

ВЕСТНИК

Магнитогорского государственного технического
университета им. Г.И. Носова

2020. Т.18, №3

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (Перечень ВАК). Сведения о журнале содержатся в международных и российских базах данных: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI на платформе Web of Science, ВИНТИ и др. Электронные версии журнала размещаются на сетевом ресурсе Научной Электронной Библиотеки в сети Интернет.

Издается с марта 2003 года

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Председатель редакционной коллегии
В.М. Колокольников (Россия)

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

Ответственный секретарь М.В. Шубина

Редакторы: Н.В. Кутекина, Н.П. Боярова

Технический редактор И.В. Ключникова

Перевод на английский:

О.Е. Сухих, В.И. Елесина

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2020

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

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

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

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

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

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

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.10.

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: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru

Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», участок оперативной полиграфии
Выход в свет 25.09.2020. Заказ 244. Тираж 500 экз. Цена свободная.

VESTNIK

of Nosov Magnitogorsk State Technical University

2020. Vol.18, no.3

The Journal is included in the List of Russian Peer-Reviewed Scientific Journals which are supposed to publish the major results of doctoral and PhD dissertations (the list issued by the Higher Attestation Commission). Information about the journal can be found in international and Russian databases: Ulrich's Periodicals Directory, Crossref, Google Scholar, RSCI on the Web of Science platform, VINITI (the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences), and others. The digital version of the Journal is available at eLIBRARY.RU.

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),
V.E. Gromov (Russia), J. Grum (Slovenia),
V.N. Kalmykov (Russia), D.R. Kaplunov (Russia),
R. Kawalla (Germany), V.R. Khrashin (Russia),
A.G. Korchunov (Russia), O.S. Logunova (Russia),
D. Milovanovic (Serbia), K. Mori (Japan),
I. Musirin (Malaysia), A.B. Naizabekov (Kazakhstan),
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. Khrashin, N.N. Orekhova

Executive Secretary M.V. Shubina

Editors: N.V. Kutekina, N.P. Boyarova

Technical Editor I.V. Klyunnikova

Translated into English: O.E. Sukhikh, V.I. Elesina

© Federal State Budgetary Institution of Higher Education
Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2020

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 29.12.10

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: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@mgtu.ru

Publisher office:

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

Printing office:

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

Publication date: 25.09.2020. Order 244. Circulation: 500. Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых	4
<i>Чебан А.Ю., Секисов Г.В.</i>	
Обоснование использования комбинированной подготовки к селективной выемке руд сложноструктурных месторождений	4
Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов	13
<i>Голик В.И., Разоренов Ю.И., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З.</i>	
Опыт выщелачивания металлов в подземных блоках рудных месторождений Северного Кавказа	13
Литейное производство	25
<i>Леушин И.О., Кошелев О.С., Маслов К.А., Титов А.В.</i>	
Оценка применения разупрочняющих добавок в практике производства литейных стержней	25
Технологии обработки материалов	34
<i>Радионова Л.В., Самодурова М.Н., Быков В.А., Глебов Л.А., Брык А.В.</i>	
Повышение эксплуатационных свойств поверхности штока гидроцилиндра аддитивными технологиями	34
<i>Наврузов Х.П., Ганиев И.Н., Амонullo Х., Эшов Б.Б., Муллоева Н.М.</i>	
Влияние добавок кадмия на теплофизические свойства и термодинамические функции свинца	42
<i>Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Иванов Е.В., Феськова Е.В.</i>	
Переработка отходов алюминиевых банок в прутки и проволоку неответственного назначения, исключая их переплав	50
Энергетика металлургии, энергосбережение и электротехнические комплексы	58
<i>Николаев А.А., Тулупов П.Г., Денисевич А.С.</i>	
Усовершенствованный способ определения параметров электрического контура электродуговой сталеплавильной печи на основе экспериментальных данных	58
<i>Корнилов Г.П., Филатов А.М., Филатова О.А., Храминин Т.Р., Храминин Р.Р.</i>	
Исследование взаимосвязи натяжений полосы и нагрузок электроприводов изгибо-растяжной машины непрерывно-третельного агрегата	69
Экономика, управление и рынок продукции	79
<i>Зубков В.В., Сирина Н.Ф.</i>	
Развитие механизмов интеграции промышленных предприятий в единое транспортно- информационное пространство	79
Информационное сообщение	90
<i>Мальцев И.М.</i>	
Выбор марки машиностроительной стали компьютерными технологиями	90

CONTENTS

Mining and Mineral Processing	4
<i>Cheban A.Yu., Sekisov G.V.</i>	
Rationale for the Use of a Combined Preparation for Selective Extraction of Ores from Complex Structure Deposits	4
Recycling of Man-Made Mineral Formations and Waste	13
<i>Golik V.I., Razorenov Yu.I., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z.</i>	
Experience of Metal Leaching in Underground Blocks of Ore Deposits in the North Caucasus	13
Foundry Engineering	25
<i>Leushin I.O., Koshelev O.S., Maslov K.A., Titov A.V.</i>	
Assessment of the Use of Softening Additives in the Practice of Manufacturing Casting Cores	25
Material Process Engineering	34
<i>Radionova L.V., Samodurova M.N., Bykov V.A., Glebov L.A., Bryk A.V.</i>	
Improving the Surface Performance Properties of Hydraulic Cylinder Rod by Applying Additive Technologies	34
<i>Navruzov Kh.P., Ganiev I.N., Amonullo Kh., Eshov B.B., Mulloeva N.M.</i>	
Influence of Cadmium Additives on Thermal Properties and Thermodynamic Functions of Lead	42
<i>Zagirov N.N., Loginov Yu.N., Ivanov E.V., Feskova E.V.</i>	
Processing of Aluminum Can Waste into Low Duty Rods and Wire Without Remelting	50
Metallurgical Power Engineering, Energy Saving and Electrical Systems	58
<i>Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Denisevich A.S.</i>	
An Improved Method of Determining the Electric Circuit Parameters for an Electric Arc Furnace Based on the Experimental Data	58
<i>Kornilov G.P., Filatov A.M., Filatova O.A., Khramshin T.R., Khramshin R.R.</i>	
Research on the Relations Between Strip Tension and Loads of Electric Drives of a Tension Leveller on a Continuous Pickling Line	69
Economics, Management and Product Market	79
<i>Zubkov V.V., Sirina N.F.</i>	
Development of the Mechanisms for Integrating Industrial Enterprises into a Common Transport and Information Area	79
Information Report	90
<i>Maltsev I.M.</i>	
Selection of a Machine Steel Grade by Applying Computer Technologies	90

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ MINING AND MINERAL PROCESSING

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

УДК 622.271

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-4-12



ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ПОДГОТОВКИ К СЕЛЕКТИВНОЙ ВЫЕМКЕ РУД СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Чебан А.Ю., Секисов Г.В.

Институт горного дела ХФИЦ ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация. Актуальность и цель исследования. В связи с истощением минерально-сырьевой базы в отработку вовлекаются месторождения или их отдельные участки со все более сложными горнотехническими условиями. Разработка сложноструктурных месторождений ценного минерального сырья должна вестись с учетом принципов ресурсосбережения с обеспечением селекции и последующего усреднения технологических типов руд для снижения неравномерности состава рудной массы, поступающей на обогащение. Качество добываемой рудной массы оказывает влияние на эффективность всех последующих процессов горно-обогащительного производства, поэтому технологию выемки и ее параметры необходимо увязывать со структурой оруденения выемочного блока и ценностью руд с учетом требований технологии обогащения. **Цель работы.** Создание технологии разработки сложноструктурных месторождений, обеспечивающей селективную подготовку к выемке и собственно выемку различных сортов руд с одновременным обеспечением качественного усреднения бедной и рядовой рудной массы, для подготовки оптимальных для последующей переработки параметров рудной массы и обеспечения максимального выхода металла в процессе обогащения. **Результаты.** В статье предлагается технология комбинированной подготовки к селективной выемке руд сложноструктурных месторождений с применением гибкого сочетания механических, взрывных и специальных методов дезинтеграции горных пород. Технология заключается в выделении и оконтуривании зон руд разных сортов на основе данных сопровождающей эксплуатационной разведки и предварительном механическом извлечении наиболее богатых – штучных руд с применением выбуривания. Затем зоны богатых руд обустраиваются шпурами или скважинами малого диаметра с целью последующего взрывания и получения мелкокусковой рудной массы, а оставшаяся часть выемочного блока, сложенная рядовыми и бедными рудами, а также пустыми породами, дезинтегрируется взрывной подготовкой с обычными параметрами взрывных скважин и их сеткой. Для последующей селективной выемки руд различных сортов предлагается использовать одноковшовые погрузчики и колесные скреперы с усовершенствованным рабочим оборудованием. **Практическая значимость.** Комбинация механической выемки и дифференцированной взрывной подготовки руд позволяет в последующем оказывать существенное влияние на показатели извлечения при добыче и переработке. Предлагаемая технология добычных работ и усовершенствованная схема последующей раздельной переработки штучных и усредненных руд, а также промпродуктов от предыдущих процессов обогащения позволяет получить высокое общее извлечение металла из руд сложноструктурного выемочного блока.

Ключевые слова: сложноструктурные месторождения, выемочный блок, сорт руды, селективное рыхление, одноковшовый погрузчик, колесный скрепер, обогащение рудной массы.

