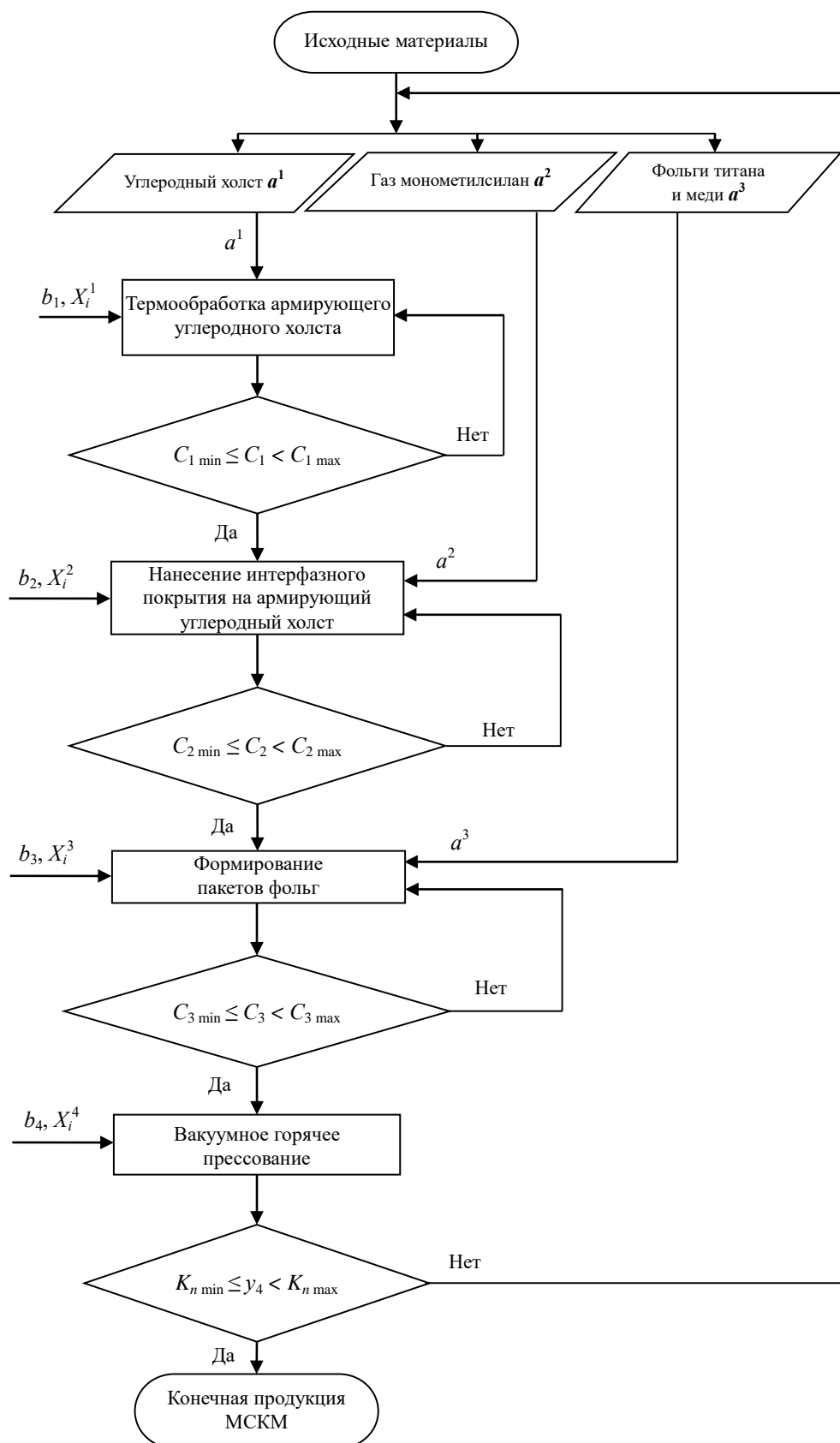


Рис. 3. Блок-схема системы управления качеством изготовления металломатричного слоистого композиционного материала

Fig. 3. Block diagram of the quality management system for manufacturing a metal matrix layered composite material

Отличительной особенностью создания нового металломатричного слоистого композиционного материала (системы Ti-Cu-C) является штучное производство, содержащее ручную сборку пакетов фольг. Данную операцию предлагается оценивать как критичную с повышенным уровнем риска, так как после данного этапа брак невозможно исправить. Для оценки влияния человеческого фактора предлагается ввести в блок технологических параметров новую характеристику – приоритетное число рисков. Для оценки влияния человеческого фактора на качественные характеристики получаемого на данном этапе полуфабриката был проведен анализ рисков (табл. 1).

$$ПЧР = O \cdot S, \tag{7}$$

где ПЧР – приоритетное число рисков; O – оценка вероятности появления риска, шт.; S – оценка значимости последствий каждого риска в баллах.

Таблица 1. Результаты оценки экспертов значимости последствий каждого риска в баллах
Table 1. Results of the expert assessment of the significance of the consequences of every risk in points

Этап	1	2	3	4	5	6
Оценка значимости последствий каждого риска по операциям в баллах S	2	3	2	5	1	1

После чего в процессе изготовления была получена статистика по количеству брака на 100 изготовленных изделий (табл. 2).

Таким образом, можно вычислить приоритетное число рисков (ПЧР) для каждого риска по формуле (7) и частоту появления брака по формуле

$$W = \frac{m}{\sum n}, \tag{8}$$

где W – относительная частота возникновения события; m – количество брака, шт.; $\sum n$ – общее количество изделий.

Таблица 2. Расчет приоритетного числа рисков на этапах изготовления металломатричного слоистого композиционного материала
Table 2. Calculation of the priority number of risks at the stages of manufacturing the metal matrix layered composite material

Этап	1	2	3	4	5	6
Количество брака	0	1	0	4	1	0
Частота возникновения брака	0	0,01	0	0,04	0,01	0
ПЧР	0	0,03	0	0,2	0,01	0

Высокая частота появления брака на четвертом этапе создания изделия, а именно сборка пакетов

фольг, обусловлена большим влиянием человеческого фактора. Следовательно, рекомендуется внедрять методы автоматизированной сборки пакетов фольг на данном этапе производства для минимизации влияния человеческого фактора и сокращения количества бракованной продукции.

Завершающим этапом технологического процесса является горячевакуумное прессование. В результате данной операции получается конечная продукция, а именно металломатричный слоистый композиционный материал, одним из главных показателей качества которого является толщина. Для оценки возможности создания перспективных материалов с улучшенными свойствами, то есть большей или меньшей толщиной конечной продукции, необходимо изучить возможности технологии и соответствующего оборудования. Для этого были проведены экспериментальные исследования по выявлению зависимости показателя качества продукции (толщины) от технологического параметра (температуры) на завершающем этапе изготовления.

На рис. 4 представлена графическая и математическая модели зависимости толщины конечной продукции от температуры спекания.

Данная модель позволяет определить наименьшую и наибольшую возможную (прогнозируемую) температуру спекания для получения необходимой толщины пакета при неизменной схеме выкладки и количестве слоев, следовательно, можно спрогнозировать диапазон технологических параметров для получения продукции с перспективными свойствами, то есть планировать ее выпуск.

При данной схеме выкладки обоснована перспективная возможность изменения конечной толщины продукции, как одного из основных показателей качества металломатричного слоистого композиционного материала, от технологических параметров. При этом температура спекания может варьироваться от 800 до 1900°C, что связано с возможностями оборудования и физико-механическими процессами. Таким образом, необходимо включить в структуру информационного обеспечения блок прогнозной информации.

Предлагается, что информационное обеспечение системы управления качеством металломатричного слоистого композиционного материала (Ti-Cu-C) должно иметь следующую структуру:

- показатели качества продукции из металломатричного слоистого композиционного материала системы Ti-Cu;
- характеристики исходных материалов;
- параметры технологических операций;
- характеристики полуфабрикатов;
- характеристики оборудования, применяемого в процессе выполнения технологических операций при изготовлении МСКМ;
- прогнозная информация.

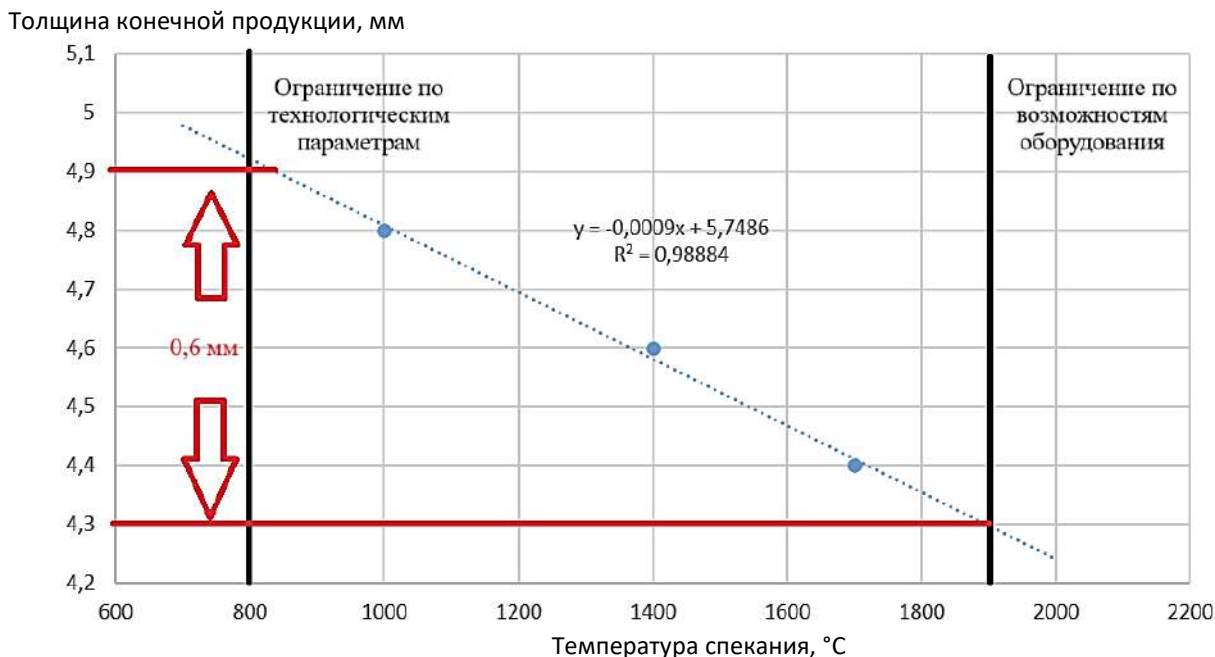


Рис. 4. Графическая и математическая модель зависимости толщины конечной продукции h , мм, от температуры спекания

Fig. 4. A graphic and mathematical model of the dependence relation between thickness of finished product h , mm, and sintering temperature

Заключение

1. Разработаны основные положения концепции, которые основаны на системном подходе к построению информационного обеспечения системы управления качеством металлматричных слоистых композиционных материалов, реализуются требования к структуре информационной подсистемы, гарантирующей получение качественной информации для оперативного управления и планирования создания перспективных материалов.

2. Разработаны концептуальная модель управления качеством металлматричного слоистого композиционного материала Ti-C-Si и структура информационного обеспечения, основанные на методологии системного и процессного подходов, учитывающих особенности производства и пооперационный характер формирования показателей качества продукции, что позволяет осуществлять мониторинг на всех стадиях производства, оценивать качество продукции и планировать выпуск новых материалов.

3. Разработан комплекс математических моделей, описывающих процесс формирования показателей качества продукции, зависимостей характеристик качества полуфабрикатов от технологических параметров, характеристик исходных материалов и оборудования для каждой операции.

4. Для оценки влияния человеческого фактора на качественные характеристики получаемого полуфабриката (пакета фольг) на одном из этапов технологии был проведен анализ рисков появления брака. Рекомендуется для снижения негативного влияния человеческого фактора внедрять методы автоматизиро-

ванной сборки пакетов фольг на данном этапе производства металлматричного слоистого композиционного материала системы Ti-Cu-S.

5. На основе экспериментальных исследований получены графическая и математическая зависимости показателя качества продукции (толщины) от технологического параметра (температуры) на завершающем этапе изготовления, ограниченные возможностями оборудования и физико-механическими процессами. Данные модели позволяют спрогнозировать диапазон технологических параметров для практической реализации продукции с перспективными свойствами, то есть планировать ее выпуск с учетом требований заказчика и возможностями оборудования.

Список источников

1. Антипова Т.Н., Бабкин Д.С. Моделирование процесса вакуумного горячего прессования при создании металлматричных композиционных материалов // Информационно-технологический вестник. 2022. №1(31). С. 162-169.
2. Антипова Т.Н., Бабкин Д.С. Разработка процессно-ориентированной модели технологии создания металлматричных композиционных материалов с применением вакуумного горячего прессования // Информационно-технологический вестник. 2022. №4(34). С. 147-155.
3. Антипова Т.Н., Олешко А.Ю. Методические основы управления качеством продукции из волокнистых металлокомпозиций // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. №1. С. 55-62.

4. Исследование межфазного взаимодействия на границе раздела в системе Ti-C с отечественными титановыми сплавами классов $\alpha + \beta$ и псевдо α / Сидоров Д.В., Серпова В.М., Заводов А.В., Шавнев А.А. // Физика и химия обработки материалов. 2020. №5. С. 75-81. DOI: 10.30791/0015-3214-2020-5-75-81
5. Углетитановые композиты: микроструктура, прочность и трещиностойкость / С.Т. Милейко, С.Н. Галышев, А.А. Колчин, В.В. Кедров, О.Ф. Шахлевич, М.Ю. Никонович, Н.А. Прокопенко // Композиты и наноструктуры. 2019. Т. 11. Вып. 4(44). С. 147-152.
6. Even C., Arvieu C., Quenisset J.M. Powder route processing of carbon fibers reinforced titanium matrix composites // Composites Science and Technology. 2008, vol. 68, pp. 1273-1281.
7. Melt Infiltration Casting of Alumina Silicon Carbide and Boron Carbide Reinforced Aluminum Matrix Composites / A. Kalkanli, T. Durmaz, A. Kalemtaş, G. Arslan // Journal of Material Sciences & Engineering. 2017, vol. 6, pp. 1-5.
8. Katzman H. Fibre coatings for the fabrication of graphite-reinforced magnesium composites // Journal of Materials Science. 1987, vol. 22, no 1, pp. 144-148.
9. Гращенко Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 264-271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271
10. Разработка структуры нормативного документа на металлопродукцию на основе принципа опережающей стандартизации / Снимшиков С.В., Полякова М.А., Лимарев А.С., Харитонов В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т.17. №1. С. 86-93. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-86-93>
11. ГОСТ Р 58062-2018. Ткани на основе углеродных волокон. Технические требования и методы испытаний.
12. ГОСТ 22178-76. Листы из титана и титановых сплавов. Технические условия (с Изменениями № 1-5).
13. ГОСТ 1173-2006. Фольга, ленты, листы и плиты медные. Технические условия.
- pressing. *Informatsionno-tekhnologicheskiiy vestnik* [Information and Technology Bulletin]. 2022;(4(34)): 147-155. (In Russ.)
3. Antipova T.N., Oleshko A.Yu. Basic procedures of product quality control for fiber metal composites. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020;18(1):55-62. (In Russ.)
4. Sidorov D.V., Serpova V.M., Zavodov A.V., Shavnev A.A. Study on the interphase interaction at the interface in the Ti-C system with Russian titanium alloys of the $\alpha + \beta$ and pseudo α classes. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Treatment]. 2020;(5):75-81. (In Russ.) DOI: 10.30791/0015-3214-2020-5-75-81
5. Mileiko S.T., Galyshev S.N., Kolchin A.A., Kedrov V.V., Shakhlevich O.F., Nikonovich M.Yu., Prokopenko N.A. Carbon-fibre/titanium matrix composites: microstructure, strength and fracture toughness. *Kompozity i nanostruktury* [Composites and Nanostructures]. 2019;11(4(44)):147-152. (In Russ.)
6. Even C., Arvieu C., Quenisset J.M. Powder route processing of carbon fibers reinforced titanium matrix composites. *Composites Science and Technology*. 2008;68:1273-1281.
7. Kalkanli A., Durmaz T., Kalemtaş A., Arslan G. Melt infiltration casting of alumina silicon carbide and boron carbide reinforced aluminum matrix composites. *Journal of Material Sciences & Engineering*. 2017;6:1-5.
8. Katzman H. Fibre coatings for the fabrication of graphite-reinforced magnesium composites. *Journal of Materials Science*. 1987;22(1):144-148.
9. Grashchenkov D.V. Strategy of development of non-metallic materials, metal composite materials and heat shielding. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies]. 2017;(S):264-271. (In Russ.) DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271
10. Snimshchikov S.V., Polyakova M.A., Limarev A.S., Kharitonov V.A. Development of a structure of norms for steel products based on a principle of advanced standardization. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2019;17(1):86-93. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2019-17-1-86-93>
11. State standard GOST R 58062-2018. Fabrics based on carbon fibers. Technical requirements and test methods.
12. State standard GOST 22178-76. Sheets of titanium and titanium alloys. Specifications (including Amendments No. 1-5).
13. State standard GOST 1173-2006. Copper foil, tapes, sheets and plates. Specifications.

References

1. Antipova T.N., Babkin D.S. Simulation of the vacuum hot pressing process in manufacturing metal matrix composites. *Informatsionno-tekhnologicheskiiy vestnik* [Information and Technology Bulletin]. 2022;(1(31)):162-169. (In Russ.)
2. Antipova T.N., Babkin D.S. Development of a process-oriented model of the technology for manufacturing metal matrix composites, using vacuum hot

Поступила 19.03.2024; принята к публикации 17.04.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 19/03/2024; revised 17/04/2024; published 27/06/2024

Антипова Татьяна Николаевна – доктор технических наук, профессор, Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова, Королев, Россия.
Email: antipova@ut-mo.ru.

Бабкин Дмитрий Сергеевич – аспирант, Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова, Королев, Россия. Email: tevtonez9@yandex.ru.

Tatyana N. Antipova – DrSc (Eng.), Professor, Leonov University of Technology, Korolev, Russia.
Email: antipova@ut-mo.ru.

Dmitry S. Babkin – postgraduate student, Leonov University of Technology, Korolev, Russia.
Email: tevtonez9@yandex.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.562
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-163-169



КОНЦЕПЦИЯ ВИРТУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ПРИ АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Хомяков Н.В.

Российский технологический университет «Московский институт радиотехники, электроники и автоматики»,
Москва, Россия

Аннотация. В современном мире с развитием цифровых технологий компаниям необходимо поддерживать достаточный уровень конкурентоспособности для сохранения востребованности на рынке. В связи с этим задачей каждого предприятия становится усовершенствование своих процессов для повышения качества продукции и сокращения отходов производства. Одним из инструментов грядущей цифровизации является аддитивное производство, которое, в отличие от субтрактивного производства, позволяет добиться большей кастомизации и меньших трудозатрат. Целью данной работы является изучение возможности интеграции цифрового двойника в процесс аддитивного производства для повышения качества выпускаемой продукции. Обеспечение качества является одной из основных задач аддитивного производства. Меры по обеспечению качества в процессе производства и, в частности, проверка качества готовых деталей требуют много времени и средств. Большинство существующих подходов к обеспечению качества были разработаны для традиционных методов производства, таких как фрезерование или токарная обработка, и оптимизировались с течением времени. Из-за уникальных характеристик процесса эти подходы нелегко применить к аддитивному производству. Новизна заключается в разработке концепции виртуального контроля деталей на основе цифрового двойника в аддитивном производстве. В результате представлен подход виртуального контроля деталей на основе цифрового двойника в аддитивном производстве, описана концепция цифрового двойника и определен сценарий использования для обеспечения качества изделий. Изученная концепция может использоваться в качестве одного из возможных решений для реализации целостного подхода к обеспечению качества по всей технологической цепочке аддитивного производства.