© Чебан А.Ю., Секисов Г.В., 2020

Для цитирования

Чебан 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. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-4-12>



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

RATIONALE FOR THE USE OF A COMBINED PREPARATION FOR SELECTIVE EXTRACTION OF ORES FROM COMPLEX STRUCTURE DEPOSITS

Cheban A.Yu., Sekisov G.V.

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

Abstract. Relevance and Objective of the Study. Due to depleting mineral resources, industrial companies are involved in mining deposits or their individual sections with increasingly complex mining and technical conditions. Complex structure deposits of valuable mineral raw materials should be mined taking into account the resource-saving principles and ensuring the selection and downstream blending of technological types of ores to reduce a non-uniform composition of the ore mass entering the beneficiation stage. The quality of the mined ore mass influences the efficiency of all the downstream processes; therefore, the mining technology and its parameters are to be linked to the mineralization structure of the mining block and the ore value, complying with the requirements for the beneficiation technology. **Objective.** To develop a technology for the mining of complex structure deposits ensuring a selective preparation for the excavation and the actual excavation of various ore grades, while ensuring a high-quality blending of the low-grade and run-of-mine ore masses to prepare ore mass parameters optimal for subsequent processing and to ensure maximum metal yield in the beneficiation process. **Results.** The paper proposes the technology of the combined preparation for the selective extraction of ores from complex structure deposits, using a flexible combination of mechanical, explosive and special methods of rock disintegration. The technology consists in the allocation and outlining of zones of ores of different grades based on the data of the accompanying operational exploration and preliminary mechanical extraction of the highest-grade (lump) ores using drilling. Then the high-grade ore zones are drilled with boreholes or small-diameter wells for subsequent blasting and producing small-size ore mass, and the remaining part of the extraction block, composed of ordinary and low-grade ores, as well as barren rock, is disintegrated by explosive preparation with the conventional parameters of blast holes and their grid. To carry out the subsequent selective extraction of ores of various grades, it is proposed to use single-bucket loaders and wheel scrapers with advanced working equipment. **Practical Relevance.** The combination of the mechanical excavation and differentiated explosive preparation of ores contributes to a subsequent significant impact on the extraction performance during mining and processing. The proposed mining technology and an improved scheme for the subsequent separate processing of lump and blended ores, as well as industrial products from previous beneficiation processes, contribute to a high total metal extraction from ores of a complex structure mining block.

Keywords: complex structure deposits, mining block, ore grade, selective ripping, single-bucket loader, wheel scraper, ore mass beneficiation.

For citation

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, vol. 18, no. 3, pp. 4–12. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-4-12>

Введение

В связи с истощением минерально-сырьевой базы недропользователи вынуждены переходить к отработке месторождений или их отдельных участков со все более сложными горно-техническими условиями. При этом сложно-структурные выемочные блоки во многих случаях характеризуются как чередованием пустых пород и руд, так и руд различных типов и сортов с различным градиентом содержаний полезных компонентов при переходе от зон с богатыми или даже штучными рудами к бедным или некондиционным. Разработка сложноструктурных месторождений ценного минерального сырья

должна вестись с применением технологий, основанных на обеспечении принципов малоотходности и ресурсосбережения, что может быть достигнуто путем применения нетрадиционных технологических решений [1]. В связи с развитием техники и технологий для открытой и подземной добычи руд в отработку вовлекаются месторождения или их отдельные участки, освоение которых ранее считалось нерентабельным [2–8]. Во многих случаях в разрабатываемом массиве отсутствуют визуально наблюдаемые границы между рудами различных типов и сортов, а также пустыми породами. Разработка сложноструктурных выемочных блоков без достаточно глубокой селекции и качественного

последующего усреднения «внутри» технологических типов руд приводит к неравномерности состава рудной массы, поступающей на обогащение. Поскольку процессы обогащения имеют поточный характер, их адаптация к резким колебаниям качества питания весьма ограничена, неоднородность состава рудной массы, понижение содержания в ней полезных компонентов отрицательно влияют на показатели обогащения, приводят к снижению извлечения и качества концентрата, увеличению расхода реагентов, количества хвостов и объема хвостохранилищ, снижению производительности обогатительного оборудования [9]. Таким образом, качество добываемой рудной массы оказывает влияние на эффективность всех последующих процессов горно-обогатительного производства, поэтому технологию выемки и ее параметры необходимо увязывать со структурой оруденения выемочного блока и ценностью руд с учетом требований технологии обогащения.

Состояние вопроса и постановка проблемы

С позиций выемки сложноструктурное оруденение можно разделить на два типа: с выдержанными параметрами залегания (простираения, падения, мощности); с невыдержанными параметрами (с раздувами и пережимами, с изменением простираения и падения, но с выдержанным распределением полезного компонента). При этом оруденение с выдержанными параметрами залегания может иметь существенное неравномерное распределение полезного компонента с наличием зон сплошной рудной минерализации. Обеспечить требуемое качество минерального сырья сложноструктурных месторождений позволяют добычные технологии, основанные на селективной выемке рудной массы. Технологическая схема добычи является одной из основных категорий горных работ, по определению академика В.В. Ржевского, «технологическими процессами называются варианты системы разработки, различающиеся видами применяемого горного и транспортного оборудования в комплектах, наличием дополнительных связей между машинами комплекта, взаимным расположением вскрышных и добычных комплектов оборудования» [10]. Совершенствование традиционных и разработка принципиально новых технических средств выемки полезных ископаемых обуславливает создание новых технологических схем добычных работ. Базовыми принципами создания новых способов селективной выемки руд являются: сведение к минимуму перемешивания разнокачественной горной массы в про-

цессе выемки за счет неконтролируемого обрушения забоя; максимально полное сопряжение границ элементов выемки с контуром рудного тела в разрыхленном взрывном массиве; глубокая дифференциация разрабатываемого взорванного рудно-породного массива [11].

Подготовка рудных массивов к выемке преимущественно осуществляется посредством взрывного рыхления, в результате которого происходит существенная трансформация массива с частичным перемешиванием разнокачественных участков, изменением структурно-морфологических и параметрических свойств. При разработке сложноструктурных массивов, сложенных породами сравнительно невысокой прочности, возможна безвзрывная выемка горной массы с применением горных комбайнов различных конструкций, одноковшовых экскаваторов со специальным оборудованием в виде ковшей активного действия, гидромолотов и гидрорипперов, бульдозерно-рыхлительных и буровых агрегатов, а также другого горного оборудования [7, 12].

Известны технологии комбинированной разработки тонких рудных тел сложной структуры, заключающиеся в выбуривании самых богатых (штуфных) руд, это позволяет значительно сократить их разубоживание, одновременно создать компенсационные полости для последующей взрывной отбойки оставшейся рядовой руды [13–14]. При выбуривании первоначально буровым агрегатом проходят пилотные скважины с последующим их обратным разбуриванием с применением расширителя [13]. Селективная выемка штуфной руды позволяет, перерабатывая ее по отдельной схеме, добывать более высокого извлечения металла из рудной массы. В способе [14] предлагается выбуривание непосредственно в рудной жиле скважин, а затем их расширение с использованием термического дробления до границы с вмещающими породами, после чего в целиках между расширенными скважинами бурят шпур и осуществляют взрывное рыхление целиков. Компанией Atlas Copco предложен способ расширения вниз (Down Reaming), заключающийся в бурении пилотной скважины в направлении сверху вниз и ее последующем расширении также сверху вниз, оборудование для реализации данного способа позволяет формировать выработки диаметром 1,5 м протяженностью до 30 м [15]. Недостатком способов [13–15] является то, что селективно вынимаются только наиболее богатые зоны рудного тела, а остальная часть рудного тела, включающая бедные и рядовые руды, а также частично руды с содержанием полезного компонента

выше рядовых значений, валово взрывается и вынимается, при этом руды разных сортов перемешиваются, не достигая должного усреднения.

Изменение содержания полезного компонента в рудной массе влияет на эффективность процесса обогащения. Так, повышение содержания полезного компонента по отношению к оптимальному значению приводит к незначительному росту извлечения, в то же время снижение содержания ведет к относительно резкому падению извлечения, т.е. прирост извлечения в первом случае не компенсирует потери в последующем [16].

Целью работы является создание технологии разработки сложноструктурных месторождений, обеспечивающей селективную подготовку к выемке и собственно выемку различных сортов руд с одновременным обеспечением качественного усреднения бедной и рядовой рудной массы для подготовки оптимальных для последующей переработки параметров рудной массы и обеспечения максимального выхода металла в процессе обогащения.

Результаты исследований и их обсуждение

Авторами предлагается технология селективной разработки сложноструктурных рудных месторождений. Наибольшим масштабом оруденения и значительной вариацией минеральных парагенезисов и концентрации полезных компонентов обладают штокверки. В связи с чем вопросы селективной выемки и управления качеством при разработке подобных месторождений в целом являются весьма актуальными. Основная идея заключается в обеспечении повышения эффективности разработки путем повышения глубины разделения руд по качественным признакам при селективной выемке за счет гибкого сочетания механических, взрывных и специальных методов. Для обеспечения возможности селективной выемки необходимо осуществлять взрывную подготовку массива при рыхлении руд различных сортов. Предлагаемая авторами дифференцированная подготовка может быть использована для разработки сложноструктурных месторождений, содержащих высокоценное минеральное сырье.

В качестве примера объекта, где целесообразно использование концепции глубокой селекции, может быть предложено Дарасунское рудное поле (Забайкальский край), которое включает несколько месторождений (Дарасунское, Теремки, Талатуй) с существенно различными характеристиками оруденения и составом рудной минерализации. Основными морфолого-

структурными типами Дарасунского месторождения, составляющего основу Дарасунского рудного поля, являются многочисленные жильные и брекчиевые тела, в которых наблюдается значительная вариативность концентраций золота, меди, а также состава содержащих их минералов. Поэтому, учитывая высокие содержания золота, целесообразно осуществлять глубокую селекцию руд при выемке. Месторождения Дарасунского рудного поля частично отработаны, оставшиеся запасы, находящиеся в жилах, необходимо отрабатывать подземным способом, а запасы, сконцентрированные в брекчиевых телах, расположенных на небольшой глубине, могут быть отработаны открытым способом.

Перед разработкой сложноструктурного месторождения необходимо произвести оценку неоднородности путем многоуровневого ранжирования разрабатываемого массива по геолого-технологическим и физико-техническим параметрам. При этом методы оконтуривания включают на первой стадии выделение крупных выемочных единиц, сопоставимых по объему месячной (недельной) добыче, на второй – последующее выделение непосредственных элементов выемки. Брекчиевые рудные тела Дарасунского месторождения имеют сложную структуру. При оконтуривании их на стадии эксплуатационной разведки могут быть выделены штучные, богатые, рядовые, бедные руды и пустые породы (рис. 1).

В отдельных выемочных блоках брекчиевого рудного массива Дарасунского месторождения штучные руды составляют 1–2% объема запасов блока, богатые руды – до 10%, рядовые – до 45–50%. Содержание золота в штучных рудах может превышать $\rho \times 100$ г/т, в богатых рудах – более 10 г/т, в рядовых – более 2 г/т, в бедных – 0,5–2 г/т. Выделение в выемочных блоках контуров рудных зон различных кондиций осуществляется по данным сопровождающей разведки в процессе бурения взрывных скважин. На основе анализа шлама от перебура взрывных скважин появляются также предварительные данные по структуре оруденения нижележащего горизонта, которые можно использовать для планирования дальнейшего развития горных работ.

При подготовке к выемке блока 9 первоначально буровым агрегатом ведется опережающая механическая выемка по обогащенным зонам выемочного блока 9 путем выбуривания штучных руд с образованием компенсационных полостей (рис. 2). Перед механической выемкой штучных руд может быть осуществлено их предварительное разупрочнение с применением

специальных методов и средств, в частности поверхностно активных веществ. Затем буровым агрегатом осуществляется обустройство шпурами или скважинами малого диаметра зон богатых руд с целью последующего взрывания и получе-

ния мелкокусковой рудной массы. Увеличение степени дробления повышает стоимость и энергоёмкость процесса рыхления, однако в дальнейшем уменьшает затраты при выемке и последующей переработке рудной массы.

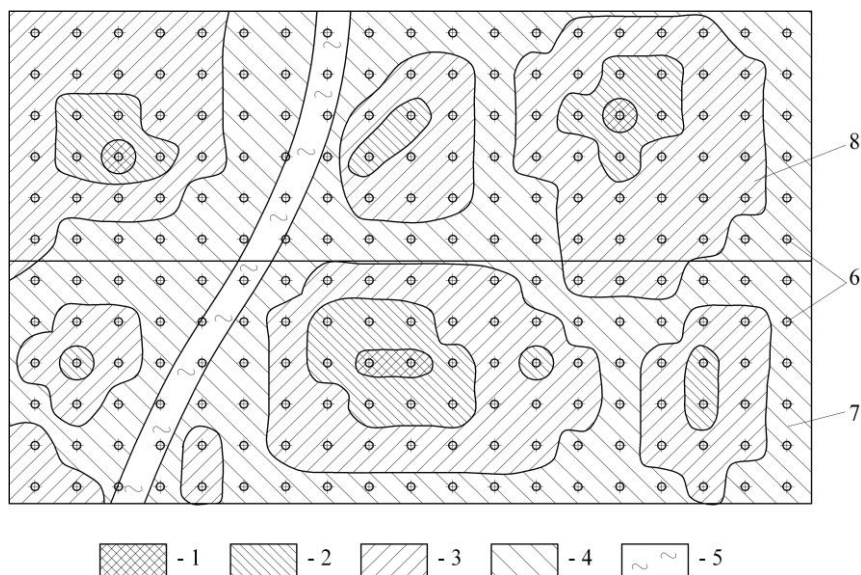


Рис. 1. Структурная схема брекчиевого оруденения выемочного блока: 1 – штучная руда; 2 – богатая руда; 3 – рядовая руда; 4 – бедная руда; 5 – пустая порода; 6 – взрывные скважины; 7, 8 – выемочные блоки
Fig.1. Structural diagram of the breccia mineralization of the mining block: 1 is lump ore; 2 is high-grade ore; 3 is run-of-mine ore; 4 is low-grade ore; 5 is barren rock; 6 is blast holes; 7, 8 are mining blocks

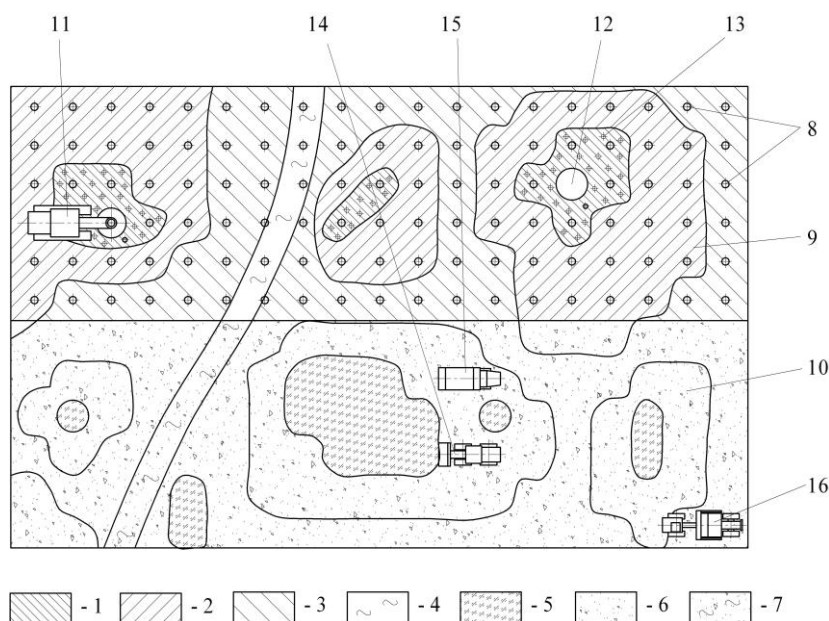


Рис. 2. Схема отработки смежных выемочных блоков: 1 – богатая руда; 2 – рядовая руда; 3 – бедная руда; 4 – пустая порода; 5 – богатая рудная масса; 6 – рядовая и бедная рудная масса; 7 – безрудная горная масса; 8 – взрывные скважины; 9, 10 – выемочные блоки; 11 – буровой агрегат; 12 – компенсационная полость; 13 – скважины малого диаметра; 14 – одноковшовый погрузчик; 15 – автосамосвал; 16 – колесный скрепер
Fig. 2. Mining diagram of adjacent mining blocks: 1 is high-grade ore; 2 is run-of-mine ore; 3 is low-grade ore; 4 is barren rock; 5 is high-grade ore mass; 6 is run-of-mine and low-grade ore mass; 7 is ore-free rock mass; 8 is blast holes; 9, 10 are mining blocks; 11 is a drilling machine; 12 is compensating space; 13 is small-diameter wells; 14 is a single-bucket loader; 15 is a dump truck; 16 is a wheel scraper

Оставшаяся часть выемочного блока, сложенная рядовыми и бедными рудами, а также пустыми породами, дезинтегрируется взрывной подготовкой с обычными параметрами взрывных скважин и их сеткой. Для сохранения геологической структуры массива при использовании взрывной подготовки применяются специальные методы, в частности взрывание на буферный слой, образованный в результате предыдущего взрыва и примыкающий к откосу уступа, что позволяет обеспечить сравнительно небольшое смещение взорванной горной массы в блоке и низкий коэффициент разрыхления (в пределах 1,15). Помимо максимально возможного сохранения структуры взрывающегося блока (для последующей селективной выемки) достигается более полное использование энергии взрыва на дробление породы; сокращение времени на вспомогательные операции; более эффективная работа выемочного оборудования. В качестве буферного слоя используется ранее взорванный выемочный блок 10, который подготавливался к выемке аналогичным образом. Из развала пород взорванного выемочного блока 10 ведется селективная выемка трех типов горной массы: богатой рудной массы; рядовой и бедной рудной массы; безрудной горной массы. Селективная выемка различными типами горного оборудования осуществляется на основе планаграммы, в которой указаны последовательность разбора блока и рекомендуемые траектории движения машин. В настоящее время разработаны автоматизированные системы управления процессом селективной выемки рудной массы, обеспечивающие высокоточное позиционирование выемочного оборудования в забое, необходимую траекторию движения ковша относительно зон локализации различных типов горной массы, а также возможность идентификации качества горной массы в ковше [17]. При экскавации горной массы из взорванного сложноструктурного выемочного блока полнота и качество извлечения полезного ископаемого зависят от принятой выемочной техники и выбора технологической последовательности разбора развала [18].