Ключевые слова: цифровая трансформация, Индустрия 4.0, 3D-печать, аддитивная технология, цифровой двойник

© Хомяков Н.В., 2024

Для цитирования

Хомяков Н.В. Концепция виртуального контроля качества деталей при аддитивном производстве на основе цифрового двойника // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 163-169. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-163-169>



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

A CONCEPT OF PART QUALITY VIRTUAL CONTROL IN ADDITIVE MANUFACTURING BASED ON A DIGITAL TWIN

Khomyakov N.V.

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract. In the modern world, with the development of digital technologies, companies need to maintain a sufficient level of competitiveness to remain relevant in the market. Therefore, a crucial task for every enterprise is to improve their processes to enhance the product quality and reduce production waste. One of the tools of the upcoming digitalization is additive manufacturing, which, unlike subtractive manufacturing, provides for greater customization and lower labor costs. The aim of this study is to explore the possibility of integrating a digital twin into the additive manufacturing process to enhance the quality of the produced goods. Quality assurance is one of the key tasks in additive manufacturing. Measures for quality assurance in the production process and, particularly, the inspection of the quality of finished parts, require a significant amount of time and resources. Most existing approaches to quality assurance have been developed for conventional manufacturing methods such as milling or turning and have been optimized over time. However, these approaches are not easily applicable to additive manufacturing due to unique characteristics of the process. Originality lies in developing the concept of part virtual control based on the digital twin in additive manufacturing. As a result, the article presents an approach to part virtual control based on the digital twin in additive manufacturing, describes the concept of the digital twin, and defines a usage scenario for ensuring the product quality. The concept under study can be used as one of the possible solutions for implementing a holistic approach to quality assurance throughout the technological chain of additive manufacturing.

Keywords: digital transformation, Industry 4.0, 3D printing, additive technology, digital twin

For citation

Khomyakov N.V. A Concept of Part Quality Virtual Control in Additive Manufacturing Based on a Digital Twin. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 163-169. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-163-169>

Введение

Технологии аддитивного производства (АП) прошли путь от прототипирования до полноценной технологии, позволяющей производить функциональные детали конечного использования из различных материалов. Благодаря преимуществам перед традиционным субтрактивным производством, таким как проектирование изделий любой конфигурации и массовая кастомизация, аддитивное производство получило распространение во многих отраслях промышленности [1-4]. Помимо значительных преимуществ по сравнению с традиционными производственными технологиями, более широкому распространению аддитивного производства в отрасли препятствует ряд проблем. Обеспечение качества является одной из основных задач аддитивного производства [5, 6]. В связи с уникальными характеристиками процесса и проблемами аддитивного производства для развития технологии необходимы новые целостные подходы к обеспечению качества.

Концепция цифрового двойника – это один из многообещающих подходов к цифровизации технологической цепочки аддитивного производства. Некоторые из проблем применения аддитивных технологий можно решить путем внедрения цифрового двойника. Он имеет большой потенциал, особенно в обеспечении качества. Поэтому в данной статье

предлагается концепция виртуального контроля деталей на основе цифрового двойника.

Обеспечение качества в аддитивном производстве

Поддержание единообразия в аддитивном производстве оказалось сложной задачей, поскольку незначительные изменения в процессе, материале или геометрии могут повлиять на конечные свойства детали [5, 6]. Примерами технологических параметров, влияющих на производственный процесс, являются мощность лазера, геометрические свойства профиля интенсивности лазерного луча и стратегия сканирования. Эти параметры оказывают существенное влияние на поведение материала в процессе аддитивного производства. Из-за того, что процессы зачастую индивидуализированы, документация процесса АП и особенно документирование достигнутого качества деталей имеет важное значение для отслеживания и контроля производства [6].

Например, перед выпуском всех новых деталей космического аппарата требуется сертификат технической готовности к летным испытаниям или сертификат соответствия, чтобы обеспечить максимально возможный уровень безопасности в безвоздушном пространстве. В процессе выпуска проверяется выполнение основных правил. Однако эти правила не адаптированы к изготовлению деталей аддитивным способом. Поскольку АП все чаще приводит к созданию биони-

ческих, то есть тонких, решетчатых конструкций, чередующихся с полостями, что значительно отличается от традиционных типов конструкции, большое значение начинает иметь новое регулирование сертификации изделий и отдельных единиц [6].

Чтобы обеспечить высокое качество деталей, изготовленных с помощью аддитивного производства, требования к качеству должны учитываться во всей технологической цепочке. Пример технологической цепочки селективного лазерного спекания на подложке на предприятии аэрокосмической отрасли приведен в [7, 8]. Авторы разделяют меры по обеспечению качества на автономное тестирование (offline) и оперативный мониторинг (online) процесса. Автономные испытания начинаются с квалификации металлического порошка, которая включает в себя контроль химического состава, размера частиц, формы и распределения по фракциям, а также максимального уровня загрязнения газами. Параметры оборудования, такие как мощность лазера, состав инертного газа и скорость сканирования, измеряются и контролируются в процессе производства. Затем готовая деталь проверяется на точность размеров с помощью измерений геометрических форм, а на наличие дефектов – с помощью неразрушающего контроля. Кроме того, во время каждой сборки изготавливаются испытательные образцы, которые анализируются на предмет металлографических свойств и свойств материала [7, 8].

Этот пример показывает необходимость в дальнейшем развитии обеспечения качества в аэрокосмической отрасли. Стандарт DIN SPEC 17071, опубликованный в 2019 году, представляет собой первую комплексную справочную информацию по теме обеспечения качества в АП [8, 9]. В нем говорится, что отдельные компоненты обеспечения качества, включающие персонал, документацию и инфраструктуру, определяют семь соответствующих областей в технологической цепочке: деятельность по обеспечению качества; подготовка данных; управление качеством сырья; предварительная обработка, связанная с системой; управление процессом; системная постобработка; постобработка для конкретной детали.

Для каждой области стандарт рекомендует критерии для процессов аддитивного производства, характеристики качества и факторы технологической цепочки для включения в собственную концепцию обеспечения качества. Однако он не дает никаких рекомендаций для

реализации. Именно здесь цифровой двойник может помочь в удовлетворении потребностей в качестве одного из возможных решений для реализации целостного подхода к обеспечению качества по всей технологической цепочке аддитивного производства.

Цифровой двойник

Согласно ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделия. Общие положения», цифровой двойник – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделиями его составными частями. И пусть многие авторы дают разные определения цифровых двойников, все они сходятся в главном понятии: цифровой двойник – это цифровое представление физического продукта или процесса [10-12]. Однако не существует универсального цифрового двойника (архитектуры) для всех физических объектов. Специфика каждого цифрового двойника зависит от конкретного случая использования. По мнению некоторых авторов, цифровой двойник состоит из двух основных элементов – цифровой модели и цифровой тени [10].

Цифровая модель содержит информацию о геометрии детали и поведенческие модели продукта или системы, которая была получена в ходе разработки продукта и подготовлена для использования в цифровом двойнике. Цифровая тень представляет собой данные об эксплуатации, состоянии или процессе физического двойника, собранные с конкретного экземпляра продукта [14].

Таким образом, цифровая модель представляет всю информацию о разработке продукта, одинаковую для всех экземпляров продукта, а цифровая тень представляет уникальные данные датчиков для каждого экземпляра продукта.

Применительно к аддитивному производству цифровая модель представляет всю информацию, касающуюся этапов проектирования и цифровых этапов предварительной обработки, которая включает в себя размещение, создание поддержки и нарезку. В то время, как цифровая тень представляет информацию, собранную в процессе производства, такую как температура, интенсивность лазерного излучения, скорость сканирования или высота слоя, а также постобработку и оценку, например, данные измерений при контроле размеров (рис. 1).

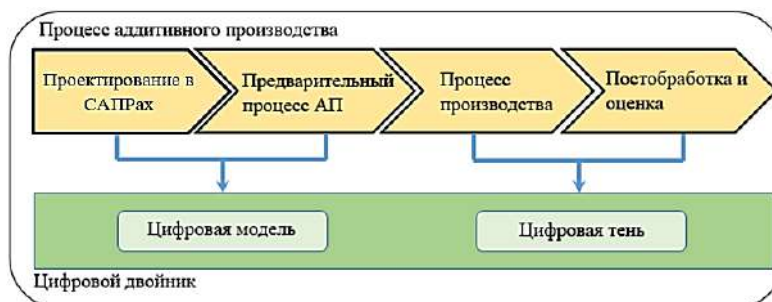


Рис. 1. Отображение этапов процесса АП в цифровой модели и цифровой тени

Fig. 1. Stages of the additive manufacturing process in a digital model and digital shadow

Существуют различные преимущества цифровых двойников для аддитивного производства, такие как сокращение времени выхода на рынок, минимизация дорогостоящих проб и ошибок при оптимизации физических деталей, обнаружение дефектов и сокращение срока сертификации продукции [13]. Чтобы использовать эти преимущества, необходимо рассмотреть следующие базовые аспекты: сбор данных с помощью датчиков, передача данных в цифровой двойник, представление данных в цифровом двойнике и обратная связь с физическим двойником с помощью исполнительных механизмов [6, 12, 14, 15].

Вариант применения

Обычно различные этапы цепочки аддитивного процесса, показанной на рис. 1, выполняются разными работниками. Инженер-конструктор выполняет САД-проектирование, инженер-технолог отвечает за предварительную цифровую обработку, характерную для АП, а один или несколько операторов станков выполняют и контролируют процесс производства, последующую обработку и оценку. Таким образом, чтобы сократить расход ресурсов на проверку деталей вручную и с помощью традиционных средств и методов измерений, а также упростить документирование для оценки соответствия, предлагаемый цифровой двойник должен будет прямо или косвенно взаимодействовать с этими работниками.

Жизненный цикл цифрового двойника проходит разные этапы в зависимости от варианта его использования. Цифровой двойник для продукта и цифровой двойник технологического процесса преследуют разные цели и должны удовлетворять разным требованиям. Для случая виртуального контроля деталей цифровые двойники анализируют четыре стадии жизни изделия: проектируемый экземпляр; изделие в сборе; продукт после обработки; продукт, прошедший контроль качества.

Информация со всех четырех этапов должна быть представлена в цифровом двойнике. Спроектированное изделие характеризуется моделями разработки продукта, например геометрической моделью или моделью конечных элементов, а также дополнительной информацией, например требованиями. Согласно определению авторов научных статей, такая информация относится к цифровой модели [14]. Когда изделие изготавливается на 3D-принтере (АП-станке), оно находится на этапе сборки изделия, характеризующимся цифровой моделью и данными датчиков, полученными в процессе производства и представленными в цифровой тени. В этот момент создается новый экземпляр цифрового двойника для конкретного изделия. Стадия «изделие после обработки» достигается после завершения постобработки конкретной детали. Информация о ней добавляется в цифровой двойник соответствующего экземпляра изделия. После оценки качества данного образца вся информация о нем документируется в цифровом двойнике, и наступает стадия оценки качества продукции.

Существующая технологическая цепочка АП, по-

казанная на рис. 1, нуждается в усовершенствовании для обеспечения возможности виртуального контроля деталей и анализа данных по конкретной детали. На рис. 2 показан процесс аддитивного производства с виртуальным контролем деталей на основе цифрового двойника. Цифровой двойник будет взаимодействовать с различными пользователями и смежными системами. Инженер-конструктор должен настроить виртуальный контроль детали (ВКД) в соответствии с требованиями изделия, выбрав параметры анализа и допустимые значения. Затем приложение для ВКД (например, siemens nx) рекомендует модели анализа на основе моделей, имеющихся в цифровом двойнике. В процессе производства собираются данные. ВКД использует эти данные в качестве входных для аналитических моделей, выполняет анализ и визуализирует результаты. Неисправные детали будут выделены для дальнейшей проверки персоналом, после чего будет предоставлена информация о типе выявленного несоответствия.

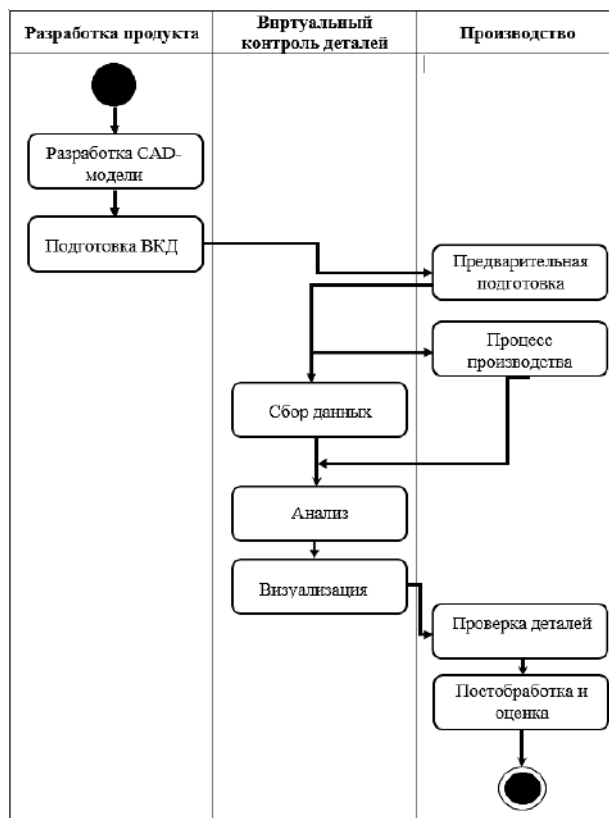


Рис. 2. Процесс производства с интегрированным ВКД
Fig. 2. A manufacturing process with integrated part virtual control

Реализация концепции

Для реализации виртуального контроля деталей необходимо определить общую архитектуру цифрового двойника и адаптировать ее к случаю использования, описанному в разделе выше. Базовая структура с компонентами цифровой модели и цифровой тени остается неизменной. Объединение данных обоих

компонентов позволяет проводить ВКД, как показано на рис. 3. Информация, полученная в ходе предварительной обработки и представляющая целевое состояние детали, сравнивается с данными датчиков, полученными в ходе производственного процесса и представляющими фактическое состояние детали.

Для точного представления целевого состояния детали необходимо использовать информацию, полученную при разработке изделия, которая зависит от систем управления данными об изделии (УДИ) и данными моделирования (УДМ). Примерами такой информации являются геометрические модели и САЕ-модели. Кроме того, для представления целевого состояния необходимы модель слоя и параметры процесса, определенные в программном обеспечении предварительной обработки. Фактическое состояние детали представлено данными датчиков и технологического процесса, собранными во время производства в АП-станке. Сбор данных осуществляется цифровым двойником АП-машины, предварительно обрабатывается и передается цифровому двойнику детали.

Для обеспечения ВКД сначала необходимо настроить параметры проверки, затем провести анализ и в итоге визуализировать результат. В процессе настройки необходимо определить уровень сложности и объем анализа, выбрать подходящую модель анализа, которую инженер-конструктор приводит в соответствии с требованиями к детали.

Простейшая модель анализа сравнивает заданные и измеренные параметры процесса, например температуру, скорость и мощность лазера. Второй тип аналитических моделей позволяет рассчитать параметры, которые невозможно измерить напрямую с помощью аналитических моделей. Примером такого анализа является расчет глубины ванны расплава при селективном лазерном сплавлении металла. Наиболее

сложный тип анализа использует численные или статистические модели в сочетании с собранными данными датчиков для прогнозирования механических, тепловых или других свойств изготавливаемой детали. Результаты этих расчетов затем сравниваются с целевым значением для проверки требований к детали и заданных свойств детали.

Модели анализа могут отображать различные характеристики детали. Они могут относиться ко всему объему детали (например, состав инертного газа, температура в объеме детали), к одному слою (например, высота слоя, стратегия сканирования), к одному проходу лазера (например, скорость) или к одной точке (например, температура сплавления, мощность луча лазера). Эти различные аспекты должны быть представлены в структуре данных, лежащих в основе цифрового двойника. Для отражения различных характеристик может подходить модель данных, основанная на вокселях, которая будет исследована в будущей работе.

Заключение

В данной статье представлены подход и концептуальный проект виртуального контроля деталей на основе цифрового двойника в аддитивном производстве. Описана концепция цифрового двойника и определен сценарий использования для обеспечения качества изделий.

Предложенная концепция пока носит общий характер и требует более детальной проработки. В дальнейшем планируется определить подходящую модель данных для цифрового двойника, разработать методическую основу для конфигурирования виртуального контроля деталей и проверить эти новые концепции и методы на примере прототипической реализации.

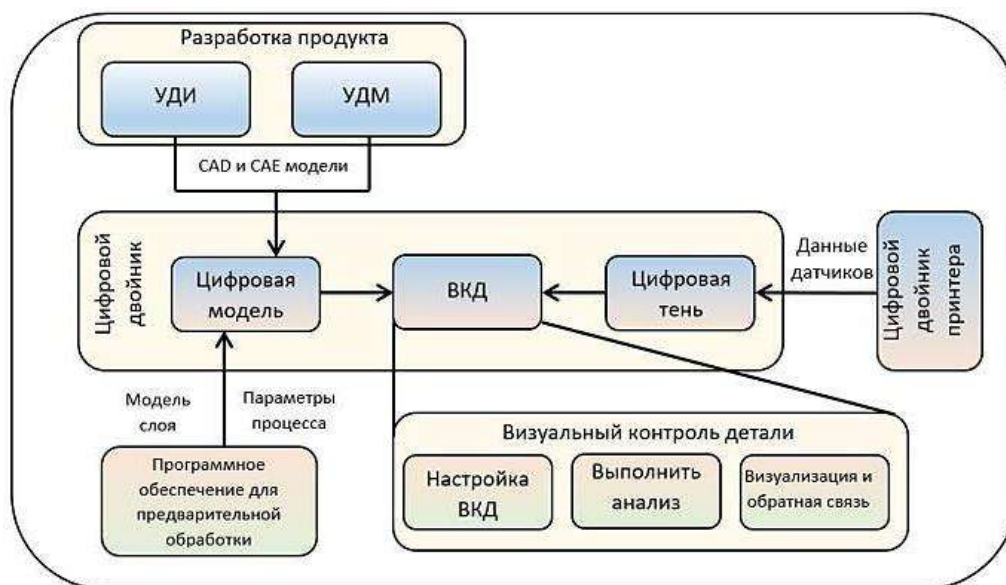


Рис. 3. Концептуальная архитектура виртуального контроля деталей на основе цифрового двойника
Fig. 3. Conceptual architecture of part virtual control based on a digital twin

Список источников

- Егоров К.Н., Егорова С.А., Петрякова В.Г. Аддитивные технологии в медицине: области и технологии применения, преимущества, недостатки и перспективы развития // Перспективы развития науки в современном мире: сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции, Уфа, 29 июня 2021 года. Уфа: ООО «Научно-издательский центр "Вестник науки"», 2021. С. 21-41.
- Тенденции развития экономики России на фоне общемировых трендов в условиях четвертой промышленной революции / Спешилова Н.В., Андриенко Д.А., Рахматуллин Р.Р., Спешилов Е.А. // Вестник евразийской науки. 2018. Т. 10. №6. С. 44.
- Бочкарева А.В. 3D-технологии в образовательной сфере высших учебных заведений // European Scientific Conference: сборник статей V Международной научно-практической конференции. Пенза, 30 июля 2017 года. В 3 ч. Ч. 3. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017. С. 169-171.
- Разработка модели для печати лопаток турбин на 3D-принтере / Ерошенко В.О., Малькова М.Ю., Задранов А.Н., Мещеряков А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 82-92. DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-82-92
- Разработка модели обеспечения качества при проектировании, изготовлении, испытании изделий авиационно-космической техники / Загидуллин Р.С., Митрошкина Т.А., Садыков О.Ф. и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. №12. С. 27-33.
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften // Additive Fertigung – Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen: Stellungnahme (Additive manufacturing – developments, opportunities and challenges: Position statement). Halle (Saale), München, Mainz, 2020.
- Bamberg J., Dusel K.-H., Satzger W. Overview of additive manufacturing activities at MTU aero engines // AIP Conference Proceedings. 2015, vol. 1650, no. 1, pp. 156-163.
- Effect of organic impurity in additive manufactured Ti-6Al-4V / Kerstin Winkler, Husam Ahmad, Andre Danzig, Philipp Gloetter, Frank Schubert, Guntram Wagner, Lothar Kroll // Additive Manufacturing Letters. 2023, vol. 5, pp. 100-116. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100116>.
- DIN SPEC 17071:2019-12. Additive Fertigung – Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive Fertigungszentren (Additive manufacturing – Requirements for quality assured processes at additive manufacturing centres); Text in German and English. Berlin: Beuth Verlag GmbH. 2019, 59 p. DOI: 10.31030/3119149
- WiGeP-Positionspapier: «Digitaler Zwilling» (WiGeP Position Paper: "Digital Twin") / Stark R., Anderl R., Thoben K.-D., Wartzack S. // ZWF. 2020, no. 115 (special), pp. 47-50.
- Кузнецова С.В., Семенов А.С. Цифровые двойники в аэрокосмической промышленности: объектно-ориентированный подход // Труды МАИ. 2023. №131. С. 430-432.
- Хомяков Н.В. Бережливость 4.0. Влияние инструментов Индустрии 4.0 на бережливое производство // Вестник Санкт-Петербургского университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2023. №3. С. 68-75.
- Building digital twins of 3D printing machines / DebRoy T., Zhang W., Turner J., Babu SS. // Scripta Materialia. 2017, no. 135, pp. 119-124.
- Безруких Д.И., Чернышова Ю.А. Применение технологий цифровых двойников и аддитивных технологий при разработке ракетных двигателей // Молодые учёные в решении актуальных проблем науки: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Красноярск, 20-21 апреля 2023. Красноярск, 2023. С. 1436-1438
- Digital twin technology – An approach for Industrie 4.0 vertical and horizontal lifecycle integration / Anderl R., Haag S., Schützer K., Zancul E. // Information Technology. 2018, no. 60(3), pp. 125-132.