Выемку богатой рудной массы целесообразно вести одноковшовыми погрузчиками или экскаваторами с ковшами ограниченной вместимости, в данном случае контролю качества селекции будет способствовать визуально различимый менее крупный гранулометрический состав богатой рудной массы, полученный в результате взрывания частой сети скважин малого диаметра. Для увеличения глубины селекции и максимального сохранения качества богатых руд при

отработке зон контакта с рядовыми рудами может быть использован одноковшовый погрузчик со специальным оборудованием, разработанный авторами [19]. Ковш погрузчика оборудован поворотным козырьком для разделения разнородной рудной массы в приконтактной зоне и повышения коэффициента заполнения ковша. После погрузки в автосамосвалы богатая рудная масса транспортируется на специальный склад и в последующем используется для стабилизации качества усредненной рядовой и бедной рудной массы, поступающей на обогащение.

Извлечение рядовой и бедной рудной массы должно вестись в режиме усреднения, при этом в случае горизонтальной (площадной) вариативности содержаний полезного компонента выемка может осуществляться колесными скреперами. Для повышения производительности колесных скреперов при послойной выемке взорванной рудной массы авторами предлагается конструкция усовершенствованного скрепера с удлиненным ковшом с интенсификатором загрузки рудной массы в виде подгребающей стенки [7]. Удлиненный ковш скрепера заполняется за счет силы тяги. После того как рудная масса заполняет переднюю часть ковша, в работу включается подгребающая стенка и перемещает рудную массу в заднюю часть ковша, затем освободившаяся передняя часть ковша вновь заполняется за счет силы тяги скрепера. Конструкция интенсификатора позволяет работать с крупнокусковой горной массой и обеспечивает высокий коэффициент заполнения удлиненного ковша. При вертикальной вариативности содержаний полезного компонента рядовой и бедной рудной массы выемку целесообразно вести одноковшовыми экскаваторами с усреднением разнородной руды в ковше в процессе черпания с последующей погрузкой в автосамосвалы.

Выемка породных включений (безрудной горной массы) в зависимости от их размеров и формы ведется одноковшовыми погрузчиками или экскаваторами, после чего породную массу автосамосвалами транспортируют в породный отвал.

В случае освоения пластовых месторождений, сложенных породами невысокой прочности, возможно вести послойную отработку массива с применением карьерных комбайнов [20]. Как правило, низкопрочные руды пластовых месторождений характеризуются выдержанными параметрами в плане при относительно выраженной изменчивости в разрезе, поэтому для оконтуривания массива с выделением выемочных единиц достаточно проводить только опережающую эксплуатационную разведку.

На обогатительной фабрике штуфные руды с содержанием золота $px100$ г/т отдельно подвергают гравитационному обогащению с получением концентрата («золотой головки») с px кг/т, отправляемого непосредственно на плавку со сквозным извлечением металла 93–95%. Промпродукт гравитационного обогащения объединяют с флотоконцентратом и подвергают сорбционному цианированию. Усредненная рядовая и бедная руда после подшихтовки с богатой рудой (для стабилизации среднего содержания) перерабатывается флотационным методом с последующим сверхтонким измельчением полученного концентрата и сорбционным цианированием (чановым выщелачиванием) со сквозным выходом металла 85–90%. В случае, если в богатой руде содержатся крупные золотины, то до подшихтовки она подвергается гравитационному обогащению. Хвосты флотации подвергаются кучному или кюветному выщелачиванию совместно с кеками цианирования с выходом металла в пределах 60–70%. Таким образом, общее извлечение металла из руд сложноструктурного блока может составлять 85–87%.

В случае исключения внутрирудной селекции с традиционным усреднением руд, производящимся в процессе валовой выемки, транспортировки, складирования и усреднения в бункерах, с последующим дроблением, измельчением, флотационным обогащением, тонким измельчением и сорбционным цианированием, сквозное извлечение металла может составлять порядка 75%. Такое сравнительно невысокое извлечение обуславливается потерями золота от недорас-

творения крупных золотинов и сростков, а также переосаждения крупного золота на стадии флотации.

Заключение

Высокая вариативность содержаний полезных компонентов в рудах месторождений штокверкового типа предопределяет необходимость их селективной выемки, при этом наиболее богатые рудные участки предлагается извлекать с опережающей селекцией путем выбурирования. Комбинация механической выемки и дифференцированной взрывной подготовки руд позволяет в последующем оказывать существенное влияние на показатели извлечения при добыче и переработке. Выбуривание локальных участков позволяет существенно увеличить глубину селекции и максимально сохранить исходные качественные характеристики полезного ископаемого в массиве, что особенно важно для месторождений руд высокоценного кристаллического сырья. Взрывная подготовка зон богатой руды с получением мелкокусковой рудной массы обеспечивает ее эффективную селективную выемку ковшовыми рабочими органами небольшой вместимости. Выделение богатой руды, отправка ее на усреднительный склад позволяют обеспечивать стабильное качество усредненной рудной массы при шихтовке бедных и рядовых руд. Раздельная переработка штуфных и усредненных руд, а также промпродуктов от предыдущих процессов обогащения позволяет получить высокое общее извлечение металла из руд сложноструктурного выемочного блока.

Список литературы

1. Трубецкой К.Н., Шапарь А.Г. Малоотходные и ресурсосберегающие технологии при открытой разработке месторождений. М.: Недра, 1993. 272 с.
2. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*. 2014. vol. 13, no. 3. pp. 941–962.
3. Условия и перспективы внедрения роботизированных геотехнологий при открытой разработке месторождений / Трубецкой К.Н., Рыльникова М.В., Владимиров Д.Я., Пыталев И.А. // Горный журнал. 2017. № 11. С. 60–64.
4. Jarvie-Eggart M.E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.
5. Adams M. D. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.
6. Голик В. И., Дмитрак Ю. В. Перспективы комбинирования горных технологий при производстве цветных металлов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 1. С. 4–10.
7. Cheban A.Yu., Khrunina N.P. Intensification of Open Mining Operations with a Small Distance of Transportation of Rock Mass // *International Journal of Engineering Research in Africa*, 2018, vol. 38, pp. 100–114.
8. Gladyr A.V., Miroshnikov V.I., Konstantinov A.V. Software and hardware improvement for the streltsov ore field geo-dynamic testing area // e3s web of conferences electronic resource. 2018. P. 02012.
9. Формирование руды повышенного качества из добытой рудной массы – одно из условий рациональной технологии ее переработки / Терещенко С.В., Марчевская В.В., Маслов А.Д., Голованов В.Г., Погребняк О.С. // Вестник Мурманского государственного технического университета. 1998. Т. 1. № 3. С. 111–118.
10. Ржевский В.В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. М.: Недра, 1980. 631 с.

11. Секисов Г.В., Таскаев А.А. Раздельная выемка руд на карьерах. Фрунзе: ИЛИМ, 1986. 173 с.
12. Безвзрывные технологии подготовки скальных горных пород к перемещению конвейерным транспортом / Бурцев С.В., Левченко Я.В., Таланин В.В., Ворошилин К.С. // Уголь. 2018. № 10. С. 8–17.
13. Михайлов Ю.В., Васильев А.Е., Горный С.В. Подготовка рудного тела к выемке полезного ископаемого комбинированным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 8. С. 114–116.
14. Пат. 2464421 Российская Федерация, E21C 41/22, E21C 37/16, F42D 3/04. Извлечение руды с использованием взрыва и термического дробления / Д. Бризбуа; заявитель и патентообладатель Рокмек Интернэшнл Инк. № 2010107457/03; заявл. 24.07.2008; опубл. 20.10.2012.
15. Демшина Н. Сверху вниз и обратно // Промышленные страницы Сибири. 2015. № 2. С. 48–50.
16. Oparin V.N., Smolyanitsky B.N., Sekisov A.G., Trubachev A.I., Salikhov V.S., Zykov N.V. Promising mining technologies for gold placers in Transbaikalia // Journal of Mining Science, 2017, vol. 53, no. 3, pp. 489–496.
17. Технология формирования качества руд Тырныаузского месторождения с использованием предварительной сортировки и обогащения / Хакулов В.А., Крапивский Е.И., Блаев Б.Х., Шаповалов В.А. // Обогащение руд. 2018. № 5. С. 33–39.
18. Санакулов К.С., Руднев С.В., Канцель А.В. О возможности отработки месторождения Учкулач с использованием технологии рентгенрадиометрического обогащения свинцово-цинковых руд // Горный вестник Узбекистана. 2011. № 1. С. 17–20.
19. Чебан А.Ю., Хрунина Н.П. Автоматизация процессов разработки сложноструктурных месторождений с применением машин послонного фрезерования // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2019. № 2. С. 220–229.
20. Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus. Russia // Zement-Kalk-Gips Int. 2014, vol. 67, no. 10, pp. 18–19.

References

1. Trubetskoy K.N., Shapar A.G. *Malootkhodnye i resursosberegayushchie tekhnologii pri otkrytoy razrabotke mestorozhdeniy: monografiya* [Low-waste and resource-saving technologies in open pit mining: monograph]. Moscow: Nedra, 1993, 272 p. (In Russ.)
2. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*, 2014, vol. 13, no. 3, pp. 941–962.
3. Trubetskoy K.N., Rylnikova M.V., Vladimirov D.Ya., Pytalev I.A. Provisions and prospects for introduction of robotic geotechnologies in open pit mining. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2017, no. 11, pp. 60–64. (In Russ.)
4. Jarvie-Eggart M.E. Responsible mining: case studies in managing social & environmental risks in the developed world. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015, 804 p.
5. Adams M. D. Gold ore processing: project development and operations. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.
6. Golik V.I. Dmitrak Yu.V. Prospects of using a combination of mining techniques in the production of non-ferrous metals. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 1, pp. 4–10. (In Russ.)
7. Cheban A.Yu., Khrunina N.P. Intensification of open mining operations with a small distance of transportation of rock mass. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 2018, vol. 38, pp. 100–114.
8. Gladyshev A.V., Miroshnikov V.I., Konstantinov A.V. Software and hardware improvement for the Streltsov ore field geodynamic testing area. E3S Web of Conferences, 2018, p. 02012.
9. Tereshchenko S.V., Marchevskaya V.V., Maslov A.D., Golovanov V.G., Pogrebnyak O.S. Preparing high quality ore from mined ore mass is one of the conditions for a rational technology for its processing. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Murmansk State Technical University], 1998, vol. 1, no. 3, pp. 111–118. (In Russ.)
10. Rzhetsky V.V. *Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizatsiya otkrytykh gornykh rabot* [Technology and comprehensive mechanization of open cast mining]. Moscow: Nedra, 1980, 631 p. (In Russ.)
11. Sekisov G.V., Taskaev A.A. *Razdelnaya vyemka rud na karierakh* [Separate ore mining in quarries]. Frunze: ILIM, 1986, 173 p. (In Russ.)
12. Burtsev S.V., Levchenko Ya.V., Talanin V.V., Voroshilin K.S. Blastless technologies for rock mass conditioning for conveyor transportation. *Ugol* [Coal], 2018, no. 10, pp. 8–17. (In Russ.)
13. Mikhailov Yu.V., Vasiliev A.E., Gorniy S.V. Preparation of the ore body for the extraction of minerals in a combined way. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2003, no. 8, pp. 114–116. (In Russ.)
14. Brisebois D. *Izlyechenie rudy s ispolzovaniem vzryva i termicheskogo drobleniya* [Ore extraction using explosion and thermal crushing]. Patent RF, no. 2464421, 2012.
15. Demshina N. From top to bottom and back. *Promyshlennyye stranitsy Sibiri*. [Industrial Pages of Siberia], 2015, no. 2, pp. 48–50. (In Russ.)
16. Oparin V.N., Smolyanitsky B.N., Sekisov A.G., Trubachev A.I., Salikhov V.S., Zykov N.V. Promising mining technologies for gold placers in Transbaikalia. *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, no. 3, pp. 489–496.

17. Khakulov V.A., Krapivskiy E.I., Blaev B.Kh., Shapovalov V.A. Quality formation technology for the Tyrnauz deposit ores using preliminary sorting and beneficiation. *Obogashchenie rud* [Ore Beneficiation], 2018, no. 5, pp. 33–39. (In Russ.)
18. Sanakulov K.S., Rudnev S.V., Kantsel A.V. On the possibility of mining the Uchkulach deposit using X-ray radio-metric concentration technology of lead-zinc ores. *Gorny vestnik Uzbekistana* [Mining Vestnik of Uzbekistan], 2011, no. 1, pp. 17–20. (In Russ.)
19. Cheban A.Yu., Khrunina N.P. Automation of processes for developing complex structure deposits by applying surface excavating milling machines. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [News of Tula State University. Earth Sciences], 2019, no. 2, pp. 220–229. (In Russ.)
20. Wirtgen surface mining for selective limestone mining in the North Caucasus, Russia. *Zement-Kalk-Gips Int.* 2014, 67, no. 10, pp. 18–19.

Поступила 23.06.2020; принята к публикации 10.08.2020; опубликована 25.09.2020
Submitted 23/06/2020; revised 10/08/2020; published 25/09/2020

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

Секисов Геннадий Валентинович – главный научный сотрудник, Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИГД ХФИЦ ДВО РАН), Хабаровск, Россия. Email: sekisovag@mail.ru

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

Gennady V. Sekisov – Chief Researcher, Mining Institute of the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, Russia. Email: sekisovag@mail.ru

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

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

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-13-24



ОПЫТ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ В ПОДЗЕМНЫХ БЛОКАХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

Голик В.И.¹, Разоренов Ю.И.¹, Дмитрак Ю.В.², Габараев О.З.²

¹ Южно-Российский государственный политехнический университет, Новочеркасск, Россия

² Северо-Кавказский государственный технологический университет, Владикавказ, Россия

Аннотация. Актуальность работы. Увеличивающаяся со временем потребность в цветных металлах заставляет искать пути восполнения дефицита в минеральном сырье, поэтому исследования, направленные на упрочнение ее базы, актуальны и перспективны. **Цель.** Приоритетным направлением развития базы горного производства является внедрение наилучших доступных технологий для повышения значимости горной промышленности России на мировом рынке. Целью статьи является систематизация сведений о практических шагах по конверсии на перспективные системы разработки с выщелачиванием металлов в подземных блоках на рудных месторождениях Северного Кавказа. **Используемые методы.** Систематизация в историческом срезе сведений о практических шагах добычи металлов технологиями с выщелачиванием руд в подземных блоках и выстраивание вектора освоения этой перспективной технологии. **Новизна.** Обоснование эффективности технологий с выщелачиванием на Северном Кавказе создает банк новых данных для реализации имеющихся возможностей по вовлечению в производство некондиционных для традиционной технологии запасов. **Результаты.** Дана историческая справка об освоении технологий добычи цветных металлов на крупнейших месторождениях Российского Кавказа. Детализированы сведения о попытке освоения впервые в мировой практике балансовых запасов всего Какадурского месторождения. Дан анализ использования при разработке Бештаугорского и Быкогорского урановых месторождений систем разработки с выщелачиванием в вариантах с дроблением руд и с естественной проницаемостью растворов. Приведены сведения об экспериментальном извлечении металлов из шахтных стоков как продукта подземного блокового выщелачивания. Дана табличная интерпретация хронологии применения подземного блокового выщелачивания. Сформулированы условия для применения подземного блокового выщелачивания и дана оценка эффективности рассматриваемой технологии. **Практическая значимость.** Ознакомление с опытом освоения технологий с выщелачиванием создает предпосылки для комплексного улучшения показателей функционирования предприятий.

Ключевые слова: руда, металлы, запасы, подземные блоки, технология, выщелачивание, эффективность.

© Голик В.И., Разоренов Ю.И., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З., 2020

Для цитирования

Опыт выщелачивания металлов в подземных блоках рудных месторождений Северного Кавказа / Голик В.И., Разоренов Ю.И., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 13–24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-13-24>



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

EXPERIENCE OF METAL LEACHING IN UNDERGROUND BLOCKS OF ORE DEPOSITS IN THE NORTH CAUCASUS

Golik V.I.¹, Razorenov Yu.I.¹, Dmitrak Yu.V.², Gabaraev O.Z.²¹ South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia² North Caucasian State Technological University, Vladikavkaz, Russia

Abstract. Relevance of the paper. A growing demand for non-ferrous metals is a reason for searching for ways of making up the deficit in minerals; therefore, research aimed at its strengthening are currently important and promising. **Objective.** A priority for developing mining operations is the introduction of the best available technologies to increase the value of the Russian mining industry in the global market. The paper is aimed at systemizing data on practical steps taken to convert to advanced systems of mining, including metal leaching in underground blocks of ore deposits in the North Caucasus. **Methods Applied.** To systemize historical data on practical steps taken to recover metals by applying technologies with ore leaching in underground blocks and building a learning curve of such advanced technology. **Originality.** By providing a rationale for efficiency of leaching technologies in the North Caucasus, we form a new data bank to use available opportunities of introducing into production stocks deemed to be off-grade for a conventional technology. **Findings.** The paper contains a historical background in learning technologies of mining non-ferrous metals in the largest Caucasian deposits in Russia. It provides detailed information about the attempts to mine balance reserves of the complete Kakadur deposit for the first time in the world. The authors analyzed the systems of mining with leaching in options of ore crushing and natural permeability of solutions applied at Beshtaugorsk and Bykogorsk uranium deposits. They stated information about experimental mining of metals from mine water discharges as a product of underground block leaching. A chronology of the underground block leaching is interpreted in a table. The conditions for the underground block leaching are stated and efficiency of the technology under study is assessed. **Practical Relevance.** Getting acquainted with experience of leaching technologies is a prerequisite to an overall improvement of operation performance of companies.

Keywords: ore, metals, reserves, underground blocks, technology, leaching, efficiency.

For citation

Golik V.I., Razorenov Yu.I., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z. Experience of Metal Leaching in Underground Blocks of Ore Deposits in the North Caucasus. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 13–24. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-13-24>

Введение

По мере истощения мировых запасов металлических руд в комфортных условиях для разработки актуализируется проблема повышения эффективности добычи металлов из некондиционных запасов, составляющих большую часть разведанных и эксплуатируемых месторождений [1–4].

Инновационные технологии современности позволяют добывать металлы на месторождениях с низким содержанием металла, например Гумешевское месторождение меди. Предприятие «Уралгидромет» выпускает более 2,5 тыс. т чистой меди в год, окупив инвестиции.