References

- Egorov K.N., Egorova S.A., Petryakova V.G. Additive technologies in medicine: areas and technologies of application, advantages, disadvantages and development prospects. *Perspektivy razvitiya nauki v sovremenom mire: sbornik nauchnykh statey po materialam VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Prospects for the development of science in the modern world: Collection of scientific articles based on proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference]. Ufa, June 29, 2021. Ufa: LLC Scientific Publishing Center Bulletin of Science, 2021, pp. 21-41. (In Russ.)
- Speshilova N.V., Andrienko D.A., Rakhmatullin R.R., Speshilov E.A. Trends in the development of the Russian economy against the backdrop of global trends in the conditions of the fourth industrial revolution. *Vestnik evraziyskoy nauki* [Eurasian Scientific Journal]. 2018;10(6):44. (In Russ.)
- Bochkareva A.V. 3D technologies in the educational field of higher educational institutions. European Scientific Conference: collection of articles of the 5th International Scientific and Practical Conference. Part 3. Penza, July 30, 2017: in 3 parts, part 3. Penza: Science and Enlightenment (Individual Entrepreneur Gulyaev G.Yu.), 2017, pp. 169-171. (In Russ.)
- Eroshenko V.O., Malkova M.Yu., Zadiranov A.N., Meshcheryakov A.V. Development of a model for printing turbine blades on a 3D printer. *Vestnik Magni-*

- togorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023;21(1):82-92. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-82-92
5. Zagidullin R.S., Mitroshkina T.A., Sadykov O.F., et al. Development of a quality assurance model in designing, manufacturing, testing of aerospace technology products. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [News of Tula State University. Technical Sciences]. 2019;(12):27-33. (In Russ.)
 6. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. Additive Fertigung – Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen: Stellungnahme (Additive manufacturing – developments, opportunities and challenges: Position statement). Halle (Saale), München, Mainz, 2020.
 7. Bamberg J., Dusel K.-H., Satzger W. Overview of additive manufacturing activities at MTU aero engines. AIP Conference Proceedings. 2015;1650(1):156-163.
 8. Kerstin Winkler, Husam Ahmad, Andre Danzig, Philipp Gloetter, Frank Schubert, Guntram Wagner, Lothar Kroll. Effect of organic impurity in additive manufactured Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing Letters*. 2023;5:100-116. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100116>
 9. DIN SPEC 17071:2019-12. Additive Fertigung – Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive Fertigungszentren (Additive manufacturing – Requirements for quality assured processes at additive manufacturing centres). Text in German and English. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019, 59 p. DOI: 10.31030/3119149
 10. Stark R., Anderl R., Thoben K.-D., Wartzack S. WiGeP-Positionspapier: «Digitaler Zwilling» (WiGeP Position Paper: "Digital Twin"). ZWF. 2020;(115(special)):47-50.
 11. Kuznetsova S.V., Semenov A.S. Digital twins in the aerospace industry: an object-oriented approach. *Trudy MAI* [Proceedings of Moscow Aviation Institute]. 2023;(131):430-432. (In Russ.)
 12. Khomyakov N.V. Lean 4.0. Impact of Industry 4.0 tools on lean manufacturing. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta tekhnologii i dizayna. Seriya 4: Promyshlennyye tekhnologii* [Vestnik of Saint Petersburg University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies]. 2023;(3):68-75. (In Russ.)
 13. DebRoy T., Zhang W., Turner J., Babu SS. Building digital twins of 3D printing machines. *Scripta Materialia*. 2017;135:119-124.
 14. Bezrukikh D.I., Chernyshova Yu.A. Application of digital twin technology and additive technologies in the development of rocket engines. *Molodye uchenye v reshenii aktualnykh problem nauki: sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Young scientists in solving current problems of science: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists]. Krasnoyarsk, April 20-21, 2023. Krasnoyarsk, 2023, pp. 1436-1438. (In Russ.)
 15. Anderl R., Haag S., Schützer K., Zancul E. Digital twin technology – An approach for Industrie 4.0 vertical and horizontal lifecycle integration. *Information Technology*. 2018;(60(3)):125-132.

Поступила 11.01.2024; принята к публикации 18.03.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 11/01/2024; revised 18/03/2024; published 27/06/2024

Хомяков Никита Васильевич – аспирант кафедры электроники, Российский технологический университет «Московский институт радиотехники, электроники и автоматики», Москва, Россия.
Email: xomyakov_1997@mail.ru.

Nikita V. Khomyakov – postgraduate student of the Electronics Department, MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia.
Email: xomyakov_1997@mail.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 65.011.56
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-170-180



МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ НА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОМ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ, ОСНАЩЕННОМ ВИБРОАКТИВНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Лонцих П.А.¹, Головина Е.Ю.¹, Лонцих Н.П.¹, Лившиц И.И.²

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

² Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье изложены результаты применимости методов и инструментов управления рисками на высокотехнологичном машиностроительном предприятии, оснащённом виброактивным оборудованием. Показано, что определение условий эффективности и принципов управления рисками на таких предприятиях основывается на ключевых требованиях, установленных в международных стандартах менеджмента качества. Применение метода диакоптики позволило привести исходную математическую или динамическую модель к модели малой размерности и оценить риски работоспособности виброактивного оборудования на высокотехнологичном предприятии. Анализ динамических свойств оборудования потребовал перехода от сложной технологической системы к упрощённой модели, которую можно разделить на относительно изолированные подсистемы с помощью метода диакоптики. Это предоставило возможность идентифицировать возможные риски. Установлено, что использование данного подхода оказывает влияние на повышение качества изделий, на минимизацию рисков, на сокращение сбоев и в целом на улучшение производственного процесса. Успехом минимизации рисков и повышения безопасности на производстве машиностроительной отрасли является контроль за изменениями вибрационного состояния технологического оборудования и осуществление его своевременной диагностики. Данные мероприятия позволяют своевременно выявить потенциальные проблемы и принять необходимые меры для их предотвращения. Ограничиваясь анализом вероятности технического износа оборудования на машиностроительном предприятии как одного из критически важных факторов для обеспечения эффективной работы, в статье выдвигаются инновационные принципы реализации синтеза методов и инструментов для снижения рисков, связанных с вибрационно-активным оборудованием. Это обуславливает неотложность исследований динамических процессов, происходящих на высокотехнологичном оборудовании машиностроительного предприятия.

Ключевые слова: высокотехнологичные предприятия, управление рисками, виброактивное оборудование, стандарты системы менеджмента качества, цикла Деминга, метод диакоптики

© Лонцих П.А., Головина Е.Ю., Лонцих Н.П., Лившиц И.И., 2024

Для цитирования

Методы и инструменты управления рисками на высокотехнологичном машиностроительном предприятии, оснащённом виброактивным оборудованием / Лонцих П.А., Головина Е.Ю., Лонцих Н.П., Лившиц И.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 170-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-170-180>



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

METHODS AND TOOLS OF RISK MANAGEMENT AT A HIGH-TECH MACHINE-BUILDING ENTERPRISE WITH VIBRATION ACTIVE EQUIPMENT

Lontsikh P.A.¹, Golovina E.Yu.¹, Lontsikh N.P.¹, Livshits I.I.²

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

² National Research University ITMO, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article describes the results of applicability of risk management methods and tools at a high-tech machine-building enterprise with vibration active equipment and shows that the efficiency conditions and the principles of risk management applied at such enterprises are based on key requirements established in the international quality management standards. By applying the diakoptics method, the authors brought the original mathematical or dynamic model to a low-dimensional model and assessed the performance risks for vibration active equipment used at a high-tech enterprise. The analysis of the dynamic properties of equipment required a transition from a complex technological system to a simplified model, which could be divided into relatively isolated subsystems using the diakoptics method. This transition provided an opportunity to identify potential risks. This approach was found to have an impact on improving the product quality, minimizing risks, reducing failures, and improving the production process in general. The success of minimizing risks and improving safety at machine-building plants is an opportunity to monitor changes in the vibration state of process equipment and perform timely diagnostics. These measures can make it possible to identify potential problems and take preventive measures. Limited to the analysis of the probability of technical wear of equipment at the machine-building enterprise as one of the critical factors for improving its performance, the article puts forward innovative principles for implementing a synthesis of methods and tools intended to reduce risks of vibration active equipment. This fact determines the urgency of research into dynamic processes that occur on high-tech equipment used at machine-building enterprises.

Keywords: high-tech enterprises, risk management, vibration active equipment, quality management system standards, Deming cycle, diakoptics method

For citation

Lontsikh P.A., Golovina E.Yu., Lontsikh N.P., Livshits I.I. Methods and Tools of Risk Management at a High-Tech Machine-Building Enterprise with Vibration Active Equipment. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 170-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-170-180>

Введение

Развитие экономики в России в значительной степени обусловлено прогрессом предприятий высокопроизводительных и наукоемких секторов. Эта область экономики, вне всякого сомнения, играет одну из ключевых ролей в современном производстве, поскольку её развитие определяет обеспечение конкурентоспособности национальной экономики. Успехи экономики и научно-технического прогресса напрямую зависят от результативности функционирования высокотехнологичных предприятий. Согласно классификации Росстата [1, 2], основанной на методологии Евростата, данная отрасль включает следующие производства (в скобках указан код ОКВЭД):

– (26). Производство компьютеров, электронных и оптических изделий;

– (30.3). Производство летательных аппаратов, включая космическое оборудование.

Стоит отметить, по данным статистики, в Евросоюзе на долю, кто занят в сфере высоких технологий, приходится впечатляющие 45,8%, что свидетельствует о значительной концентрации экспертов и специалистов в данной области. Однако в России

данная доля составляет 34,3%, что требует дополнительных усилий для увеличения конкурентоспособности и развития высокотехнологичных отраслей. Более того, Россия экспортирует менее 0,5% от общего объема высокотехнологичной продукции в мире, и это в основном связано с областью военных технологий. В то же время доля импорта высокотехнологичных товаров в России превышает 60% [2].

При анализе деятельности высокотехнологичных предприятий используются такие подходы, как отраслевой, продуктовый, патентный и параметрический. Существует четыре ключевых характеристики высокотехнологичных проектов гражданского назначения: новизна, сложность организации, сложность технологии и скорость выполнения [3]. В соответствии с паспортом научной специальности 2.5.22 «Управление качеством продукции», важными областями исследования являются следующие направления исследования: 7. Управление рисками и предотвращение несоответствий в технических и организационных системах; 10. Развитие методов потребительской оценки качества продукции и услуг для высокотехнологичных отраслей производства; 13. Научные основы цифровых, автоматизированных комплексных систем управ-

ления производством и качеством работ на базе технических регламентов и стандартов [13]. В данном исследовании представлены результаты применения методов и инструментов управления рисками в высокотехнологичном предприятии, оснащенном виброактивным оборудованием.

Определение условий эффективности и принципов управления рисками на предприятиях высоких технологий основывается на ключевых требованиях, установленных в международных стандартах ISO 9001:2015, Quality management systems – Requirements, ISO 31000:2018 «Risk management – Guidelines», а также в национальном стандарте ГОСТ РВ 0015-002-2020 «Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования» [4-6]. Эти стандарты устанавливают требования к качеству системы управления и обеспечению высокого качества продукции. Решение о внедрении системы управления качеством является стратегически значимым для любой организации и способно существенно улучшить результаты ее работы, а также обеспечить прочную базу для проектов, направленных на поддержание устойчивого развития [4, 20].

Для достижения максимальной эффективности системы управления в соответствии со стандартом ISO 9001:2015 необходимо использовать процессно-ориентированный подход. Этот подход предполагает разработку и внедрение системы управления на предприятии с учетом его специфики, а также постоянную работу над улучшением эффективности системы менеджмента качества и повышения удовлетворенности заинтересованных сторон. Данный стандарт определяет требования к построению процессов на основе цикла Деминга (PDCA), который предполагает постоянное совершенствование процессов, определяющих деятельность предприятий. Особое внимание уделяется риск-ориентированному подходу, который направлен на предотвращение нежелательных последствий и использование возможностей для улучшения деятельности организации [4].

Стандарт ISO 31000:2018 определяет требования к управлению рисками и включает систематическую работу с рисками, начиная от их идентификации и заканчивая контролем и отчетностью. Он предусматривает использование различных методов и инструментов для управления рисками, включая коммуникации, консультирование, оценку рисков и обработку информации о рисках [5]. При анализе рисков на высокотехнологичном предприятии следует учитывать технические и технологические риски, связанные с износом оборудования и сложностью производственных процессов. Вероятность возникновения таких рисков является ключевым фактором при принятии решений о внедрении новых технологий и модернизации оборудования.

Анализ и управление рисками на высокотехнологичных предприятиях должны проводиться с учетом требований устойчивого развития и базироваться на принципах системы менеджмента качества и про-

цессном подходе. Такие предприятия, как правило, оснащены виброактивной техникой, управление которой требует использования электронных компонентов. Чтобы обеспечить надежность использования высокотехнологичного оборудования, необходимо учитывать внешние воздействия и минимизировать риски. Это важно как для механических компонентов, так и для электронного оборудования. Стоит отметить, изучение влияния внешних факторов играет очень важную роль в создании новейших подходов к прогнозированию надежности технологий, особенно это важно в условиях управления виброактивными комплексами на предприятиях, характеризующихся высокой технологичностью производственных процессов [7-12].

Вероятность технических рисков оборудования высокотехнологичного предприятия

Критерии надежности и долговечности оборудования на высокотехнологичных предприятиях позволяют оценить вероятность технических рисков, связанных с износом виброактивного оборудования. Матстатистика на сегодняшний день играет ключевую и важнейшую роль, так как благодаря ей возможно с легкостью выявить несоответствия и повысить эффективность работы в соответствии с требованиями ISO 9001:2015. Это помогает анализировать данные, делать выводы и принимать обоснованные решения на основе статистических методов и моделей. Одним из основных направлений математической статистики является оценка вероятности ошибок и разработка мер по их уменьшению. Использование методов математической статистики может значительно повысить эффективность и результативность работы, улучшить качество продукции и снизить вероятность ошибок. Практика показывает, что основным риском для технологического оборудования является износ, тогда как ошибки персонала и внешние факторы вызывают аварийные остановки гораздо реже. Одним из показателей, используемых для оценки технического состояния оборудования, является уровень вибраций, источником которых могут являться как внутренние, так и внешние возмущения. Таким образом, общее вибрационное воздействие на агрегат может быть представлено следующим образом:

$$S = S^{\text{собств}} + S^{\text{фоновое}} + S^*, \quad (1)$$

где $S^{\text{собств}}$ – собственная вибрация агрегата; $S^{\text{фоновое}}$ – фоновая вибрация в районе размещения агрегата, которая может быть замерена при его отключении; S^* – случайная вибрация.

Если величина $S^{\text{собств}}$ является вполне предсказуемой при наблюдении за агрегатом, то величины $S^{\text{фоновое}}$ и S^* – случайные. Из этого следует, что сам процесс по принятию соответствующего решения о ремонте виброактивного оборудования осуществляется на основе данных о вибрации и предполагает оценку рис-

ков, связанных с возможным неблагоприятным поведением оборудования в результате воздействия вибрации. Суммарный риск представляет собой совокупное воздействие различных вибрационных явлений, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации, а также реакцию оборудования на эти явления [14, 15].

Общее выражение для определения суммарного риска может быть записано следующим образом:

$$P[R_i] = \sum_j P[R_i / S_j] P[S_j], \quad (2)$$

где $P[R]$ – вероятность события, указанного в квадратных скобках; R_i – событие, состоящее в том, что система находится в i -м состоянии; S_j означает, что испытываемое на входе вибрационное воздействие имеет «уровень» j ; $P[R_i / S_j]$ означает вероятность того, что состояние системы будет R_i при условии, что имеет место вибрационный вход S_j .

В процессе своей эксплуатации объект диагностики, который рассматривается как динамическая система и описывается дифференциальными уравнениями, обладает свойством изменения уровня вибрации. Данное изменение спровоцировано наличием дефектов или положением фазы их развития. Каждый из имеющихся дефектов оказывает влияние на структуру технического состояния объекта, так как даже небольшое количественное изменение обобщенного показателя вибрации вызывает качественное изменение всего вибрационного поля.

С целью определения наличия дефектов и их типа используются спектральные диаграммы. На этих диаграммах появляются пики, которые характерны для определенного вида дефекта.

Таким образом, объект диагностики, рассматриваемый как динамическая система, имеет различный уровень вибрации в процессе своей эксплуатации, который объясняется наличием дефектов. Использование спектральных диаграмм позволяет определить тип и характер имеющегося дефекта на основе характеристик вибрационного поля. Данные мероприятия помогают контролировать состояние объекта и оценивать его техническое состояние. Вероятность того, что риск сохранения работоспособности агрегата (или один из его узлов) не будет поврежден ни разу, рассчитывается по следующей формуле:

$$P[R_0] = \exp(-\lambda_a T) = \exp(-\alpha T_a^{-k}), \quad (3)$$

где $P[R_0]$ – вероятность события; T – наработка на отказ – отношение суммарной длительности работы изделия к числу отказов подшипниковых узлов, возникших за этот период; выражения, стоящие в скобках, определяют параметры возмущающего возмущения.