Поискам путей актуальной проблемы – компенсации выбывающих запасов посвящены труды ученых мира [5–8].

Альтернативой традиционному способу добычи с извлечением руды из недр и получением концентратов для металлургического передела в технологиях подземного выщелачивания без поднятия руды на поверхность путем перевода

ионов металлов в продуктивный раствор на месте их залегания [9–12].

Технология является контролируемым и экологически менее опасным методом добычи, поскольку осуществляется в рамках замкнутого цикла, позволяет вовлекать запасы с некондиционным содержанием металлов с большей чистотой и уменьшает объемы отходов с отрицательными попутными эффектами.

На любом металлическом месторождении объективно осуществляется процесс выщелачивания, в природных условиях протекающий медленно. Его следствием является наличие металлов по пути следования потоков воды. Технологии с выщелачиванием ускоряют процесс подземного выщелачивания.

Системное использование процессов подземного выщелачивания можно иллюстрировать практикой выщелачивания руд отработанного ранее по традиционной технологии Гумешевского месторождения, которое характеризуется низкой концентрацией меди в окисленной руде, что и стало причиной прекращения его разработки

традиционными способами. В России и других странах этот метод применяется для добычи урана, золота и других металлов.

Несмотря на сведения о положительном опыте, ее применение ограничивается доработкой целиков, потерянных руд забалансовых запасов. Более широкому внедрению препятствуют риски, связанные с невозможностью исправить допущенные при подготовке руд ошибки: крупность, обеспечение фильтрации растворов реагентов, контроль полноты процесса и др.

Актуальность увеличения ореола использования технологии подземного блокового выщелачивания требует развития ее научных основ. Этой цели подчинены сведения об истории данной технологии на рудных месторождениях Северного Кавказа.

Материалы и методы

Выбор оптимальной технологии добычи руд базируется на моделировании показателей использования альтернативных вариантов разработки месторождений, включающих в себя состояние запасов руд, географические условия, расстояние от мест переработки и др. Систематизируется история разработки месторождений для оценки их вклада в развитие технологий.

Описываются случаи использования применения нетрадиционных технологий, в том числе выщелачивание металлов в подземных блоках и, как частный случай, извлечение металлов из растворов природного выщелачивания.

Детализируются данные о приоритетном использовании технологий с выщелачиванием в подземных блоках по данным мировой практики.

Обобщаются факторы, свидетельствующие о возможности использования технологии подземного блокового выщелачивания при разработке рудных месторождений в регионах России.

Результаты исследования

На территории сегодняшней Осетии в III–II в. до н.э. добывали металлы и еще интенсивнее продолжали разработки месторождений, переселившись под натиском татаро-монголов в горные районы Кавказа в XIII в.

Интерес к кавказскому свинцу возрос в первой четверти XIX века при осложнении военно-политической ситуации на Кавказе. С 1892 г. был осуществлен переход с добычи только серебряноцинковых руд на комплексные руды, в том числе цинковой обманки, ранее накапливаемой в отвалах. В 1894 г. дали первую продукцию рудники Холстинский и

Ардонский, заработали Стур-Издинский и Куртатинский рудники.

К 1913 г. Садонский рудник стал крупным горнодобывающим предприятием региона. В 1927 г. Осетия является единственным в России производителем цинка, а ее доля в добыче свинца составляла 63%.

В послевоенные годы велась разработка Згидского, Холстинского и Буронского месторождений. В 1960-е гг. начата разработка Архонского, Левобережного и Какадур-Ханикомского месторождений.

Сырьевую базу Садонского свинцово-цинкового комбината составляет группа месторождений: Садонское, Октябрьское, Згидское, Буронское, Холстинское, Кадат-Хампаладагское, Какадур-Ханикомское, Архонское, Левобережное и др. На рудниках применяли системы разработки с магазинированием руды, поэтажных штреков, слоевого и поэтажного обрушения, которые характеризовались показателями: извлечение руды – 94%, разубоживание – 15–40%, производительность труда рабочего по горной массе – 2 м³/смену.

Урупский горно-металлургический комбинат расположен на юго-западе Ставропольского края в пределах западной части Передового хребта. Принята система разработки с обрушением налегающих пород, закладкой выработанного пространства и камерно-столбовая. Извлечение руды составляет 85%, разубоживание – 25%.

Тырныаузский горно-металлургический комбинат в Кабардино-Балкарии включал карьеры «Высотный» и «Мукуланский», рудник «Молибден», обогатительную фабрику и геолого-разведочную экспедицию.

Верхняя часть Тырныаузского месторождения отрабатывали карьером «Высотный» с высотой уступов 10–12 м и транспортированием руды по карьерному рудоспуску длиной 900 м.

Запасы рудника «Молибден» вскрывали штольными и слепыми стволами. Система разработки этажно-камерная и поэтажного обрушения с отбойкой на «закатую» среду. Высота этажа составляла 75 м. Широко применяли самоходное дизельное оборудование, автосамосвалы и погрузочные машины.

После крупного дробления руда поступала на обогатительную фабрику, где измельчалась в мельницах самоизмельчения и шаровых в замкнутом цикле со спиральными классификаторами. Обогащение осуществлялось в тяжелых суспензиях.

Садонский свинцово-цинковый комбинат. В послевоенные годы преобладающей системой разработки были горизонтальные слои с заклад-

кой породами из боков боковых пород и от сортировки руд.

Преимуществом пользовалась двухстадийная схема: в первую стадию камерные запасы, во вторую – междуэтажные и междублоковые целики.

В шестидесятые годы прошлого века была распространена система горизонтальных слоев с закладкой и креплением. С увеличением глубины разработки преобладали варианты горизонтальных слоев с закладкой пустот лесом и нисходящей выемкой.

При системе горизонтальные слои с закладкой породой блоки подготавливали выработками по руде и наращиваемыми рудоспусками с креплением деревом. В открытом выработанном пространстве выкладывали деревянные конструкции – «костры».

Наиболее производительным оказался вариант блокового магазинирования со сплошной линией забоя, обеспечивающий производительность забойного рабочего 3–4 м³/смену.

За более чем 150 лет рудные запасы отработаны на площади около 1 км по глубине и 2 км по простиранию. В отработанном пространстве только Садонского месторождения потеряно около 560 тыс. т руды, 28 тыс. т свинца 53 тыс. т цинка.

Промышленная разработка Згидского месторождения была начата в 1945 г. с годовой производственной мощностью 200 тыс. т руды и 10–12 тыс. т металла.

Систему разработки с магазинированием и закладкой камер применяли для выемки руд на участках с выдержанной мощностью и четкими контактами руды и вмещающих пород. Закладочный материал добывали на поверхности непосредственно над пустотами. В дальнейшем закладка перепускалась с верхних горизонтов на нижние.

Варианты системы: с камерами грохочения, люковым выпуском с надштрековым целиком и без него, с горизонтом скреперования под естественными целиками и деревянным накатом, а также с полевой подготовкой и машинной погрузкой руды. Наиболее производительны варианты со скреперной доставкой – производительность труда забойщика достигала 5 м³/чел.см.

Системы разработки Архонского месторождения включали варианты:

- с магазинированием руды и горизонтом скреперования;
- с частичным магазинированием;
- с магазинированием и выпуском руды на погрузочные орты-заезды для машинной погрузки;
- с магазинированием и отбойкой руды ярусно расположенными скважинами из восстающих;

– с магазинированием и выпуском руды через люки;

– с подэтажным обрушением.

При эксплуатации Какадурского месторождения традиционными для Садона системами разработки выявилось несоответствие между содержанием, принятым при геолого-экономической оценке запасов и полученными при разработке данным. Рудник вел выборочную отработку богатых участков месторождения, оставляя в недрах бедные и забалансовые руды. Для этого месторождения конверсия системы разработки на геотехнологию могла бы снизить кондиции на минеральное сырье и расширить сырьевую базу.

Урупская группа месторождений меди включает в себя Урупское и Власихинское месторождения. Система разработки подэтажными штреками применяется за пределами окраинных целиков р. Уруп на флангах месторождения.

Систему разработки камерно-столбовую с регулярными целиками применяют с подготовкой блоков штреками и восстающими по руде. Камерные запасы отрабатывают с оставлением регулирования целиков. При отработке запасов под рекой применяют варианты с закладкой твердеющими смесями.

Вовлечение в разработку Бештаугорского и Быкогорского месторождений (Ставропольский край) было определено стратегическими соображениями, несмотря на то, что они не отличались большими запасами урана, а размещение в курортной зоне Минеральных вод осложняло их положение. Варианты систем разработки были основаны на феномене управления горным давлением путем деревянной крепи.

С 1986 г. развитие работ на урановых рудниках Северного Кавказа ориентировалось на принципиально новое направление в технологии добычи металлов – подземное и кучное выщелачивание. Конверсионная технология позволила предприятию удвоить объем добычи металла, снизить себестоимость металла до уровня рентабельности и решить многие эколого-экономические задачи для данного региона.

Наиболее распространено кислотное выщелачивание металлов растворами серной, соляной или азотной кислот, угле- и органических кислот; а также обладающих кислыми свойствами соединений.

Кислотное выщелачивание применяют к силикатным, алюмосиликатным, сульфидным, кварцевым и другим рудам с невысоким содержанием (до 8–12%) карбонатов.