При этом следует учитывать, что вероятность возникновения риска повреждения элемента виброактивного оборудования зависит от значения $P[R_0]$. Если

данная вероятность низкая, то существует меньший риск повреждения, а если она высокая, то вероятность повреждения также возрастает. В формуле (3) указывается, что после возникновения повреждений агрегат или его узел подвергаются ремонту, если это необходимо, чтобы вернуться к состоянию, при котором уровень повреждения снова становится равным α . Таким образом, проведение ремонтных работ позволяет восстановить работоспособность оборудования и минимизировать риск повторного повреждения.

Данная концепция ремонта и поддержания работоспособности виброактивного оборудования основана на исследованиях и практическом опыте. Использование данной методологии позволяет эффективно управлять рисками повреждений и обеспечить надежную работу оборудования [15-17].

Анализ динамических моделей станка методом диакоптики

В статье [17] мы обосновали проведение анализа динамических моделей оборудования методом диакоптики. Этот метод позволяет привести исходную математическую или динамическую модель к модели малой размерности и оценить риски работоспособности виброактивного оборудования на высокотехнологичном предприятии. Анализ динамических свойств оборудования требует перехода от сложной технологической системы к упрощенной модели, которую можно разделить на относительно изолированные подсистемы с помощью метода диакоптики. Это позволяет учитывать критерии устойчивости, быстродействия и точности расчетных алгоритмов и идентифицировать возможные риски.

Использование метода диакоптики и применение уравнений Лагранжа второго рода привело к получению системы дифференциальных уравнений движения для виброактивной механической системы, которая включает в себя инерционные, жесткостные и демпфирующие элементы [19]. Этот подход позволяет более точно описать поведение системы и предсказать ее динамику. Такая система уравнений является основой для анализа и управления вибрациями в механических системах, что имеет большое практическое значение в различных областях, включая инженерию, автомобильную промышленность и аэрокосмическую технику.

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + (c_2 + c_3)x + (c_3h_3 - c_2h_2)\varphi &= P \sin \alpha; \\ M\ddot{z} + (c_1 + c_4 + c_5)z + (c_4a_4 - c_5a_5)\varphi &= P \cos \alpha; \\ J_\eta \ddot{\varphi} + (c_2h_2^2 + c_3h_3^2 + c_4a_4^2 + c_5a_5^2)\varphi + \\ + (c_3h_3 - c_2h_2)x + (c_4a_4 - c_5a_5)z &= -Ph_p \sin \alpha, \end{aligned} \quad (4)$$

где M , c – инерционные и жесткостные характеристики механической виброактивной системы; P_i – проекции силы на выбранные оси координат; h_i – плечо соответствующей силы при определении моментов сил; x , y , z – координаты относительно выбранных осей; c_i – жесткостные коэффициенты;

$J_{\eta} = \iiint_{(m)} (\xi^2 + \zeta^2) dm$ – массовый момент инерции тела по отношению к соответствующим осям инерции.

Дифференциальные уравнения (4) представляют собой инновационную математическую модель, которая описывает механические движения виброактивного оборудования в целом, а также фрезерного станка в частности. Эта уникальная модель является основой для проведения анализа системы на более низком уровне и прославилась своими упрощениями.

Используя эти дифференциальные уравнения, можно точно предсказать и описать движение виброактивного оборудования. Они позволяют учесть все важные факторы, такие как силы трения, массы и инерции, а также другие физические свойства системы.

Пользуясь решением дифференциальных уравнений в случае аналитического решения либо прибегая к численным методам решения для многомерных нелинейных систем, можно формировать подход, позволяющий решать задачу декомпозиции, прибегая к методу диакоптики.

Искомая координата линейного перемещения в механической системе, обозначенная как $x_1(t)$, может быть определена путем разрешения дифференциального уравнения (4) относительно выходной координаты. После проведения соответствующих математических операций для выражения выходной координаты получим следующее [17]:

$$x_1(t) = \frac{1}{mp^2} [cp(x - x_1) + k(x - x_1)]. \quad (5)$$

Параметр p здесь и в дальнейшем означает $p = d/dt$ – символ дифференцирования, если уравнение задано в области временного аргумента и $p = \alpha + \beta_i$ – в этом случае задания уравнения в области преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях.

Передаточная функция системы $W(p)$, представляющая отношение изображений выходной величины к входной, для рассматриваемой виброактивной системы равна

$$W(p) = \frac{x_i}{x(p)} = \frac{cp + k}{mp^2 + cp + k}. \quad (6)$$

Таким образом, изучение передаточной функции является ключевым аспектом в анализе динамических свойств виброактивной системы. Данное исследование обладает огромным значением, так как содержит всю необходимую информацию для изучения работы системы в различных режимах и при воздействии и влиянии внешних факторов. Понимание передаточной функции позволяет наиболее эффективно минимизировать риски, которые обусловлены использованием виброактивного оборудования. В целом исследование и анализ передаточной функции является неотъемлемой частью анализа. Оно позволяет предоставить всю важную информацию для эффективного управления системой и минимизации рисков, связанных с использованием виброактивного оборудования.

Синтез методов и инструментов минимизации рисков на высокотехнологичном предприятии, оснащённом виброактивным оборудованием

При решении задачи идентификации рисков виброактивного оборудования и управления ими прежде всего следует обратить внимание на анализ динамических моделей виброактивного оборудования, которое подвержено рискам технического износа. Для этой цели рекомендуется использовать метод диакоптики [17]. Очевидно, что развитие методов анализа движения механических составляющих системы, который связан с составлением и решением дифференциальных уравнений механических движений виброактивной механической системы, требует применения единого и системного подхода.

Таким образом, исследование применимости и эффективности методов управления рисками для высокотехнологичного предприятия, оснащённого виброактивным оборудованием, предполагает не только анализ динамических моделей, но и использование метода диакоптики. Однако для полноценного развития этого подхода требуется системный подход, который учитывает математическую модель виброактивной системы, полученную с применением метода диакоптики. Метод структурной интерпретации, или структурная теория виброзащитных систем [21], представляет собой эффективный способ исследования свойств и параметров механической колебательной системы. Структурная математическая модель виброактивной механической системы является структурной схемой, которая эквивалентна системе автоматического управления и динамически оценивает состояние системы объекта. В этой модели содержатся массоинерционные элементы, связанные с основанием жесткостными и демпфирующими связями. Чаще при рассмотрении динамических задач математические модели таких систем представляются в виде обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Этот подход значительно упрощает моделирование и анализ систем с использованием преобразования Лапласа [18-20].

Математические модели конструкций позволяют определить физические значения упругих элементов в виброактивных системах. Эти элементы действуют как обратные отрицательные связи, компенсируя абсолютное отклонение защищаемого объекта от положения статического равновесия в замкнутой системе управления. Таким образом, использование обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами в математических моделях и определение физических значений упругих элементов позволяют более полно и глубоко понять и исследовать динамику виброактивных систем. Это дает возможность разрабатывать эффективные методы управления и защиты от вибрации, обеспечивая безопасность и надежность работы таких систем.

Известно, что большинство металлорежущих станков высокотехнологичных предприятий, оснащённых виброактивным оборудованием, характеризуется

средне- и высокочастотными спектрами вибрации и шума. Уровни звукового давления на таких станках составляют от 85 до 100 дБ. Высокие уровни вибрации и шума отмечаются у крупногабаритных фрезерных, токарных, шлифовальных и револьверных станков.

Очевидно, что источники потенциальных рисков колебательных или виброактивных систем уходят в разнообразные сферы деятельности и применимости оборудования. Тем не менее в данном исследовании наше внимание фокусируется на вероятности технического износа оборудования на высокотехнологичных предприятиях, рассматриваемого как один из знаковых критериев эффективности работы технического оборудования. С целью снижения рисков, связанных с вибрационным оборудованием, необходимо разработать принципы синтеза методов и инструментов, которые помогут обеспечить непрерывную и безопасную работу станков. Для повышения эффективности и надежности систем защиты от вибраций является необходимым проводить исследования динамических процессов. Принято выделять два основных подхода, которые направлены на минимизацию рисков и на обеспечение высокого качества работы оборудования. Первый подход основан на использовании активных виброзащитных систем (АВЗС), которые, в свою очередь, обладают специальными устройствами, изменяющими динамические характеристики системы под воздействием внешней энергии. Это отличает их от пассивных виброзащитных систем, которые представляют собой упругие механические системы с закрытой структурой [5].

Второй подход заключается в применении дина-

мических гасителей колебаний. Данные гасители позволяют снизить возможное воздействие вибрации на оборудование, обеспечивая высокое качество.

Таким образом, проведение исследований динамических процессов в системах защиты от вибрационных воздействий является необходимым для достижения минимизации рисков и обеспечения высокого качества работы вибрационно-активного оборудования. Активные виброзащитные системы и динамические гасители колебаний представляют собой два основных подхода, которые позволяют достичь этих целей.

Данный подход активно применяется в машиностроении и высокотехнологичном производстве, где управление качеством играет важную роль. Он позволяет эффективно управлять вибрацией и колебаниями, обеспечивая стабильную работу оборудования и направлен на минимизацию рисков. Поэтому изучение динамических процессов, использование активных систем виброзащиты и применение принципов управления, ориентированных на процесс, являются основными вопросами в области обеспечения качественной работы вибрирующего активного оборудования и снижения рисков.

Исследование передаточной функции $W(p)$, определенной выражением (6), чрезвычайно важно для анализа динамических свойств виброактивной системы, так как содержит в себе всю информацию, необходимую для изучения систем при различных режимах и внешних воздействиях, обуславливающих возможность появления рисков событий.

Структурная схема системы, содержащей активные и пассивные связи, изображена на рис. 1.

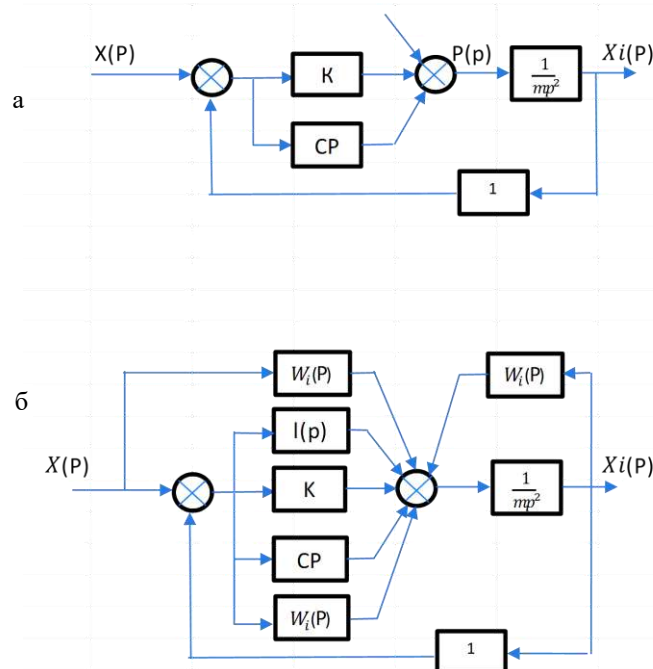


Рис. 1. Структурная схема виброзащитной системы: а – пассивной; б – активной
 Fig. 1. A structural diagram of the vibration isolation system: а is passive; б is active

На схеме $l(p)$ и $W_i(p)$ – операторы пассивной и активной связей. Рассматривая в частных случаях присутствие в качестве дополнительных связей операторов $l(p)$, $W_1(p)$, $W_2(p)$ или $W_3(p)$, подвергнем анализу соответственно пассивную и управляемую активную систему с управлением по абсолютному отклонению, возмущению или относительному смещению.

Вышеописанная краткая систематизация применимости методов уменьшения рисков в высокотехнологичном предприятии, оснащенном виброактивным оборудованием, неоспоримо предполагает тщательный анализ потенциальных и эффективных стратегий управления и уменьшения рисков, связанных с техническим износом оборудования. Реализация подобных стратегий в первую очередь подразумевает способность разработки управляющих законов для виброактивной системы, основанных на детальном анализе передаточной функции, получаемой в ходе структурной интерпретации виброактивной системы.

Обращение к принципам процессно-ориентированного управления предоставляет возможность рассмотреть предлагаемую структуру как замкнутую систему с отрицательной обратной связью в соответствии с теорией автоматического управления. Этот подход позволяет исследовать систему с единых позиций, где используются различные формы энергии для определения характеристик элементов, входящих в обратную связь системы. Из этого следует, что реализация исполнительных механизмов возможна при помощи струйных, электродинамических механических принципов, а также с помощью выбора принципа работы и регулируемой жесткости исполнительных механизмов. В составе виброактивной системы, помимо исполнительных механизмов, присутствуют датчики обратной связи, усилители и распределительные устройства. Эти компоненты играют важную роль в управлении системой и позволяют ей функционировать эффективно. Сигнал обратной связи, полученный от датчиков, проходит через трансформацию, которая зависит от различных параметров, таких как резкость, ускорение, смещение, дифференциальное давление или усилие. Это позволяет системе адаптироваться к изменяющимся условиям и реагировать на них соответствующим образом.

В итоге виброактивная система с включенными датчиками обратной связи, усилителями и распределительными устройствами является сложной и многофункциональной системой, способной эффективно реагировать на изменяющиеся условия и выполнять задачи с высокой точностью и надежностью [14, 18].

Исследование виброактивной системы в качестве замкнутой системы автоматического управления позволяет выявить влияние обратной связи на характеристики данной системы. Это помогает понять, как дополнительные звенья и связи формируют активное воздействие на объект защиты виброактивной системы и снижают риски технического износа оборудования. Управление движением исполнительного механизма

осуществляется через устройство управления и корректируется при прохождении сигнала через различные динамические элементы обратной связи. Передаточная функция $W_p(p)$ устройства управления в низкочастотной области может быть представлена звеном первого порядка общего вида [18-20].

Далее приведены результаты выполненного исследования, где производилась идентификация инструментов управления и минимизация рисков технического износа оборудования на основе анализа передаточной функции $W(p)$. При использовании различных законов управления обратной связью

$$W_p(p) = \frac{d_0 + d_1 P}{e_0 + e_1 P}. \quad (7)$$

Закон управления виброактивной системой и, соответственно, передаточная функция $W(p)$ имеет различный характер в зависимости от конкретных значений параметров d_i и e_i .

1. Пропорциональное управление АПВЗС в случае управления по абсолютному отклонению определяется обратной связью системы, имеющей передаточную функцию вида $W_p(p) = \frac{d_0}{e_0}$.

2. Интегральный закон регулирования виброактивной системой реализуется при пропорциональной зависимости между скоростью перемещения распределительного устройства и перемещением объекта защиты: $\dot{X}_p = K_u \cdot X_1$, или в операторной форме

$$W_p(p) = \frac{K_u}{P} = \frac{d_0}{e_1 P}.$$

Интегрирование позволяет определить данный закон управления как перемещение распределительного устройства (РУ) системы управления, пропорциональное интегралу от перемещения объекта защиты: $X_p = K_u \int X_1 dt$.

3. Управление системой в соответствии с идеальным дифференцирующим законом характеризуется передаточной функцией вида $W_p(p) = K_g P = \frac{d_1 P}{e_0}$.

Практически такое управление реализовано быть не может вследствие неустойчивости характеристик чисто дифференцирующего типа. Реальное дифференцирующее управление осуществляется при пропорциональной зависимости скорости объекта защиты от действующих параллельно перемещения и скорости РУ: $Tg\dot{X}_p + X_p = Kg\dot{X}_1$, или в операторной

$$\text{форме } W_p(p) = \frac{KgP}{TgP + 1} = \frac{d_1 P}{e_0 + e_1 P}.$$

4. Аперiodичное управление, в отличие от рассмотренного выше случая, характеризуется пропорциональной зависимостью между перемещением объекта защиты и действующих в параллельной цепи перемещением и скоростью распределительного

устройства: $T_a \dot{X}_p + X_p = KX_1$, или в операторной форме [18-21] $W_p(p) = \frac{K_a}{T_a p + 1} = \frac{d_0}{e_0 + e_1 p}$.

Для определения применимости конкретного закона управления в виброактивной системе необходимо провести детальный и качественный анализ результатов работы системы при воздействии вибраций и ударов. Именно эти данные будут использоваться для принятия решений по управлению или минимизации рисков на высокотехнологичном предприятии, где присутствует виброактивное оборудование.

Анализ полученных результатов работы системы при вибрационных воздействиях позволяет оценить эффективность применения конкретного закона управления. Эти данные помогут определить, насколько успешно система справляется с воздействиями и какие необходимо предложить и предпринять меры для улучшения ее работы. На основе полученных данных можно разработать стратегию управления или минимизации рисков на предприятии.

Таким образом, оценка применимости конкретного закона управления в виброактивной системе основывается на детальном анализе результатов работы системы при воздействии вибрационных воздействий. Полученные данные в процессе анализа являются основой для принятия решений по управлению или минимизации рисков на предприятии, оснащенном высокотехнологичным оборудованием.

Устойчивость виброактивных систем

Критерии устойчивости, разработанные для систем с передаточной функцией $W(p)$, могут быть рассмотрены с помощью метода Д-разбиения, который позволяет определить границы допустимого изменения параметров и области устойчивости системы. Это позволяет обеспечить устойчивость виброактивной системы при наличии параметрических неопределенностей.

Необходимым и достаточным условием устойчивости виброактивной системы является отрицательность действительных частей всех корней λ_i , характеристического уравнения, полученного из знаменателя передаточной функции вида (7):

$$M_0 \lambda^4 + M_1 \lambda^3 + M_2 \lambda^2 + M_3 \lambda + M_4 = 0. \quad (8)$$

Представленный метод Д-разбиения является эффективным инструментом для исследования устойчивости виброактивной системы предприятия, использующего высокотехнологичное оборудование. Однако этот метод также способен оценить влияние изменяемых параметров на устойчивость имеющейся системы. Анализ кривых Д-разбиения позволяет выявить, как изменение постоянной времени влияет на величину зоны устойчивости. Это зависит от алгоритма управления $W_p(p)$, который используется в данной системе. Таким образом, метод Д-разбиения не только помогает определить устойчивость и удаленность от границ устойчивости виброактивной системы, но и позволяет

оценить влияние изменяемых параметров на ее устойчивость. Анализ кривых Д-разбиения помогает выявить зависимости между постоянной времени и величиной зоны устойчивости в зависимости от используемого алгоритма управления $W_p(p)$.

Заключение

Проблема управления высокотехнологичными предприятиями становится все более насущной не только в контексте деятельности самих компаний, но и приобретает все большую значимость в обеспечении конкурентоспособности национальной экономики. В статье представлены результаты применения методов и инструментов управления рисками на предприятии высокотехнологичного машиностроения, оснащенного виброактивными устройствами. Одной из ключевых задач разработки технологического процесса, вовлекающего в себя виброактивное оборудование, является обеспечение требуемого уровня качества производимой продукции.

Согласно проведенным исследованиям, использование инновационной методики, основанной на диакоптическом подходе, предоставляет уникальные возможности для эффективного проектирования параметров технологического процесса с применением виброактивного оборудования. Этот прогрессивный метод позволяет достичь не только необходимого уровня качества продукции, но и значительно снизить риск ошибок и поломок, связанных с использованием такого оборудования в процессе производства. Установлена неотъемлемая необходимость в контроле изменений вибрационного состояния технологического оборудования с целью снижения потенциальных рисков для машиностроительных предприятий и обеспечения безопасности производственных процессов. Регулярная диагностика технического состояния на основе данных о вибрации становится неотъемлемой частью внедрения этой методики, позволяя своевременно выявлять и анализировать возможные проблемы.

Ограничиваясь анализом вероятности технического износа оборудования на машиностроительном предприятии, как одного из критически важных факторов для обеспечения эффективной работы, в статье выдвигаются инновационные принципы реализации синтеза методов и инструментов для снижения рисков, связанных с вибрационно-активным оборудованием. Это обусловливает неотложность исследований динамических процессов, происходящих на высокотехнологичном оборудовании машиностроительного предприятия. Формулируются методы эффективного управления рисками на современном предприятии, оснащенном вибрационно-активными системами. В числе таких методов применение диакоптики и структурной интерпретации, включая структурную теорию виброзащитных систем. В качестве эффективных стратегий для снижения технического износа оборудования предлагается провести анализ передаточной функции, полученной при структурной интерпретации виброактивной

системы. Подчеркнуто, что решение поставленной задачи о минимизации рисков и обеспечении динамического качества виброактивного оборудования может быть успешно достигнуто с использованием управляемых или активных виброзащитных систем (АВЗС). При обращении к методам, описанным в структурной теории виброзащитных систем, и проведении анализа передаточной функции предложено рассмотрение законов управления виброактивной системой на основе пропорциональных, интегральных, дифференциальных или аperiodических алгоритмов управления.

Оценка применимости конкретного закона управления виброактивной системой становится возможной на основе результатов функционирования системы в соответствии с рассмотренными нормативами в условиях воздействия вибрационных и ударных воздействий. Это, в свою очередь, способствует эффективно-му решению задач управления или минимизации рисков на высокотехнологичном машиностроительном предприятии, оснащенном виброактивным оборудованием. Критерии устойчивости, специально разработанные для виброактивных систем, подвергаются анализу при использовании метода Д-разбиения, что придает всей системе дополнительный уровень надежности и оптимизации.

Список источников

1. Приказ Росстата от 15.12.2017 № 832 «Об утверждении Методики расчета показателей «Доля продукции высокотехнологичных и наукоемких отраслей в валовом внутреннем продукте». Росстат (15 декабря 2017). https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_285510/
2. Национальный доклад «Высокотехнологичный бизнес в регионах России» / под ред. С.П. Земцова. М.: РАНХиГС, АИРР, 2020. 119 с.
3. Гаврилова С.В. Концептуальные основы определения высокотехнологичного сектора экономики и функционирования высокотехнологичных компаний // Статистика и экономика. 2014. №2. С. 53-57.
4. Международный стандарт ИСО 9001:2015 «Системы менеджмента качества. Требования» (ISO 9001:2015 «Quality management systems – Requirements, IDT»).
5. Международный стандарт ИСО 31000:2018 «Менеджмент риска. Принципы и руководство» (ISO 31000:2018 «Risk management – Guidelines, IDT»).
6. ГОСТ РВ 0015-002-2020. Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования. <https://euro-register.ru>
7. Фролов В.Г., Сидоренко Ю.А., Мартынова Т.С. Формирование модели оценки и предупреждения рисков в условиях цифровизации промышленных предприятий // Экономика, предпринимательство и право. 2021. Т. 11. №6. С. 1547-1562.
8. Васин С.М., Шутов В.С. Управление рисками на предприятии: учеб. пособие. М.: КНОРУС, 2010.
9. Асаул В.В., Кощев В.А., Цветков Ю.А. Оценка конкурентоспособности организаций в условиях цифровой экономики // Вопросы инновационной экономики. 2020. №1. С. 533-547.
10. Габалова Е.Б., Тегетаева О.Р. Конкурентоспособность предприятий в условиях цифровой экономики // Modern Science. 2021. №6-2. С. 42-44.
11. Никулин Р.А. Трансформация факторов конкурентоспособности в условиях цифровой экономики // Вестник РУК. 2019. №1(35). С. 56-64.
12. Ратникова Е.А., Щеулина Т.В. Влияние рисков цифровизации на конкурентоспособность высокотехнологичных предприятий авиастроительной отрасли // Вестник Академии знаний. 2022. №48(1). С. 267-277. DOI: 10.24412/2304-6139-2022-48-1-267-277
13. Паспорт научной специальности 2.5.22. «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства» / Приказ Минобр. науки РФ «Об утверждении номенклатуры научных специальностей...» от 24.02.2021. №118.
14. Implementation of ESG Sustainable Development Concept Criteria Using the Robust Design Methods / Lontsikh P.A., Golovina E.Y., Evloeva M.V., Livshitz I.I., Koksharov A.V. // Proceedings of the 2022 International Conference "Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies". S. Petersburg, 2022, pp. 173-176.
15. Азаров В.Н., Леохин Ю.Л. Интегрированные информационные СМК. М.: Европейский центр по качеству, 2002. 64 с.
16. Семенова Е.Е. Актуальные проблемы риска в России // Инновационная наука. 2015. №6. С. 54-56.
17. Управление рисками на основе методов диакоптики при синтезе виброактивного оборудования высокотехнологичного предприятия / Лонцих П.А., Головина Е.Ю., Лонцих Н.П., Федотова А.В. // Системы. Методы. Технологии. 2023. №3(59). С. 38-45. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-3-38-45
18. Лонцих П.А. Обеспечение динамического качества станков на основе методов диакоптики и результатов диагностики: автореф. дис. ... д-ра наук. Иркутск, 2004.
19. Елисеев С.В. Структурная теория виброзащитных систем. Новосибирск: Наука, 1978. 218 с.
20. Лонцих П.А., Елисеев С.В. Динамическое качество машин и оборудования как инструмент обеспечения надежности производства и конкурентоспособности процессов. Иркутск, 2014. 322 с.
21. Связь цикла Деминга и спирали качества Джурана в задачах развития цикла PDCA и создания сетцентрической системы менеджмента / Лонцих П.А., Кунаков Е.П., Лонцих Н.П., Федотова А.В. // Качество. Инновации. Образование. 2023. №1(183). С. 3-10. DOI: 10.31145/1999-513x-2023-1-03-10

References

1. Order of Rosstat No. 832 dated December 15, 2017 "On approval of the Methodology for calculating the

- indicators of “The share of products of high-tech and knowledge-intensive industries in the gross domestic product”. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_285510/
2. National report: «High-tech business in Russian regions». 2020. National report. Moscow: Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Association of Innovative Regions of Russia, 2020, 119 p. ISBN 978-5-85006-214-9. (In Russ.)
 3. Gavrilova S.V. A conceptual framework for determining a high-tech sector of the economy and functioning high-tech companies. *Statistika i ekonomika* [Statistics and Economics]. 2014;(2):53-57. (In Russ.)
 4. International standard ISO 9001:2015. Quality management systems. Requirements. Available at: <https://www.iso.org/obp>
 5. International standard ISO 31000:2018. Risk management. Guidelines. Available at: <https://pqm-online.com › iso-31000-2018-PDF>
 6. State standard GOST RV 0015-002-2020. The system for the development and production of military equipment. Quality management systems. General requirements. Available at: <https://euro-register.ru>.
 7. Frolov V.G., Sidorenko Yu.A., Martynova T.S. Creating a model for assessing and preventing risks in the context of digitalization of industrial enterprises. *Ekonomika, predprinimatelstvo i pravo* [Economics, Entrepreneurship and Law]. 2021;11(6):1547-1562. (In Russ.)
 8. Vasin S.M., Shutov V.S. *Upravlenie riskami na predpriyatii: ucheb. posobie* [Risk management at an enterprise: study guide]. Moscow: KNORUS, 2010. (In Russ.)
 9. Asaul V.V., Koshcheev V.A., Tsvetkov Yu.A. Assessing competitiveness of organizations in the digital economy. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki* [Issues of Innovative Economics]. 2020;(1):533-547. (In Russ.)
 10. Gabalova E.B., Tegetaeva O.R. Competitiveness of enterprises in the digital economy. *Modern Science*. 2021;(6-2):42-44. (In Russ.)
 11. Nikulin R.A. Transformation of competitiveness factors in the digital economy. *Vestnik RUK* [Vestnik of the Russian University of Cooperation]. 2019; (1(35)):56-64. (In Russ.)
 12. Ratnikova E.A., Shcheulina T.V. The impact of digitalization risks on competitiveness of high-tech enterprises in the aircraft industry. *Vestnik Akademii znaniy* [Bulletin of the Academy of Knowledge]. 2022;(48(1)):267-277. (In Russ.) DOI: 10.24412/2304-6139-2022-48-1-267-277
 13. Certificate of research major 2.5.22. “Product quality management. Standardization. Organization of production”. Order of the Ministry of Education and Science No. 118 dated February 24, 2021 “On approval of the nomenclature of research majors”.
 14. Lontsikh P.A., Golovina E.Y., Evloeva M.V., Livshitz I.I., Koksharov A.V. Implementation of ESG sustainable development concept criteria using the robust design methods. Proceedings of the 2022 International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies”. Saint Petersburg, 2022, pp. 173-176. DOI: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976803
 15. Azarov V.N., Leokhin Yu.L. *Integrirovannye informatsionnye SMK* [Integrated information QMS]. Moscow: European Center for Quality, 2002, 64 p. (In Russ.)
 16. Semenova E.E. Current problems of risk in Russia. *Innovatsionnaya nauka* [Innovative Science]. 2015;(6):54-56. (In Russ.)
 17. Lontsikh P.A., Golovina E.Yu., Lontsikh N.P., Fedotova A.V. Risk management based on the diakoptics methods in the synthesis of vibration active equipment at a high-tech enterprise. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. 2023;(3(59)):38-45. (In Russ.) DOI: 10.18324/2077-5415-2023-3-38-45
 18. Lontsikh P.A. *Obespechenie dinamicheskogo kachestva stankov na osnove metodov diakoptiki i rezultatov diagnostiki: avtoref. dis. ... d-ra nauk* [Ensuring the dynamic quality of machines using the diakoptics methods and diagnostic results. Extended abstract of the doctoral thesis]. Irkutsk, 2004.
 19. Eliseev S.V. *Strukturnaya teoriya vibrozashchitnykh sistem* [Structural theory of vibration isolation systems]. Novosibirsk: Nauka, 1978, 218 p. (In Russ.)
 20. Lontsikh P.A., Eliseev S.V. *Dinamicheskoe kachestvo mashin i oborudovaniya kak instrument obespecheniya nadezhnosti proizvodstva i konkurentosposobnosti protsessov* [Dynamic quality of machines and equipment as a tool for ensuring production reliability and competitiveness of processes]. Irkutsk, 2014, 322 p. (In Russ.)
 21. Lontsikh P.A., Kunakov E.P., Lontsikh N.P., Fedotova A.V. The connection between the Deming cycle and the Juran quality spiral in the tasks of developing the PDCA cycle and creating a network-centric management system. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education]. 2023;(1(183)):3-10. (In Russ.) DOI: 10.31145/1999-513x-2023-1-03-10

Поступила 25.01.2024; принята к публикации 15.04.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 25/01/2024; revised 15/04/2024; published 27/06/2024

Лонцих Павел Абрамович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации и управления, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия. Email: palon@list.ru. ORCID 0000-0001-7688-31904

Головина Елена Юрьевна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и управления, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 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, Иркутск, Россия. Email: natalysib@list.ru. ORCID 0000-0002-0453-9156

Лившиц Илья Иосифович – доктор технических наук, профессор практики, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия. Email: livshitz.il@yandex.ru. ORCID 0000-0003-0651-8591. Scopus ID 57191569306.

Pavel A. Lontsikh – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Automation and Control, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: palon@list.ru. ORCID 0000-0001-7688-31904

Elena Yu. Golovina – PhD (Economics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics and Digital Business Technologies, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: elena_uspeh@mail.ru. ORCID 0000-0002-5215-9289

Natalia P. Lontsikh – PhD (Pedagogy), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Control, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Email: natalysib@list.ru. ORCID 0000-0002-0453-9156

Илья И. Livshits – DrSc (Eng.), Adjunct Professor, National Research University ITMO, Saint Petersburg, Russia. Email: livshitz.il@yandex.ru. ORCID 0000-0003-0651-8591. Scopus ID 57191569306.



ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ИНТЕГРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА НА ПРИМЕРЕ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША, ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО НА ОПАСНОМ ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ОБЪЕКТЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Наркевич М.Ю.¹, Логунова О.С.¹, Жижка В.Н.¹, Логунова Т.В.¹, Шайхулина Н.В.¹, Азаров А.П.²

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

² Жилищно-инвестиционный фонд «Ключ», Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Metallurgical industry is one of the key sectors in the Russian Federation. More than 70% of metallurgical enterprises are grade-forming, their production is in high demand by the final consumer and for subsequent reprocessing at enterprises of machine building, metal processing and others. At the same time, on the territory of the Ural Federal District, there are more than 7.7 thousand large industrial enterprises, operating dangerous production objects (OPO). OPOs are an inseparable part of enterprises of the metallurgical industry, where various technical devices: machines, technological equipment and their systems, aggregates, apparatus, mechanisms [1-3, 5]. According to the innovations of 2023, during the expert assessment of the industrial safety of technical devices, buildings and structures, the use of information, obtained with the use of automated systems of collection and processing of information. The authors of the research have developed a three-level method of integrative quality assessment of OPO elements, described in detail in the works [4, 6]. In the article, the features of the application of the indicated method for a technical device – ladle, operating on the territory of the oxygen converter shop of JSC «Magnitogorsk Metallurgical Combine». **Цель работы.** Оценка работоспособности трехуровневого метода интегративной оценки качества, включая процесс гармонизации базовых и цифровых значений экспертных оценок (показателей качества). **Используемые методы.** Разработанный авторами трехуровневый метод интегративной оценки качества элементов ОПО. **Новизна.** Предемонстрирован алгоритм реализации трехуровневого метода интегративной оценки качества, включая процесс гармонизации базовых и цифровых значений экспертных оценок (показателей качества). **Результат.** Доказана эффективность применения трехуровневого метода интегративной оценки качества для технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах. **Практическая значимость.** Предложенный метод интегративной оценки качества элементов ОПО заложен в основу структуры организационно-методического обеспечения прикладной цифровой платформы для экспертизы элементов ОПО с использованием информации, полученной с применением автоматизированных систем сбора и обработки информации.

Ключевые слова: оценка качества, базовые показатели качества, цифровые показатели качества, гармонизация оценок качества, сталеразливочный ковш, инфраструктура металлургического предприятия

© Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Жижка В.Н., Логунова Т.В., Шайхулина Н.В., Азаров А.П., 2024

Для цитирования

Практическая реализация метода интегративной оценки качества технического устройства на примере сталеразливочного ковша, эксплуатируемого на опасном производственном объекте металлургического предприятия / Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Жижка В.Н., Логунова Т.В., Шайхулина Н.В., Азаров А.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 181-189. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-181-189>



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

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE INTEGRATIVE ASSESSMENT METHOD FOR THE QUALITY OF TECHNICAL EQUIPMENT USING THE EXAMPLE OF A STEEL LADLE OPERATED AT A HAZARDOUS PRODUCTION FACILITY OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

Narkevich M.Yu.¹, Logunova O.S.¹, Zhizhka V.N.¹, Logunova T.V.¹, Shaikhulina N.V.¹, Azarov A.P.²

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

² Klyuch Housing and Investment Fund, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The metallurgical industry is one of the key industries in the Russian Federation. Over 70% of metallurgical enterprises are city-forming ones; their products are in demand by end consumers and for downstream processing at mechanical engineering, metalworking enterprises and others. At the same time, over 7700 industrial enterprises, operating hazardous production facilities (HPFs), are concentrated in the Ural Federal District. HPFs are an integral part of enterprises of the metallurgical industry, which use various technical facilities: machines, technological equipment and their systems, units, equipment, mechanisms [1-3, 5]. According to the innovations of 2023, when examining industrial safety of technical facilities, buildings and structures, it is allowed to use information obtained by automated systems for collecting and processing information. The authors of the studies developed a three-level integrative assessment method for the quality of elements of HPFs described in detail in [4, 6]. The article presents the features of the application of this method for the technical equipment, namely a steel ladle operated at the basic oxygen furnace shop of PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works. **Objectives.** The research is aimed at assessing the performance of a three-level integrative quality assessment method, including the process of harmonizing the basic and digital values of expert assessments (quality indicators). **Methods Applied.** The paper describes a three-level integrative assessment method for the quality of the HPF elements developed by the authors. **Originality.** The authors demonstrated an algorithm for implementing a three-level integrative quality assessment method, including the process of harmonizing the basic and digital values of expert assessments (quality indicators). **Result.** The research proved efficiency of using a three-level method of integrative quality assessment for technical equipment operated at hazardous production facilities. **Practical Relevance.** The proposed integrative assessment method for the quality of the HPF elements is the basis for the structure of the organizational and methodological support of an applied digital platform for examining the HPF elements using information obtained by automated systems for collecting and processing information.

Keywords: quality assessment, basic quality indicators, digital quality indicators, harmonization of quality assessments, steel ladle, metallurgical enterprise infrastructure

For citation

Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Zhizhka V.N., Logunova T.V., Shaikhulina N.V., Azarov A.P. Practical Implementation of the Integrative Assessment Method for the Quality of Technical Equipment Using the Example of a Steel Ladle Operated at a Hazardous Production Facility of a Metallurgical Enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 181-189. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-181-189>

Введение

Вызовы металлургического производства. В Российской Федерации на конец 2020 года насчитывается более 325 тыс. промышленных предприятий и их количество продолжает ежегодно возрастать. При этом их доля в ВВП России составляет около 33% и занятость населения в этой области около 27%. Развитие современного промышленного предприятия сопровождается проектированием, строительством и эксплуатацией опасных производственных объектов (ОПО). Статистические показатели, приведенные [1], показывают, что промышленное производство в России в апреле 2023 года выросло на 5,1% за год, за 4 года промышленность выростала на 6,2%, преодолев

последствия кризиса COVID-19 и санкционного удара в 2022 году.

В Российской Федерации территориальное распределение предприятий, эксплуатирующих ОПО, является неравномерным. Это объясняется концентрацией крупных промышленных предприятий на территории Уральского федерального округа (**рис. 1**) [2].

На **рис. 1** введены обозначения: ЦФО – Центральный федеральный округ; СЗФО – Северо-Западный федеральный округ; ЮФО – Южный федеральный округ; ПФО – Приволжский федеральный округ; УФО – Уральский федеральный округ; СФО – Сибирский федеральный округ; ДФО – Дальневосточный федеральный округ; СКФО – Северо-Кавказский федеральный округ.

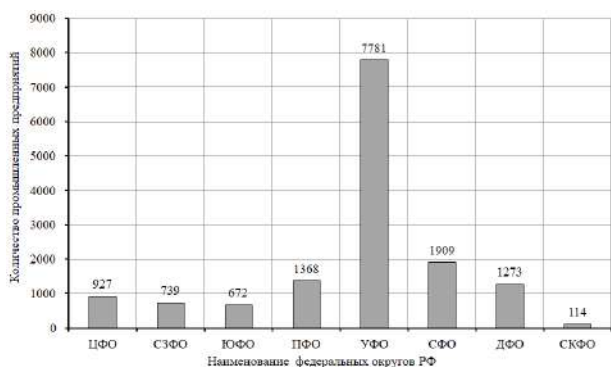


Рис. 1. Распределение предприятий, эксплуатирующих ОПО по территории Российской Федерации
 Fig. 1. Distribution of enterprises, operating HPFs in the Russian Federation

Количество ОПО, зафиксированных в Российской Федерации в 2016 и 2023 годах, составляют наибольший риск возникновения аварий и инцидентов. По официальным данным Ростехнадзора за 2020 год [3] в государственном реестре на 01.01.2020 г. зарегистрировано 178846 ОПО. В составе предприятий металлургической отрасли представлены ОПО всех четырех классов опасности, способные в случае аварии вызвать нарушение или остановку технологического процесса, разрушение технических устройств, зданий и сооружений, причинить ущерб жизни и здоровью граждан, оказать негативное воздействие на окружающую среду.

Широкая распространенность ОПО в промышленности, включая металлургическую область, потребовала рассмотреть вопросы обеспечения качества экспертной оценки соответствия технического состояния инфраструктурного объекта заданному состоянию.