Сернокислыми растворами интенсивно вы-

щелачиваются цинк, медь, кадмий, индий и кобальт, в меньшей мере никель. Свинец, селен, теллур выщелачиваются хуже. Используют переход из руды в раствор золота и серебра.

В выщелачивании полиметаллов выделяют периоды:

- быстрое увеличение скорости перехода металла в раствор с формированием фронта выщелачивания;
- перемещение фронта выщелачивания с растворением поверхностного слоя руды;
- перемещение процесса внутрь кусков.

Основное количество металлов переходит в растворы в первые два периода, которые занимают половину времени обработки.

Скорость движения фронта выщелачивания для полиметаллических руд Северного Кавказа составляет 0,015–0,018 м/с, при удельных расходах растворов 10–50 л/ч. Расход серной кислоты равен 3,0 кг, хлористого натрия – 1,0 кг и кальцинированной соды – 2,5 кг на 1 кг цинка.

В щелочной среде такие металлы, как золото, извлекаются способом кучного выщелачивания с использованием, в основном, цианидов, эффективность которых обеспечивается образованием устойчивых цианидных комплексов металлов в растворе.

Экологические факторы цианидного выщелачивания и трудности извлечения золота и серебра из упорных и трудноискрываемых руд и концентратов вызывают необходимость поиска новых, альтернативных химических реагентов.

Для шахтного подземного выщелачивания схема рудоподготовки включает: дробление рудного материала взрывом, частичный выпуск с целью создания компенсационного объема для разрыхления горной массы. В горных выработках трудно обеспечить однородность дробления руд по крупности, поэтому размер куска может колебаться от 200–120 (забойная крупность) до 50–15 мм.

Для дробления руды возможно принудительное обрушение руды глубокими скважинами на зажатую среду. Руда отбивается и магазинируется в блоках высотой 30–60 м с запасами руды в блоке 100 тыс. т и более. Просочившись через всю толщу руды, продуктивный раствор собирается в днище, откуда после осаждения взвесей направляется на переработку.

На Северном Кавказе шахтное подземное выщелачивание в камерах освоено при разработке Быкогорского уранового месторождения. К 70-м годам прошлого века балансовые запасы руд были отработаны традиционными системами с закладкой и магазинированием руды и пе-

реработкой ее на гидрометаллургическом заводе.

Предприятие освоило физико-химические процессы получения металла и превратилось в геотехнологический комплекс с подземным и кучным выщелачиванием урана из забалансовых руд и переработкой продуктивных растворов в химическом цехе.

Этому качественному технологическому скачку предшествовали лабораторные, натурные и широкомасштабные опытно-промышленные геотехнологические исследования на руднике, подтвердившие высокую эффективность извлечения урана выщелачиванием из забалансовых руд на месте их залегания.

Свойства руд и пород характеризовались данными:

Объемный вес сухой руды	2,2 т/м ³
Удельный вес руды	2,6 т/м ³
Влажность	8,5%

Коэффициент крепости по шкале М.М. Протодьяконова:

массивных гранит-порфиров	12–15
гранит-порфиров зон дробления	89–10
мергелей, аргиллитов и песчаников	2–6
Коэффициент рудоносности	0,25–1,0
Мощность рудного тела	до 20 м
Коэффициент фильтрации Кф	до 0,1 м/сутки
Кварца и полевого шпата	66,5%
Карбонатов	1,0%
Глинистых минералов	6,0%
Сульфидов	десяти доли процента

Система разработки этажным принудительным обрушением с отбойкой руды глубокими скважинами в зажатой среде, магазинированием и выщелачиванием металла инфильтрационным потоком реагента была адаптирована к конкретным условиям (рис.1).

Параметры взрывной подготовки руды к выщелачиванию представлены на рис. 2.

Улавливание продуктивных растворов с уровня депрессионной воронки подземных вод с помощью электровакуумных установок позволило упростить дренажную систему и повысить ее надежность. Установки производительностью 40–50 м³/ч, глубиной всаса 6,5 м на расстояние до 600 м создавали депрессионные воронки, включающие растекание растворов за пределы допустимого контура.

Оптимальность дробления определялась экономикой процесса и зависела от содержания урана в руде и свойств пород. Так, для гранит-порфиров с крепостью 12–15 фракция (-50+25) мм имела эффективную пористость кусков 2,2–2,5%, в то время как для фракции -200 мм она составляла лишь 0,9%.

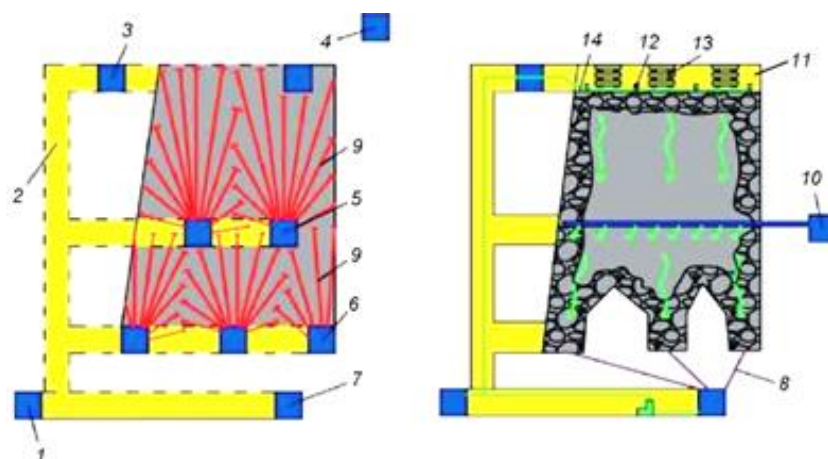


Рис.1. Подземное блоковое выщелачивание металлов из руд: 1 – штрек; 2 – восстающий; 3 – штрек для орошения; 4 – штрек; 5 – буровые штреки; 6 – дренажно-буровые штреки; 7 – дренажный штрек; 8 – дренажные скважины; 9 – промежуточный горизонт орошения; 10 – промежуточный горизонт орошения; 11 – штрек для орошения; 12 – верхняя подсечка; 13 – костровая крепь; 14 – оросительная система

Fig.1. Underground block ore leaching: 1 is a mine roadway; 2 is a raise; 3 is a mine roadway for spraying; 4 is a mine roadway; 5 are blind galleries; 6 are drainage roadways and blind galleries; 7 is a drainage roadway; 8 are drainage holes; 9 is an intermediate level for spraying; 10 is an intermediate level for spraying; 11 is a mine roadway for spraying; 12 is a top undercutting; 13 is a chock support; 14 is a spraying system

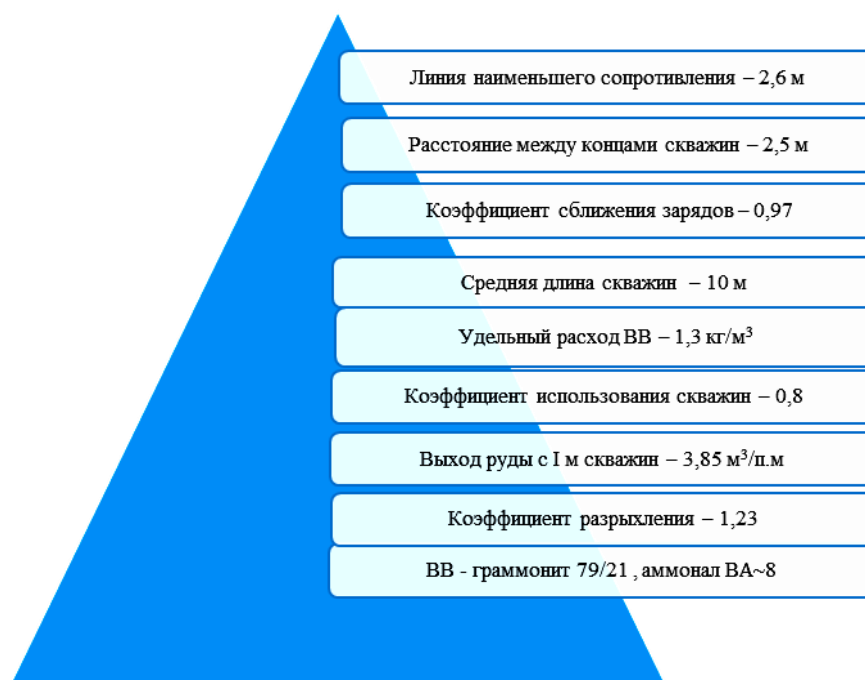


Рис. 2. Параметры подготовки блока выщелачивания буровзрывными работами

Fig. 2. Parameters of the leaching block preparation by drilling and blasting operations

Прошла проверку система выщелачивания металла с естественной проницаемостью фильтрационным потокам растворов реагента с подачей и приемом продуктивных растворов по нисходящим скважинам.

Выщелачивание осуществлялось фильтрационным потоком раствора реагента под давлением в 0,6 МПа с помощью электровакуумных установок. Это позволило руднику добыть из

забалансовых руд около 15% металла.

Важным преимуществом технологии является возможность «селективного» выщелачивания рудных тел путем подачи растворов в металло-содержащие участки рудного массива и избирательного выщелачивания руд с более высоким содержанием. Шахтное блоковое выщелачивание доказало право на существование при доработке забалансовых руд месторождений.