Инфраструктурное обеспечение металлургических процессов. Функционирование основных производственных процессов невозможно без инфраструктурного обеспечения. Одним из составляющих компонентов инфраструктуры являются ОПО и их элементы.

Схематично описание процессов мониторинга и оценки соответствия элементов ОПО представлено на рис. 2.

Вызовы к цифровой оценке качества элементов ОПО. Оценка качества элементов ОПО зависит от интерпретации человеком-экспертом информации, полученной в ходе проведения экспертизы. Определяются каждые отдельные несоответствия обязательным требованиям стандартов (дефекты и повреждения), по которым производится сравнение с нормативными значениями подобных показателей. Оценка допустимости дефектов и их влияния на объект экспертизы производится *по барьерным значениям показателей*. При этом не разработан универсальный метод, позволяющий дать *непрерывную интегративную оценку качества* элемента ОПО [4]. Согласно нововведениям 2023 года, в нормативных документах допускается использование информации, полученной при эксплуатации автоматизированных систем сбора и обработки информации. Поэтому авторами исследований [5] разработан трехуровневый метод для гармонизации базовых и цифровых экспертных оценок, который подробно изложен в [6]. Применение указанного метода для каждого вида элементов ОПО (задания, сооружения и технические устройства) имеют свои особенности. Особенности применения этого метода для зданий, эксплуатирующихся в условиях металлургического предприятия, изложены в [7].



Рис. 2. Схема процессов мониторинга и оценки соответствия технического состояния элементов ОПО
 Fig. 2. Diagram of the processes of the monitoring and compliance assessment of the technical condition of the HPF elements

Авторами работы введены понятия:

– базовые показатели качества – это показатели, предусмотренные действующей нормативной и технической документацией и полученные традиционными методами: значения отклонений геометрических размеров элементов, прочностных и деформационных характеристик материалов, прогибов и перемещений конструкций, все виды разрушения материалов конструкций;

– цифровые показатели качества – показатели, определяемые и оцениваемые с использованием прикладной цифровой платформы: наличие или отсутствие определенных элементов на цифровом изображении, абсолютные и относительные значения размеров обнаруженных дефектов и повреждений, их прирост, динамика изменения.

Некоторые из указанных показателей качества и разработанный метод интегративной оценки опробованы в процессе оценки качества и гармонизации значений экспертных оценок технического состояния технического устройства – ковша сталеплавильного. Результаты опробования приведены в тексте статьи.

Материалы и методы исследования

Постановка задачи исследования. Объектом экспертной оценки является техническое устройство – ковш сталеразливочный, эксплуатируемый в составе ОПО «Участок электросталеплавильный (ОПП)» (II класс опасности), расположенный на территории кислородно-конвертерного цеха ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

Ковш сталеразливочный предназначен для приема, транспортирования и разлива жидкой стали и является элементом опасного производственного объекта II класса опасности. II класс опасности присваивается ОПО высокой опасности, на которых используется оборудование, рассчитанное на максимальное количество расплава 10 т и более.

Общий вид ковша сталеразливочного представлен на **рис. 3**.



Рис. 3. Общий вид ковша сталеразливочного
Fig. 3. General view of the steel ladle

Технические характеристики ковша сталеразливочного приведены в **табл. 1**.

Таблица 1. Технические характеристики ковша сталеразливочного

Table 1. Technical characteristics of the steel ladle

Наименование параметра	Значение
Год изготовления	1988
Год ввода в эксплуатацию	1988
Тип	НС-385
Стационарный номер	12
Масса стали, т	4,67
Масса футеровки, т	59
Масса металлической части ковша, т	48,3
Общая масса нормально груженого ковша, т	495,9
Расстояние по осям крюков, мм	5500
Диаметр цапф под крюк, мм	500
Длина цапфы для захвата крюками, мм	280
Запас прочности цапф при 10% износе	8,5

Требуется установить соответствие состояния технического устройства – ковша сталеразливочного, эксплуатируемого в составе ОПО «Участок электросталеплавильный (ОПП)» (II класс опасности), расположенного на территории кислородно-конвертерного цеха ПАО «ММК», требованиям нормативных правовых актов и стандартов Российской Федерации на основе экспертной оценки.

Определение лингвистической переменной, ее терм и показателей качества технического устройства. Согласно техническому заданию на проведение экспертизы элемента ОПО, определены основные нормативные документы, содержащие требования и показатели для экспертной оценки качества технического устройства:

– Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ;

– Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности процессов получения или применения металлов» (Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 09.12.2020 г. № 512);

– Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» (Приказ Ростехнадзора от 20.10.2020 г. № 420);

– Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Основные требования к проведению неразрушающего контроля технических устройств, зданий и сооружений на опасных производственных объектах» (Приказ Ростехнадзора от 01.12.2020 г. № 478);

– ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения».

Согласно идентифицированным документам и алгоритму, приведенному в [6, 7], определяем структуру лингвистической переменной:

– лингвистическая переменная U_0 – состояние технического устройства ковша сталеразливочного, эксплуатируемого на территории кислородно-конвертерного цеха ПАО «ММК»;

– лингвистическая переменная 1-го уровня – решение, полученное на основе базовых X_B и перспективных X_P показателей качества.

В результате проведения экспертизы по оценке состояния технического устройства экспертом выбраны основные показатели качества в соответствии с обнаруженными дефектами и повреждениями:

– множество базовых показателей, полученных органолептическим методом:

$$X_B = \{X_{B1}, X_{B2}, X_{B3}\},$$

где X_{B1} – значение величины износа цапфы ковша, в процентах от первоначальных размеров; X_{B2} – значение величины коррозионного износа обечаяк и днища ковша, %; X_{B3} – ширина раскрытия трещин основного металла ребра жесткости и корпуса ковша, мм;

– множество перспективных показателей качества, полученных с использованием новых цифровых средств:

$$X_P = \{X_{P1}, X_{P2}\},$$

где X_{P1} – наличие или отсутствие раковин, трещин в стенках и в местах крепления цапф на цифровом

изображении ковша; X_{P2} – ширина раскрытия трещин основного металла ребра жесткости и корпуса ковша, мм.

Решения, принимаемые в системе оценки качества, обозначим: Y_1 – решения, принятые на основе базовых показателей; Y_2 – решения, принятые на основе перспективных показателей. Множество возможных решений образуют термы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{"Исправное", "Работоспособное",} \\ \text{"Неработоспособное", "Предельное", "Опасное"} \end{array} \right\}.$$

Также для идентифицированных документов экспертно назначены ранги предпочтения для каждой термы лингвистических переменных Y_1 и Y_2 (табл. 2).

За каждой термой лингвистической переменной Y_1 и Y_2 определяем состояние и перечень мероприятий для проведения на элементах ОПО согласно ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения» (табл. 3).

Таблица 2. Ранги предпочтения для каждой термы лингвистических переменных первого уровня

Table 2. Preference ranks for every term of linguistic variables of the first level

Статус	Ранг α
Исправное	5
Работоспособное	4
Неработоспособное	3
Предельное	2
Опасное	1

Таблица 3. Описание терм по ГОСТ Р 27.102-2021 и мероприятий для проведения на элементах ОПО
Table 3. Description of terms according to GOST R 27.102-2021 and measures to be carried out with the HPF elements

№ п/п	Состояние	Описание	Мероприятия
1	Исправное состояние	Состояние объекта, в котором все параметры объекта соответствуют всем требованиям, установленным в документации на этот объект	Не требуются
2	Работоспособное состояние	Состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной и технической документации	Не требуются
3	Неработоспособное состояние	Состояние объекта, в котором значение хотя бы одного из параметров, характеризующих способность объекта выполнять заданные функции, не соответствует требованиям документации на этот объект	Ограничение эксплуатационных параметров. Мониторинг технического состояния либо проведение необходимых мероприятий по восстановлению или усилению конструкций с последующим мониторингом технического состояния (при необходимости)
4	Предельное состояние	Состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно	Вывод из эксплуатации. Проведение страховочных и противоаварийных мероприятий (при необходимости)
5	Опасное состояние	Состояние объекта, которому соответствует высокая вероятность или высокая значимость неблагоприятных последствий для людей, окружающей среды и материальных ценностей	Вывод из эксплуатации. Проведение страховочных и противоаварийных мероприятий

Выбор решения эксперта о проведении необходимого комплекса мероприятий для элементов ОПО. Для каждого показателя качества с использованием экспертных оценок определены ключевые точки изменения состояния объекта согласно положениям ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения».

Для лингвистической переменной Y_1 :

$$\mu_{X_{B1}} = \left\{ \frac{1,00}{0,00}; \frac{0,08}{3,00}; \frac{0,50}{5,50}; \frac{0,15}{8,00}; \frac{0,00}{10,00} \right\},$$

$$\mu_{X_{B2}} = \left\{ \frac{1,00}{0,00}; \frac{0,80}{1,50}; \frac{0,50}{3,00}; \frac{0,15}{4,00}; \frac{0,00}{5,00} \right\},$$

$$\mu_{X_{B3}} = \left\{ \frac{1,00}{0,00}; \frac{0,80}{4,00}; \frac{0,60}{6,00}; \frac{0,30}{8,00}; \frac{0,00}{10,00} \right\}.$$

Для лингвистической переменной Y_2 :

$$\mu_{X_{P1}} = \left\{ \frac{1,00}{0,00}; \frac{0,00}{0,00}; \frac{0,00}{1,20} \right\},$$

$$\mu_{X_{P2}} = \left\{ \frac{1,00}{0,00}; \frac{0,80}{4,00}; \frac{0,60}{6,00}; \frac{0,30}{8,00}; \frac{0,00}{10,00} \right\}.$$

Учитывая, что значения интегративных оценок лежат на непрерывных кривых, выполнена аппроксимация функций принадлежности лингвистической переменной Y_1 (рис. 4) и лингвистической переменной Y_2 (рис. 5).

В табл. 4 и 5 приведены примеры принятия решений о статусе технического состояния сталеплавильного ковша согласно введенным функциям принадлежности для компонент Y_1 и Y_2 .

Полученные параметры по базовым показателям качества сведены в табл. 6, по цифровым – в табл. 7.

Таблица 4. Определение статуса для компоненты Y_1
Table 4. Status determination for component Y_1

Наименование показателя	Значение показателя	Значение оценки	Диапазон оценки	Решение о статусе	Описание статуса
X_{B1}	4,0	0,69	[0,50-0,80)	4	Работоспособное
X_{B2}	1,5	0,82	[0,80-1,00)	5	Исправное
X_{B3}	3,0	0,89	[0,80-1,00)	5	Исправное

Таблица 5. Определение статуса для компоненты Y_2
Table 5. Status determination for component Y_2

Наименование показателя	Значение показателя	Значение оценки	Диапазон оценки	Решение о статусе	Описание статуса
X_{P1}	0,00	1,00	>0,00	5	Исправное
X_{P2}	8,00	0,31	(0,30-0,60]	3	Неработоспособное

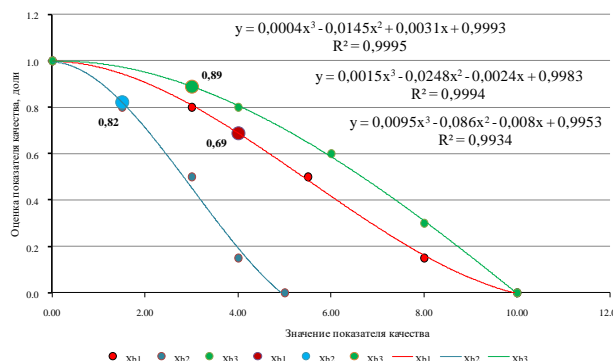


Рис. 4. Аппроксимация функций принадлежности по базовым показателям качества X_{B1}, X_{B2}, X_{B3}

Fig. 4. Approximation of membership functions by basic quality indicators X_{B1}, X_{B2}, X_{B3}

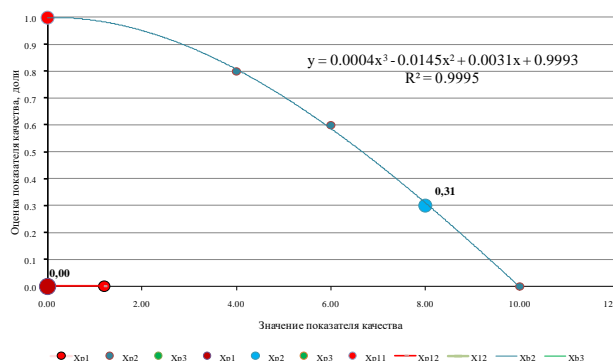


Рис. 5. Аппроксимация функций принадлежности по перспективным показателям качества X_{P1}, X_{P2}

Fig. 5. Approximation of membership functions by promising quality indicators X_{P1}, X_{P2}

Таблица 6. Определенные параметры по базовым показателям качества
Table 6. Determined parameters for the basic quality indicators

Наименование показателя	Значение показателя	Значение оценки	Решение о статусе	Решение о ранге	Общее решение
X_{B1}	4,0	0,69	4	4	4
X_{B2}	1,5	0,82	5	5	
X_{B3}	3,0	0,89	5	5	

Таблица 7. Определенные параметры по перспективным показателям качества
Table 7. Determined parameters for the promising quality indicators

Наименование показателя	Значение показателя	Значение оценки	Решение о статусе	Решение о ранге	Общее решение
X_{D1}	0,00	1,00	5	5	4
X_{D2}	4,50	0,76	4	4	

Использование принципа суперпозиции для гармонизации решения показателей. Используем принцип суперпозиции [6, 7], построенный согласно предпочтению рангов каждой из компонент Y_1 и Y_2 :

$$h(Y_2(Y_1)) = \begin{cases} Y_1, & \text{при } Y_1 = Y_2; \\ Y_2, & \text{при } Y_1 - Y_2 = 1; \\ Y_1, & \text{при } Y_1 - Y_2 = -1; \\ \frac{Y_1 + Y_2}{2}, & \text{при } |Y_1 - Y_2| = 2; \\ \emptyset, & \text{при } |Y_1 - Y_2| \geq 3, \end{cases} \quad (1)$$

где $h(Y_2(Y_1))$ – итоговый ранг.

С учетом равенства рангов результирующих терм Y_1 и Y_2 итоговый статус принятия решений остается неизменным и равным 4.

Формулируем вывод о значении лингвистической переменной с указанием степени принадлежности каждого показателя к статусу опасности (табл. 8).

Итоговый вывод о соответствии (не в полной мере соответствие, несоответствие) элемента ОПО требованиям нормативных правовых актов и стандартов Российской Федерации исходит из соотнесения принятого решения по возможности эксплуатации. Соотношение статуса с решением о возможности эксплуатации элемента ОПО (объекта экспертной оценки) исходя из требований нормативных правовых актов и стандартов Российской Федерации представлено в табл. 9.

Таблица 8. Степень принадлежности показателей качества к статусу опасности
Table 8. The membership degree of the quality indicators to the hazard status

Наименование показателя	Значение показателя	Значение оценки	Решение о статусе	Решение о ранге	Описание статуса
X_{B1}	4,0	0,69	4	4	Работоспособное
X_{B2}	1,5	0,82	5	5	Исправное
X_{B3}	3,0	0,89	5	5	Исправное
X_{D1}	0,00	1,00	5	5	Исправное
X_{D2}	4,50	0,76	4	4	Работоспособное

Таблица 9. Соотношение статуса с решением о возможности эксплуатации элемента ОПО
Table 9. Correlation of the status with the decision on the possibility of operating the HPF element

Описание статуса	Ранг	Решение
Исправное состояние	5	Соответствует
Работоспособное состояние	4	
Ограниченно работоспособное состояние	3	Не в полной мере соответствует
Недопустимое состояние	2	Не соответствует
Аварийное состояние	1	

На основе реализации метода интегративной оценки качества функционирования элементов ОПО – ковш сталеразливочный, эксплуатируемый в составе ОПО «Участок электросталеплавильный (ОПП)» (II класс опасности), расположенный на территории кислородно-конвертерного цеха ПАО «ММК», сделан вывод о соответствии рассматриваемого объекта требованиям нормативных правовых актов и стандартов Российской Федерации.

С учетом соответствия технического устройства – ковш сталеразливочный, эксплуатируемый в составе ОПО «Участок электросталеплавильный (ОПП)» (II класс опасности), расположенного на территории кислородно-конвертерного цеха ПАО «ММК», предъявляемым требованиям, управляющего воздействия, направленного на изменение показателей качества его технического состояния, не требуется.

Заключение

1. Определены вызовы, которые потребовали разработки метода, включающего гармонизацию базовых и цифровых показателей для построения интегративной оценки качества элементов ОПО [1-3].

2. Продемонстрирована возможность применения трехуровневого метода интегративной оценки качества функционирования технического устройства – ковш сталеразливочный, эксплуатируемый в составе ОПО «Участок электросталеплавильный (ОПП)» (II класс опасности), расположенный на территории кислородно-конвертерного цеха ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

3. Оценка технического состояния сталеразливочного ковша по базовым и цифровым показателям показала непротиворечивые результаты [6, 7].

4. Применение метода интегративной оценки качества, в том числе процесса гармонизации значений оценок технического состояния сталеразливочного ковша, определило возможность его использования при построении новых алгоритмов и правил принятия решений по экспертной информации, а также при проектировании новых систем и устройств для элементов ОПО.

5. Доказана универсальность метода гармонизации и возможность его развития для любого количества показателей качества [8-10].

Список источников

1. Промышленное производство в России. 2023: сб. ст. / Росстат. М.: Росстат, 2023. 305 с.
2. Годовые отчеты. О деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Сайт]. Режим доступа: URL: https://www.gos-nadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 07.02.2022).
3. Годовой отчет. О деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2020 году / Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности».

М.: НТЦ ЯРБ, 2021. 369 с.

4. Анализ эффективности существующей системы оценки качества материалов, изделий и конструкций на опасных производственных объектах / Наркевич М.Ю., Корниенко В.Д., Логунова О.С. и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19. №2. С. 103-111.
5. Наркевич М.Ю. Развитие методологии создания системы менеджмента качества металлургического предприятия, эксплуатирующего опасные производственные объекты, на основе прикладной цифровой платформы: дис. ... д-ра техн. наук / Наркевич Михаил Юрьевич. Магнитогорск, 2023. 332 с.
6. Наркевич М.Ю., Логунова О.С. Гармонизация базовых и цифровых показателей принадлежности опасных производственных объектов заданному техническому состоянию // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. №3(114). С. 31-46.
7. Наркевич М.Ю., Логунова О.С. Результаты применения метода гармонизации экспертных оценок на примере управления качеством функционирования промышленного здания // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. №5(116). С. 52-66.
8. Абызгильдина С.Ш. База знаний экспертной системы в области промышленной безопасности: специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность (по отраслям)»: дис. ... канд. техн. наук / Абызгильдина Сакина Шагадатовна. Уфа, 2006. 193 с.
9. Абызов В.Г., Новиков И.С. Управление оборудованием для мониторинга и измерений в системе менеджмента качества организации // Мир измерений. 2014. №8. С. 31-34.
10. Азаров В.Н. Управление качеством: в 2 т. Т. 1. Основы обеспечения качества. М.: МГИЭМ, 1999. 326 с.

References

1. *Promyshlennoe proizvodstvo v Rossii. 2023: sb.st. Rosstat* [Industrial production in Russia. 2023: collection of papers. Federal State Statistics Service]. Moscow: Rosstat, 2023, 305 p. (In Russ.)
2. Annual reports on operations of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Power Supervision. Available at: https://www.gos-nadzor.ru/public/annual_reports/ (Accessed on February 07, 2022).
3. *Godovoy otchet. O deyatel'nosti Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2020 godu / Federalnoe byudzhethnoe uchrezhdenie «Nauchno-tekhnicheskiiy tsentr po yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti»* [Annual report on operations of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Power Supervision in 2020. Federal Budgetary Institution Research and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety]. Moscow: Research and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, 2021, 369 p. (In Russ.)

4. Narkevich M.Yu., Kornienko V.D., Logunova O.S. et al. Analysis of efficiency of the existing quality assessment system for materials, products, and structures at hazardous production facilities. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(2):103-111. (In Russ.)
5. Narkevich M.Yu. *Razvitie metodologii sozdaniya sistemy menedzhmenta kachestva metallurgicheskogo predpriyatiya, ekspluatiruyushchego opasnye proizvodstvennyye obekty, na osnove prikladnoy tsifrovoy platformy: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Development of the methodology for developing the quality management system of the metallurgical works, operating hazardous production facilities, based on the applied digital platform. Doctoral thesis]. Magnitogorsk, 2023, 332 p.
6. Narkevich M.Yu., Logunova O.S. Harmonizing basic and digital indicators of membership of hazardous production facilities to the set technical state. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University]. 2023;(3(114)):31-46. (In Russ.)
7. Narkevich M.Yu., Logunova O.S. Results of applying the method of harmonizing expert assessments using the example of managing the quality of functioning of an industrial building. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Cherepovets State University]. 2023;(5(116)):52-66. (In Russ.)
8. Abyzgildina S.Sh. *Baza znaniy ekspertnoy sistemy v oblasti promyshlennoy bezopasnosti: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Base of knowledge of the expert system in the field of industrial safety: PhD thesis]. Ufa, 2006, 193 p.
9. Abyzov V.G., Novikov I.S. Monitoring and measuring equipment control in the quality management system of the organization. *Mir izmerenii* [World of Measurement]. 2014;(8):31-34. (In Russ.)
10. Azarov V.N. *Upravlenie kachestvom: v 2 t. T. 1. Osnovy obespecheniya kachestva* [Quality management: in 2 volumes. Vol. 1. Basics of quality assurance]. Moscow: Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, 1999, 326 p. (In Russ.)

Поступила 19.02.2024; принята к публикации 30.02.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 19/02/2024; revised 30/02/2024; published 27/06/2024

Наркевич Михаил Юрьевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования и строительства зданий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: narkevich_mu@mail.ru. ORCID 0000-0001-6608-8293

Логунова Оксана Сергеевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: logunova66@mail.ru. ORCID 0000-0002-7006-8639

Жижка Владимир Николаевич – проректор по развитию инфраструктуры, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: v.zhizhka@magtu.ru.

Логунова Татьяна Валерьевна – заведующий лабораторией кафедры вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: t-logunova@mail.ru. ORCID 0000-0002-9925-3109

Шайхулина Наталья Вячеславовна – магистрант, кафедра проектирования и строительства зданий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: natashavertoprahova@gmail.com.

Азаров Александр Петрович – директор жилищно-инвестиционного фонда «Ключ», Магнитогорск, Россия. Email: 79048170011@yandex.ru.

Mikhail Yu. Narkevich – DrSc (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Building Design and Construction, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: narkevich_mu@mail.ru. ORCID 0000-0001-6608-8293

Oksana S. Logunova – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Computer Engineering and Programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: logunova66@mail.ru. ORCID 0000-0002-7006-8639

Vladimir N. Zhizhka – Vice Rector for Infrastructure Development, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: v.zhizhka@magtu.ru.

Tatyana V. Logunova – Head of the Laboratory of the Department of Computer Science and Programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: t-logunova@mail.ru. ORCID 0000-0002-9925-3109

Natalia V. Shaikhulina – Master's student, Department of Building Design and Construction, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: natashavertoprahova@gmail.com.

Aleksandr P. Azarov – Director of Klyuch Housing and Investment Fund, Magnitogorsk, Russia. Email: 79048170011@yandex.ru.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 005.6
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-2-190-198



ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОБЛЕМ ПРОЦЕДУРЫ АККРЕДИТАЦИИ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Макаева А.Р.¹, Денисова Я.В.²

¹ Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности, Казань, Россия

² Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Аннотация. Для обеспечения функционирования системы менеджмента качества и получения конкурентных преимуществ многие организации используют различные методы и инструменты качества. Набор этих методов достаточно широкий и применяется для достижения различных целей. Аккредитация испытательных и калибровочных лабораторий на соответствие стандарту ГОСТ ISO/IEC 17025 является непростой задачей и стратегическим решением лаборатории, основанном на подходе, учитывающим риски и возможности. Процедура прохождения аккредитации, как и любая процедура лаборатории, должна быть оценена с точки зрения риск-ориентированного мышления. Существует несколько инструментов управления качеством, позволяющих выявить факторы, влияющие на исследуемый процесс. Одним из них является диаграмма Исикавы, которая четко показывает взаимосвязь между выявленной проблемой и ее потенциальными причинами. **Цель работы.** Получение положительного решения по аккредитации испытательной лаборатории путем предварительной проработки «узких мест», выявленных в ходе экспертного анализа, с применением инструментов и методов менеджмента качества. **Новизна.** Состоит в том, что впервые предложен подход, основанный на упреждающих действиях, который позволит лаборатории снизить риски по всем выявленным «узким» местам при прохождении аккредитации и достичь намеченной цели с наименьшими потерями. В ходе работы экспертным путем были определены факторы, влияющие на ключевую цель: менеджмент (организация работы), оборудование, персонал, помещения и методы. Определенный расчетным путем коэффициент конкордации (0,725) показал, что суждения экспертов имеют достаточно высокую достоверность. **Результат.** С помощью методов менеджмента качества установлено, что менеджмент (организация работы), оборудование и персонал оказывают наибольшее влияние на достижение конечной цели – получение положительного решения по аккредитации. На основании этого факта испытательным лабораториям, готовящимся к прохождению данной процедуры, рекомендовано на данные факторы обратить особо пристальное внимание.

Ключевые слова: испытательная лаборатория, аккредитация, диаграмма Исикавы, ГОСТ ISO/IEC 17025, риски

© Макаева А.Р., Денисова Я.В., 2024

Для цитирования

Макаева А.Р., Денисова Я.В. Применение методов менеджмента качества для анализа проблем процедуры аккредитации испытательной лаборатории // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №2. С. 190-198. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-190-198>



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

APPLICATION OF QUALITY MANAGEMENT METHODS TO ANALYZE THE PROBLEMS OF THE ACCREDITATION PROCEDURE OF THE TESTING LABORATORY

Makaeva A.R.¹, Denisova Ya.V.²

¹ Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety, Kazan, Russia

² Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Abstract. To ensure functioning of the quality management system and get competitive advantages, many organizations use various quality methods and tools. The range of these methods is quite wide and is used to achieve various purposes. Accreditation of testing and calibration laboratories for compliance with GOST ISO/IEC 17025 is a complex task and a strategic decision for the laboratory based on an approach, factoring into risks and opportunities. The accreditation procedure, like any laboratory procedure, must be assessed from a risk-based thinking perspective. There are several quality management tools to identify factors, influencing the process under study. One of them is the Ishikawa diagram, which clearly shows the relationship between the identified problem and its potential causes. **Objectives.** The research is aimed at obtaining a positive decision on the accreditation of the testing laboratory by preliminary elaboration of the bottlenecks identified during the expert analysis, using quality management tools and methods. **Originality.** It lies in the fact that for the first time an approach was proposed based on preventive actions, so that the laboratory can reduce the risks of all the identified bottlenecks during the accreditation and achieve the intended goal with the least losses. In the course of the research, experts determined the factors, influencing the key purpose: management (organization of work), equipment, personnel, premises and methods. The calculated concordance coefficient (0.725) has showed that expert judgments have a fairly high reliability. **Result.** Using quality management methods, it has been established that management (organization of work), equipment and personnel have the greatest influence on achieving the ultimate goal, namely obtaining a positive decision on accreditation. Based on this fact, testing laboratories, preparing to go through this procedure, are recommended to pay especially close attention to these factors.

Keywords: testing laboratory, accreditation, Ishikawa diagram, GOST ISO/IEC 17025, risks

For citation

Makaeva A.R., Denisova Ya.V. Application of Quality Management Methods to Analyze the Problems of the Accreditation Procedure of the Testing Laboratory. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 2, pp. 190-198. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-2-190-198>

Введение

Аккредитация – это независимая экспертиза органов по оценке соответствия признанным стандартам для осуществления конкретной деятельности с целью обеспечения ее беспристрастности и компетентности [1].

Аккредитация лабораторий высоко ценится как на национальном, так и на международном уровнях как надежный показатель технической компетентности. Кроме того, аккредитация снижает риски для бизнеса и его клиентов, поскольку аккредитация рассматривается ими как средство обеспечения качества [2, 3]. Протоколы, выданные аккредитованными лабораториями, вызывают доверие и имеют больший юридический вес при решении возникших споров [4]. Также результаты работы аккредитованных лиц широко используются регулирующими и контролирующими органами, например результаты лабораторий, выполняющих исследования объектов окружающей среды, сельскохозяйственной продукции, ветеринарных лабораторий и др. [5-7].

Испытательные лаборатории (центры) проходят процедуру аккредитации на соответствие требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 и критериев аккредитации, установленных приказом Минэкономразвития от 26.10.2020 г. № 707.

Преимуществами аккредитации лаборатории на соответствие стандарту ГОСТ ISO/IEC 17025 являются [8]:

- Репутация и признание на национальном уровне.
- Тесное взаимодействие между лабораторией и заказчиком.
- Доверие клиентов.
- Документирование лабораторией всех процессов по испытаниям.
- Повышение уверенности сотрудников в себе и своих способностях.
- Регулярное обучение персонала лабораторий.
- Хорошо организованная рабочая структура лабораторий, развитие культуры качества и передового опыта.

– Обоснованность методов испытания и предоставление точных данных.

Применение данного стандарта для повышения качества систем менеджмента – это способ показать, что результаты испытаний являются надежными. Кроме того, посредством стандарта системы менеджмента качества лаборатории обеспечивают прослеживаемость измерений, предотвращают ошибки и выполняют корректирующие действия при возникновении несоответствий [9].

ГОСТ ISO/IEC 17025 содержит требования к системе менеджмента и технические требования (табл. 1) для испытательных и калибровочных лабораторий. Каждое положение, содержащееся в требованиях к системе менеджмента, предписывает четкие процедуры, политики, программы и инструкции для поддержания системы управления. Для соответствия техническим требованиям необходимо установить различные факторы, которые определяют достоверность и надежность испытаний, выполняемых лабораторией [10, 11].

Процедура аккредитации испытательных лабораторий в Российской Федерации осуществляется Федеральной службой по аккредитации (Росаккредитацией, ФСА) в соответствии с Правилами осуществления аккредитации в национальной системе аккредитации, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 26 ноября 2021 г. № 2050 [12].

При прохождении процедуры аккредитации экс-

перт по аккредитации оценивает требования/положения к менеджменту, а технический эксперт – все технические требования/положения.

Проверка требований к менеджменту включает проверку документации системы менеджмента лаборатории. Ниже приведены документы, которые должны быть частью системы менеджмента лаборатории:

– Руководство по качеству: описание того, как ваша лаборатория соответствует стандарту.

– Процедуры обеспечения качества: описание того, как функционирует система.

– Рабочие инструкции: определение конкретных рабочих действий, влияющих на качество испытаний.

– Документация по качеству: документы, в которых описываются процедуры по управлению качеством.

– Записи по обеспечению качества: различные записи, включая файлы, диаграммы, результаты оценки и любые другие записи, содержащие объективные доказательства.

Аккредитация испытательных и калибровочных лабораторий по ГОСТ ISO/IEC 17025 является непростой задачей. Для того чтобы быть конкурентоспособными и продуктивными в современном деловом обществе, многим организациям необходимо изменить свои старые методы работы и разработать более эффективные способы обеспечения удовлетворенности клиентов качеством своих продуктов и услуг [13].

Таблица 1. Требования ГОСТ ISO/IEC 17025
Table 1. GOST ISO/IEC 17025 requirements

Технические требования	Требования к системе менеджмента
6 Требования к ресурсам	4.1 Беспристрастность
6.1 Общие требования	4.2 Конфиденциальность
6.2 Персонал	8.2 Документация системы менеджмента
6.3 Помещения и условия окружающей среды	8.3 Управление документами системы менеджмента
6.4 Оборудование	8.4 Управление записями
6.5 Метрологическая прослеживаемость	8.5 Действия, связанные с рисками и возможностями
6.6 Продукция и услуги, предоставляемые внешними поставщиками	8.6 Улучшения
7 Требования к процессу	8.7 Корректирующие действия
7.1 Рассмотрение запросов, тендеров и договоров	8.8 Внутренние аудиты
7.2 Выбор, верификация и валидация методов	8.9 Анализ со стороны руководства
7.3 Отбор образцов	
7.4 Обращение с объектами испытаний или калибровки	
7.5 Технические записи	
7.6 Оценивание неопределенности измерений	
7.7 Обеспечение достоверности результатов	
7.8 Представление отчетов о результатах	
7.9 Жалобы (претензии)	
7.10 Управление несоответствующей работой	
7.11 Управление данными и информацией	

Большинство организаций используют инструменты обеспечения качества для различных целей, связанных с контролем и гарантией качества. Существует семь основных инструментов обеспечения качества, которые могут предоставить много информации о проблемах в организации и помочь находить решения для них: гистограмма, причинно-следственная диаграмма, диаграмма Парето, корреляционная диаграмма, контрольные листы, стратификация данных, мозговой штурм [14].

Диаграммы Исикавы были популяризированы в 1960-х годах Каору Исикавой, который стал пионером процессов управления качеством на верфях Kawasaki и в процессе работы стал одним из отцов-основателей современного менеджмента. Он наиболее известен разработкой концепции диаграммы рыбьей кости, которая также известна как «диаграмма Исикавы». Эта диаграмма до сих пор используется во многих организациях для постановки диагнозов или принятия конкретных мер, в ходе которых выявляется первопричина проблемы.

Диаграммы обычно прорабатываются справа налево, причем каждая крупная «кость» рыбы разветвляется на более мелкие кости, содержащие больше деталей.

Диаграмма Исикавы определяется как графическое представление, которое схематично иллюстрирует взаимосвязи между конкретным результатом и его причинами [15].

Использование инструмента состоит из четырех шагов:

1. Определение проблемы.
2. Определение основных вовлеченных факторов.
3. Определение возможных причин.
4. Анализ диаграммы.

Изучаемая цель или негативная проблема – это «рыбья голова», а потенциальные причины и подпричины определяют «структуру рыбьей кости».

Потенциальные причины группируются в основные категории, которые, как правило, включают:

- персонал: все, кто вовлечен в процесс;
- методы: как выполняется процесс и конкретные требования к его выполнению, такие как политика, процедуры, правила, нормативные акты и законы;
- оборудование: любое оборудование, компьютеры, инструменты и т.д., необходимые для выполнения работы;
- материалы: сырье, реактивы, бумага и т.д., используемые для предоставления услуги;
- измерения: данные, полученные в ходе испытаний, которые используются для оценки качества;
- окружающая среда: условия, такие факторы, как местоположение, температура, время и помещения, в которых осуществляются испытания.

Таким образом, диаграмма четко показывает взаимосвязь между выявленной проблемой и ее потенциальными причинами.

Аккредитация является стратегическим решением лаборатории [16], основанном на подходе, который учитывает риски и возможности.

Управление рисками является одной из составляющих процесса управления лабораторией, поскольку позволяет предвидеть последствия принятия решений, что ведёт к снижению рисков. В результате этого уменьшается степень влияния неопределенности на цели. Следовательно, чтобы устранить потенциальные опасности и уменьшить негативные последствия в будущем, необходимо создать, внедрить и адаптировать стратегию управления рисками.

В ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 особый акцент делается на применение риск-менеджмента при совершении любых действий, что приводит к улучшению результатов и минимизации негативных воздействий [17]. Не менее важным принципом системы управления рисками предприятия является непрерывность, то есть проведение постоянного мониторинга и контроля рисков испытательной лаборатории, для чего необходимо периодически пересматривать, а иногда и перерабатывать методы минимизации воздействия рисков на лабораторную деятельность. Управление рисками должно включать и самую ответственную процедуру для лаборатории – аккредитацию в национальной системе аккредитации.

Цель работы – получение положительного решения по аккредитации испытательной лаборатории путем предварительной проработки «узких мест», выявленных в ходе экспертного анализа, с применением инструментов и методов менеджмента качества.

Материалы и методы исследования, полученные результаты

Для построения диаграммы Исикавы была сформирована группа из пяти экспертов. Отбор экспертов проводился внутри профессионального сообщества, в которое входят руководители и менеджеры по качеству ветеринарных лабораторий России. Эксперты имеют профильное образование, соответствующую квалификацию и достаточный опыт работы в данной сфере. Они независимы и беспристрастны в своих суждениях. Изучаемой проблемой является возможный отказ в аккредитации. Команде экспертов требовалось определить главные факторы, влияющие на изучаемый процесс. Экспертам было также предложено отобразить на диаграмме факторы первого уровня, влияющие на главные факторы. Диаграмма, наглядно иллюстрирующая ключевые факторы при прохождении процедуры аккредитации и устанавливающая причинно-следственные связи между ними, представлена на **рис. 1**.

Анализ «узких» мест лаборатории при прохождении процедуры аккредитации посредством построения причинно-следственной диаграммы выявил следующие главные факторы (группы влияний): менеджмент (организация работ), оборудование, персонал, помещения и методы. Каждая из этих групп влияний сопряжена с определенными рисками возникновения ошибок, связанными с факторами первого уровня. В целом эти причины могут снизить вероятность получения положительного решения по аккредитации.

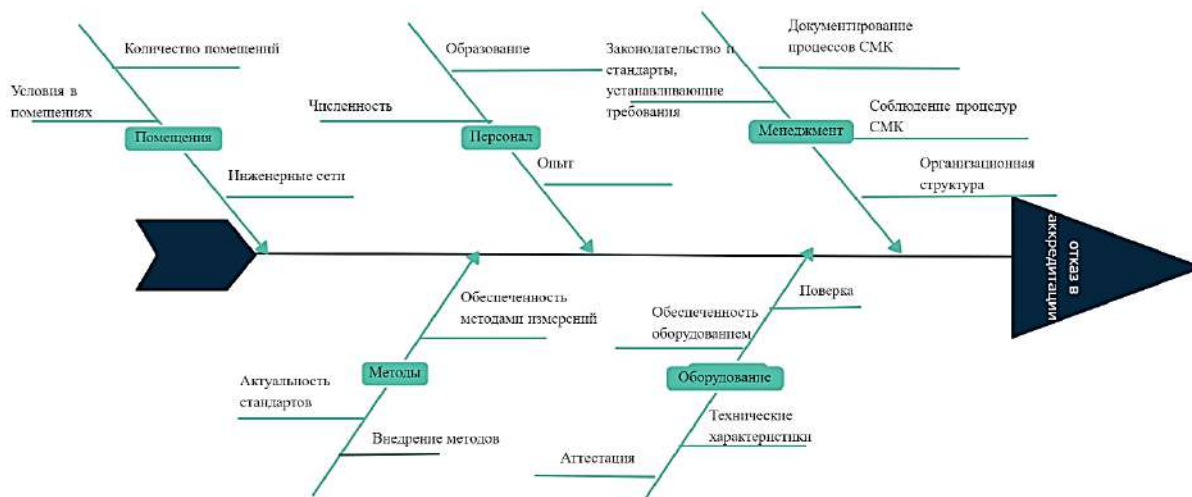


Рис. 1. Причинно-следственная диаграмма анализа проблем аккредитации испытательной лаборатории
Fig. 1. A cause-and-effect diagram for analyzing the problems of accreditation of a testing laboratory

Основываясь на построенной диаграмме (см. рис. 1), было выявлено 17 факторов первого уровня, оказывающих влияние на главные факторы и, соответственно, на исследуемую проблему. Для того чтобы оценить уровень влияния каждого выявленного фактора, экспертам было предложено провести экспертную оценку. Для всех 17-ти факторов первого уровня экспертами была проведена балльная оценка путем ранжирования (от 1 до 17): ранг 1 присваивался фактору, оказывающему наименьшее влияние на проблему, ранг 17 – фактору, оказывающему наибольшее влияние на результат. Все остальные носили промежуточный характер.

Результаты ранжирования приведены в табл. 2.

По результатам экспертной оценки, представленной в табл. 2, установлено, что в группе «менеджмент» (организация работы) наибольшую сумму рангов имеют факторы «Соблюдение процедур СМК» (сумма рангов фактора равна 77) и «Документирование процессов СМК» (75), в группе «оборудование» – фактор «Обеспеченность оборудованием» (80), в группе «персонал» – «Образование» (47), в группе «помещения» – «Количество помещений» (45), в группе «методы» – «Обеспеченность методами испытаний» (49).

Далее для обработки результатов экспертной оценки необходимо было оценить надежность и близость экспертных заключений [18]. Если мнения экспертов тесно согласованы, их надежность повышается. Однако, если мнения экспертов не совпадают или не имеют определенной взаимосвязи, может возникнуть необходимость исследовать потенциальные первопричины и попытаться устранить их.

Для количественной оценки степени совпадения экспертных оценок и определения их надежности применяют коэффициент конкордации Кендалла Z . Чем ближе значение коэффициента конкордации к 1, тем выше достоверность мнений экспертов. Значение $Z = 0$ свидетельствует о полной несогласованности между экспертами. Данный показатель рассчитывается по следующей формуле:

$$Z = \frac{12 \cdot D_{ож}}{m^2 \cdot (n^3 - n)}, \quad (1)$$

где m – количество экспертов; n – количество факторов; $D_{ож}$ – ожидаемая сумма квадратов разностей рангов, вычисляемая по формуле

$$D_{ож} = \sum_{i=1}^n \left(D_i - \frac{m \cdot (n+1)}{2} \right)^2, \quad (2)$$

где D_i – сумма рангов по каждому из факторов.

Так как $m = 5$, $n = 17$, следовательно, $D_{ож} = 7400$.

Подставив ожидаемое значение суммы квадратов разностей рангов в уравнение для коэффициента конкордации (1), получено

$$Z = \frac{12 \cdot D_{ож}}{m^2 \cdot (n^3 - n)} = 0,725.$$

Найденное значение коэффициента конкордации подтверждает достаточно высокую достоверность суждений экспертов.

Принцип Парето предполагает, что небольшое количество факторов чаще всего является причиной подавляющего большинства дефектов и связанных с ними потерь. В контексте настоящей работы это означает, что существует несколько ключевых факторов, которые оказывают существенное влияние на изучаемую проблему. С этой целью были определены весовые коэффициенты для главных факторов.

Расчет весовых коэффициентов для каждого из главных факторов проводился по следующим формулам:

$$\omega_1 = \frac{\sum_{i=1}^4 D_i}{\sum_{i=1}^{23} D_i}, \quad \omega_2 = \frac{\sum_{i=5}^8 D_i}{\sum_{i=1}^{23} D_i}, \quad \omega_3 = \frac{\sum_{i=9}^{11} D_i}{\sum_{i=1}^{23} D_i}, \quad (3)$$

$$\omega_4 = \frac{\sum_{i=12}^{14} D_i}{\sum_{i=1}^{23} D_i}, \quad \omega_5 = \frac{\sum_{i=15}^{17} D_i}{\sum_{i=1}^{23} D_i}.$$

Таблица 2. Результаты экспертной оценки
Table 2. The results of the expert survey

Номер фактора	Фактор	Эксперт №1	Эксперт №2	Эксперт №3	Эксперт №4	Эксперт №5	D_i
Менеджмент (организация работы)							
1	Документирование процессов СМК	16	16	15	12	16	75
2	Соблюдение процедур СМК	17	14	16	17	13	77
3	Организационная структура	12	2	14	14	3	45
4	Законодательство и стандарты, устанавливающие требования	14	15	13	13	17	72
Оборудование							
5	Обеспеченность оборудованием	15	17	17	16	15	80
6	Технические характеристики	13	13	9	8	14	57
7	Поверка	4	8	8	7	7	34
8	Аттестация	11	7	7	6	8	39
Персонал							
9	Образование	9	9	12	5	12	47
10	Опыт	10	6	6	15	2	39
11	Численность	8	5	5	4	1	23
Помещения							
12	Количество помещений	7	11	11	11	5	45
13	Условия в помещениях	3	4	4	2	6	19
14	Инженерные сети	2	3	3	3	4	15
Методы							
15	Обеспеченность методами испытаний	6	12	10	10	11	49
16	Актуальность стандартов	1	1	1	1	9	13
17	Внедрение методов	5	10	2	9	10	36

В результате вычислений были получены следующие значения:

$$\omega_1 = 0,352, \omega_2 = 0,275, \omega_3 = 0,142, \omega_4 = 0,103, \omega_5 = 0,128.$$

Расчеты показали, что наибольший весовой коэффициент, равный 0,352, приходится на группу факторов «менеджмент», а наименьший, 0,103 – на группу «помещения».

Для наглядности также была построена диаграмма Парето. По горизонтальной оси отложены основные 5 групп факторов, по вертикальным осям – сумма баллов, полученная в результате ранжирования, и аккумулярованный процент суммарных рангов (весовые коэффициенты, выраженные в процентах). Диаграмма представлена на **рис. 2**.

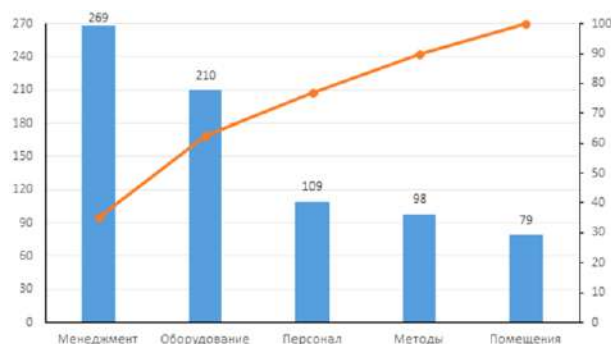


Рис. 2. Диаграмма Парето по группам факторов
Fig. 2. The Pareto chart by groups of factors

Как показали результаты анализа весовых коэффициентов и диаграммы Парето, группы «менеджмент» (35,2%), «оборудование» (27,5%) и «персонал» (14,2%) с суммарным весовым коэффициентом около 80% относятся к группе «А» в соответствии с проведенным ABC-анализом и, соответственно, оказывают наиболее существенное влияние на успех прохождения аккредитации испытательной лабораторией. Следовательно, руководству лаборатории следует уделить особое внимание документированию процессов системы менеджмента качества, их соблюдению, обеспеченности оборудованием, соответствию технических характеристик оборудования требованиям методик и наличию их метрологического подтверждения. Кроме того, следует также отметить высокую степень значимости персонала, прежде всего, его компетентности, наличия соответствующего опыта и уровня образования, а также достаточности по численности.

Заключение

Впервые в настоящей работе предложен подход, основанный на упреждающих действиях, который позволит снизить риски лаборатории по всем выявленным «узким» местам и достичь намеченной цели с наименьшими потерями. Для выявления рисков, возникающих при прохождении аккредитации, построена диаграмма Исикавы путем экспертной оценки. В результате выявлены следующие группы влияний: менеджмент (организация работы), оборудование, персонал, помещения и методы, которые включают в себя факторы первого уровня.

Поскольку экспертным путем было выявлено 17 факторов, каждому из них эксперты присваивали уникальный балл (ранг) от 1 до 17. Вычисленный по присвоенным баллам коэффициент конкордации показал, что суждения экспертов имеют достаточно высокую достоверность.

Путем построения диаграммы Парето и расчета весовых коэффициентов были оценены факторы, оказывающие наиболее сильное влияние на успех аккредитации. Было установлено, что группы «менеджмент» (организация работы), «оборудование» и «персонал» с суммарным весовым коэффициентом около 80% оказывают наибольшее воздействие.

При планировании работ для прохождения процедуры аккредитации лабораториям следует обратить особое внимание на документирование процессов системы менеджмента качества, их соблюдение, обеспеченность оборудованием, соответствие технических характеристик оборудования требованиям методик, наличие их метрологического подтверждения, достаточность численности персонала, наличия у него соответствующего опыта и образования.

Список литературы

1. Об аккредитации [Электронный ресурс]. URL: <https://fsa.gov.ru/infrastructure/ob-akkreditatsii/> (сво-

бодный, дата обращения 04.01.2024).

2. Srivastav A. Impact of ISO 9000 implementation on the organization // *International Journal of Quality and Reliability Management*. 2009, vol. 27, no. 4, pp. 438-450.
3. Саева П.Т., Батталов И.А., Денисова Я.В. Корпоративная система аккредитации ПАО «Газпром» как инструмент обеспечения единства измерений организации // *Омский научный вестник*. 2021. №4(178). С. 34-40. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-34-40. EDN MNMJAB.
4. ISO/IEC-17025 Standard and Steps towards Accreditation of Testing & Calibration Laboratories in Pakistan / Aijaz Panhwar, M. Azhar Naeem, Ateeq Rehman Memon, Mehtab Ahmed, Siraj ul Haq, Aijaz ul Haq, Syed Zain ul ibad // *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences. Section C: Physical Sciences*. 2020, vol. 10, no. 2, pp. 76-84.
5. Альмитова Л.И., Макаева В.И. Гигиеническая оценка качества родниковой воды // *Ветеринарный врач*. 2023. №6. С. 15-19. DOI: 10.33632/1998-698X_2023_6_15
6. Паразитологический контроль безопасности пищевых продуктов / Саматова А.А., Шлямина О.В., Кашеваров Г.С., Макаева А.Р. // *Ветеринария*. 2022. №6. С. 70-72. DOI: 10.30896/0042-4846.2022.25.6.70-73. EDN YQMTGK.
7. Нормы времени на обращение с объектами исследований (испытаний) в ветеринарной лаборатории / Васильева А.И., Васильев М.Н., Садриев А.Р., Кушлубаева А.И. // *Ветеринарный врач*. 2023. №3. С. 39-43. DOI: 10.33632/1998-698X_2023_3_39. EDN GLTCLF.
8. Laboratory Quality improvement by ISO/IEC-17025 Accreditation: A case study of PCSIR / Aijaz Panhwar, M. Azhar Naeem, Syed Zainulibad, Mehtab Ahmed, Aijaz ul Haq and Siraj ul Haq // *International Journal of Current Research*. 2020, vol. 12, no. 1, pp. 9942-9945.
9. Khodabocus F., Balgobin K. Implementation and Practical Benefits of ISO/IEC 17025:2005 in a Testing Laboratory // *University of Mauritius Research Journal*. 2011, no. 17, pp. 27-60.
10. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. М.: Стандартинформ, 2021. 26 с.
11. Yoshihiro N.A.R.A. Research Laboratories Conforming to ISO/IEC 17025 // *International Journal of PIXE*, World Scientific. 2003, vol. 13, no. 2, pp. 5-9.
12. Постановление Правительства Российской Федерации от 26.11.2021 № 2050 «Об утверждении Правил осуществления аккредитации в национальной системе аккредитации, Правил проведения процедуры подтверждения компетентности аккредитованного лица, Правил внесения изменений в сведения об аккредитованном лице, содержащиеся в реестре аккредитованных лиц и предусмотренные пунктами 7 и 8 части 1 статьи 21 Федерального закона «Об аккредитации в национальной системе аккре-

- дитации», Правил рассмотрения заявления аккредитованного лица о прекращении действия аккредитации и принятия национальным органом по аккредитации решения о прекращении действия аккредитации, об изменении и признании утратившими силу некоторых актов и отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации» URL: <http://www.consultant.ru/> (дата обращения 10.01.2024).
13. Laboratory Management System and Competency of Accredited Laboratories / Aijaz Panhwar, M. Azhar Naeem, Aijaz ul Haq, Syed Zainulibad, Mehtab Ahmed, Siraj ul Haq // *International Review of Basic and Applied Sciences*. 2020, vol. 8, iss. 2, pp. 9-13.
 14. Применение инструмента анализа видов и последствий отказов в испытательной лаборатории при анализе рисков / Макаева А.Р., Макаева В.И., Денисова Я.В., Ермолаева Е.А. // *Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2024. Т. 27. №1. С. 14-25.
 15. Ishikawa K. Introduction to quality control. Tokyo : 3A corp., 1990. 435 p.
 16. Luca L. Study on the determination and classification of the causes that determine the faulty operation of a vehicle fuel pump. *Recent Researches in Manufacturing Engineering // 3-rd WSEAS International Conference On Manufacturing Engineering, Quality and Production System (MEQAPS'11)*. 2011, pp. 21-24.
 17. Викулов В.В., Тарасова Е.Ю. Внедрение ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 в практику испытательной лаборатории // *Современное состояние, перспективы развития АПК и производства специализированных продуктов питания: материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой юбилею заслуженного работника высшей школы Российской Федерации, доктора технических наук, профессора Гавриловой Натальи Борисовны*. Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2020. С. 654-656. EDN ERCHNL.
 18. Авчухова Е.В. Оценка согласованности экспертов при отборе персонала // *Вестник Самарской гуманитарной академии. Серия: Психология*. 2018. №1(23). С. 136-150. EDN YVAUIP.
- ### References
1. About accreditation [Electronic resource]. Available at: <https://fsa.gov.ru/infrastructure/ob-akkreditatsii/> (free, accessed on January 04, 2024). (In Russ.)
 2. Srivastav A. Impact of ISO 9000 implementation on the organization. *International Journal of Quality and Reliability Management*. 2009;27(4):438-450.
 3. Saetova R.T., Battalov I.A., Denisova Ya.V. A corporate accreditation system of PJSC Gazprom as a tool for ensuring uniformity of measurements of the organization. *Omskii nauchnyi vestnik [Omsk Scientific Bulletin]*. 2021;(4(178)):34-40. (In Russ.) DOI: 10.25206/1813-8225-2021-178-34-40. EDN MNMJAB.
 4. Aijaz Panhwar, M. Azhar Naeem, Ateeq Rehman Memon, Mehtab Ahmed, Siraj ul Haq, Aijaz ul Haq, Syed Zain ul ibad. ISO/IEC-17025 Standard and steps towards accreditation of testing & calibration laboratories in Pakistan. *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences. Section C: Physical Sciences*. 2020;10(2):76-84.
 5. Almitova L.I., Makaeva V.I. Hygienic assessment of the spring water quality. *Veterinarnyi vrach [Veterinarian]*. 2023;(6):15-19. (In Russ.) DOI: 10.33632/1998-698X_2023_6_15
 6. Samatova A.A., Shlyamina O.V., Kashevarov G.S., Makaeva A.R. Parasitical control of food products safety. *Veterinariya [Veterinary]*. 2022;(6):70-72. (In Russ.) DOI: 10.30896/0042-4846.2022.25.6.70-73. EDN YQMTGK.
 7. Vasilieva A.I., Vasiliev M.N., Sadriev A.R., Kushlubayeva A.I. Time standards for handling objects of research (tests) in a veterinary laboratory. *Veterinarnyi vrach [Veterinarian]*. 2023;(3):39-43. (In Russ.) DOI: 10.33632/1998-698X_2023_3_39. EDN GLTCLF.
 8. Aijaz Panhwar, M. Azhar Naeem, Syed Zainulibad, Mehtab Ahmed, Aijaz ul Haq, Siraj ul Haq. Laboratory quality improvement by ISO/IEC-17025 accreditation: A case study of PCSIR. *International Journal of Current Research*. 2020;12(1):9942-9945.
 9. Khodabocus F., Balgobin K. Implementation and practical benefits of ISO/IEC 17025:2005 in a testing laboratory. *University of Mauritius Research Journal*. 2011;(17):27-60.
 10. State Standard GOST ISO/IEC 17025-2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Moscow: Standardinform, 2021, 26 p. (In Russ.)
 11. Yoshihiro Nara. Research laboratories conforming to ISO/IEC 17025. *International Journal of PIXE, World Scientific*. 2003;13(2):5-9.
 12. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 2050 dated November 26, 2021 "On Approval of the Rules for Accreditation in the National Accreditation System, Rules for Conducting the Procedure for Confirming the Competence of an Accredited Person, Rules for Making Changes to Information about an Accredited Person Contained in the Register of Accredited Persons and Provided for by Paragraphs 7 and 8, Part 1, Article 21 of the Federal Law "On Accreditation in the National Accreditation System", the Rules for Considering the Accredited Person's Application for Termination of Accreditation and the Decision of the National Accreditation Body to Terminate Accreditation, Amend and Invalidate Some Legislative Acts and Certain Provisions of Some Legislative Acts of the Government of the Russian Federation". Available at: <http://www.consultant.ru/> (Accessed on January 10, 2024).
 13. Aijaz Panhwar, M. Azhar Naeem, Aijaz ul Haq, Syed Zainulibad, Mehtab Ahmed, Siraj ul Haq. Laboratory management system and competency of accredited laboratories. *International Review of Basic and Applied*

- Sciences. 2020;8(2):9-13.
14. Макаева А.Р., Макаева В.И., Denisova Ya.V., Ermolaeva E.A. Application of the tool for analyzing failure types and subsequences at a testing laboratory for a risk analysis. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU]. 2024;27(1):14-25. (In Russ.)
 15. Ishikawa K. Introduction to quality control. Tokyo: 3A corp., 1990. 435 p. ISBN 4-906224-61-X
 16. Luca L. Study on the determination and classification of the causes that determine the faulty operation of a vehicle fuel pump. Recent Researches in Manufacturing Engineering. The 3rd WSEAS International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production System (MEQAPS'11). 2011, pp. 21-24. ISBN 978-960-474-294-3.
 17. Vikulov V.V., Tarasova E.Yu. Introducing GOST ISO/IEC 17025-2019 into practice of a testing laboratory. *Sovremennoe sostoyanie, perspektivy razvitiya APK i proizvodstva spetsializirovannykh produktov pitaniya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii posvyashchennoy yubileyu zaslužennogo rabotnika vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii, doktora tekhnicheskikh nauk, professora Gavrilovoy Natali Borisovny* [The current state, prospects for the development of the agricultural and industrial complex and manufacturing of specialized food products: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the Anniversary of the Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor Natalia Borisovna Gavrilova]. Omsk: Omsk State Agrarian University, 2020, pp. 654-656. EDN ERCHNL. (In Russ.)
 18. Avchukhova E.V. Assessment of agreement between experts, when selecting personnel. *Vestnik Samarskoy gumanitarnoy akademii. Seriya: Psikhologiya* [Bulletin of Samara Humanitarian Academy. Series: Psychology]. 2018;(1(23)):136-150. (In Russ.) EDN YVAUIP.

Поступила 01.02.2024; принята к публикации 26.04.2024; опубликована 27.06.2024
Submitted 01/02/2024; revised 26/04/2024; published 27/06/2024

Макаева Алсу Ринатовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности, Казань, Россия. Email: msusik@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0891-9826

Денисова Яна Владимировна – кандидат экономических наук, доцент кафедры аналитической химии, сертификации и менеджмента качества, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия. Email: yana-denisova@inbox.ru. ORCID 0000-0003-1242-6909

Alsu R. Makaeva – PhD (Biology), Senior Researcher, Head of Laboratory, Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety, Kazan, Russia. Email: msusik@yandex.ru. ORCID 0000-0002-0891-9826

Yana V. Denisova – PhD (Economics), Associate Professor, Department of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. Email: yana-denisova@inbox.ru. ORCID 0000-0003-1242-6909