В результате разработки Садонских рудников в недрах протекают природные геотехнологические процессы, в результате которых воды растворяют и выносят металлы в достаточных для получения товарных осадков концентрациях.

Руды Садонских месторождений – полиминеральные, среднезернистые с неравномерным распределением минералов, прорастаниями, замещениями и микротрещинами наследственных деформаций. Потери в недрах оцениваются в 2 млн т руд. Шахтные воды в среднем содержат до 400 мг/л цинка и до 11 мг/л свинца.

Дебит вод Холстинского рудника составляет 71 м³/ч при содержании цинка 10–40 г/м³ и свинца 7,8 г/м³ при pH=6,7. Концентрация полиметаллов в них колеблется: цинка – 120–130 г/м³, свинца – 5,6–10,2 г/м³.

Воды Згидского рудника сбрасываются в окружающую среду через штольню «Надежда» объемом 24 м³/ч при содержании свинца около 4,24 г/м³, а цинка – 1,9 г/м³, и через штольню «Красная» объемом 90,3 м³/ч при концентрации свинца 5,54 г/м³ и цинка – 12,2 г/м³.

Руды Хаником-Какадурского месторождения содержат, %: сфалерита – 2,5–3,0, галенита – 1,5–2,0, халькопирита – 0,4–0,5, пирита – 10,0–12,0, пирротина – 4,0–5,0, карбонатов – 4,0–6,0. Из верхних штолен выходит 140–160 м³/ч воды, со-

держащей 60–100 г/м³ цинка и 4,5–5,5 г/м³ свинца.

Проект выщелачивания Какадурского участка предусматривал выщелачивание 1,15 тыс. т руды с содержанием свинца 0,99% и цинка 0,71%. Реагенты – натриевая соль и серная кислота. Осадители – кальцинированная сода и цинковая пыль. Продуктивные растворы первой очереди содержали: 210 г/м³ цинка и 200 г/м³ свинца. Производительность установки – 150 м³/ч.

В недрах Архонского рудника потеряно до 150 тыс. т руды, содержащей 7 тыс. т цинка и 3 тыс. т свинца. Минералогический состав рудной массы жилы, %: сфалерита – 8–9, галенита – 1,0–1,5, халькопирита – 1,0, пирита и марказита – 10–13, пирротина – 4–5, карбонатов – 6–8.

Шахтные воды Садонского месторождения сбрасываются в окружающую среду через ряд штолен. Их суммарный дебит равен 305 м³/ч при содержании свинца 4625 г/м³ и цинка 6,46 г/м³.

Экспериментально определено, что шахтные воды представляют собой жидкую металлосодержащую руду, из которой можно извлекать металлы, после чего они становятся менее опасными для окружающей среды.

Результаты добычи металлов выщелачиванием на месторождениях Северного Кавказа представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты добычи металлов выщелачиванием на месторождениях Северного Кавказа
Table 1. Mining performance as a result of ore leaching at deposits of the North Caucasus

Месторождение	Годы	Вид выщелачивания	Результат
Быкогорское Бештаугорское	1968	Блоковое выщелачивание магазинированной руды инфильтрационным потоком Блоковое выщелачивание фильтрационным потоком без разрушения руд	Добыто из забаланса 15% металла с извлечением 58 %, добыча повысилась на 161% при сокращении содержания в недрах в 5 раз; себестоимость урана снизилась до 62 %
Садонское	1973	Выщелачивание хлорной водой руды с содержанием цинка 0,55% и свинца 0,15%	Извлечено цинка 75%, свинца 21%
Фиагдонское	1973	Осаждение содой из шахтных стоков	За 48 с. получено 32 т геля, %: цинка – 30, никеля – 6, железа – 6, свинца – 0,54, меди – 0,15, кадмия – 0,021
Архонское	1973	Осаждение содой из шахтных стоков	За 51 с. получено 40 т геля, %: цинка – 25, железа – 6,0, свинца – 0,3–0,5, меди – 0,15–0,28, кадмия – 0,054, кобальта – 0,08, никеля – 0,075
Какадурское	1977	Блоковое выщелачивание балансовых руд с содержанием свинца – 0,99 %, цинка – 0,71%	Получено 60 т концентрата, пригодного для получения товарных металлов
Мизурская РОФ	2014	Выщелачивание в дезинтеграторе хвостов обогащения с содержанием, %: свинца – 0,84, цинка – 0,95	Извлечено, %: цинка – 70, свинца – 21
Быкогорское Бештаугорское	1968	Блоковое выщелачивание магазинированной руды инфильтрационным потоком Блоковое выщелачивание фильтрационным потоком без разрушения руд	Добыто из забаланса 15% металла с извлечением 58%, добыча повысилась на 161% при сокращении содержания в недрах в 5 раз; себестоимость урана снизилась до 62%

Обсуждение и выводы

Для технологии блокового подземного выщелачивания типичной является разработка Быкогорского месторождения в курортной зоне Минеральных вод.

Конверсия на новую технологию добычи позволила не только сохранить уровень добычи урана, но и создать предпосылки для дальнейшего роста производства, несмотря на уменьшение содержания урана в руде в пять раз. Количество урана в бедных рудах, некондиционных для традиционного способа, повысилось в 3,5 раза по сравнению с разведанными запасами балансовых руд.

Объем подготовительно-нарезных работ и горной массы, извлекаемой на поверхность, был доведен до минимума, на порядок увеличена производительность труда, осуществлена бесцеликовая отработка рудных тел, улучшены санитарно-гигиенические условия труда.

Осуществленное впервые в горной практике улавливание продуктивных растворов с уровня депрессионной воронки подземных вод с помощью электровакуумных установок позволило отказаться от гидроизоляции днища блока. Через скважины с помощью электровакуумных установок производилась откачка продуктивных растворов, благодаря чему потери металла с растворами не превышали 3–5%.

На предприятиях ПГХК, разрабатывающих месторождения Стрельцовской группы, блоко-

вое подземное выщелачивание осуществляется с восьмидесятих годов прошлого века с наращиванием объемов и доведением удельного веса технологии до 40–50% от общего объема производства.

В рамках комбинированной технологии богатые руды отрабатывают слоями с закладкой пустот твердеющей смесью, рядовые руды отрабатывают подэтажными системами и выщелачивают в кучах, бедные руды выщелачивают в блоках.

Определено, что подземным выщелачиванием целесообразно отрабатывать руды при коэффициенте разрыхления 1,3 и определенном содержании металлов, например для урана – 0,06%. Производительность выщелачивания увеличивается в 1,35 раза, а себестоимость извлекаемого урана в 1,15 раза меньше, чем при коэффициенте разрыхления 1,2.

Коэффициент извлечения при подземном выщелачивании изменяется от 49 до 88%.

Качественная характеристика факторов подземного блокового выщелачивания приведена в табл. 2.

Из таблицы видно, что диапазон применения подземного блокового выщелачивания значителен, поскольку блоки являются по существу реакторами выщелачивания с возможностью управления влияющими на процесс факторами.

Таблица 2. Условия для применения подземного блокового выщелачивания
Table 2. Underground block leaching conditions

Факторы	Уровень факторов извлечения металлов		Влияние на процесс выщелачивания
	максимальный	минимальный	
Тип руд	Окисленные	Сульфидные	Изменение химизма и параметров
Минерализация	Прожилковая	Вкрапленная	Скорость доступа реагента к металлу
Наличие пленки на поверхности руды	Отсутствует	Присутствует	Скорость доступа реагента к металлу
Содержание	Максимальное	Минимальное	Эффективность выщелачивания
Наличие вредных примесей	Минимальное	Максимальное	Скорость и полнота извлечения металла
Пористость	Максимальное	Минимальное	Скорость реакции внутри руды
Крупность руд	Большая часть фракций – 25 мм	Меньшая часть фракций – 25 мм	Скорость фильтрации растворов
Фильтрационные свойства	Коэффициент фильтрации более 0,1 м/с	Коэффициент фильтрации менее 0,05 м/с	Возможность проникновения раствора
Состояние руд	Текущие	После складского хранения	Скорость и полнота извлечения металла
Шахтная температура	Максимальная	Минимальная	Скорость реакции

Алгоритм оценки параметров блокового выщелачивания металлических руд представлен на **рис. 3**.



Рис. 3. Алгоритм обоснования параметров блокового выщелачивания

Fig. 3. An algorithm of providing a rationale for block leaching parameters

На территории горнодобывающих регионов Северного Кавказа, Урала, Сибири, Дальнего Востока и Севера расположены рудники, деятельность которых была остановлена по причине

несоответствия кондиций запасов требованиям эффективности при использовании традиционных технологий.

Эти запасы, как видно из материалов статьи, могут быть рентабельно отработаны новыми технологиями с выщелачиванием, где возможности блокового выщелачивания могут быть усилены другими новыми технологиями: с кучным выщелачиванием, со скважинным выщелачиванием и с комбинированием известных традиционных и новых технологий (**рис. 4**).

Комбинирование способов разработки месторождений вызвало к жизни модернизацию основных и вспомогательных производственных процессов [13–17].

Сохранившаяся инфраструктура бывших предприятий и сведения о запасах способствует реализации направления на конверсию технологий добычи и решению технологических, экологических и социальных проблем регионов.

Вопросы совершенствования технологии разработки рудных месторождений, затронутые в настоящей статье, рассматриваются в работах специалистов горного направления [18–20].

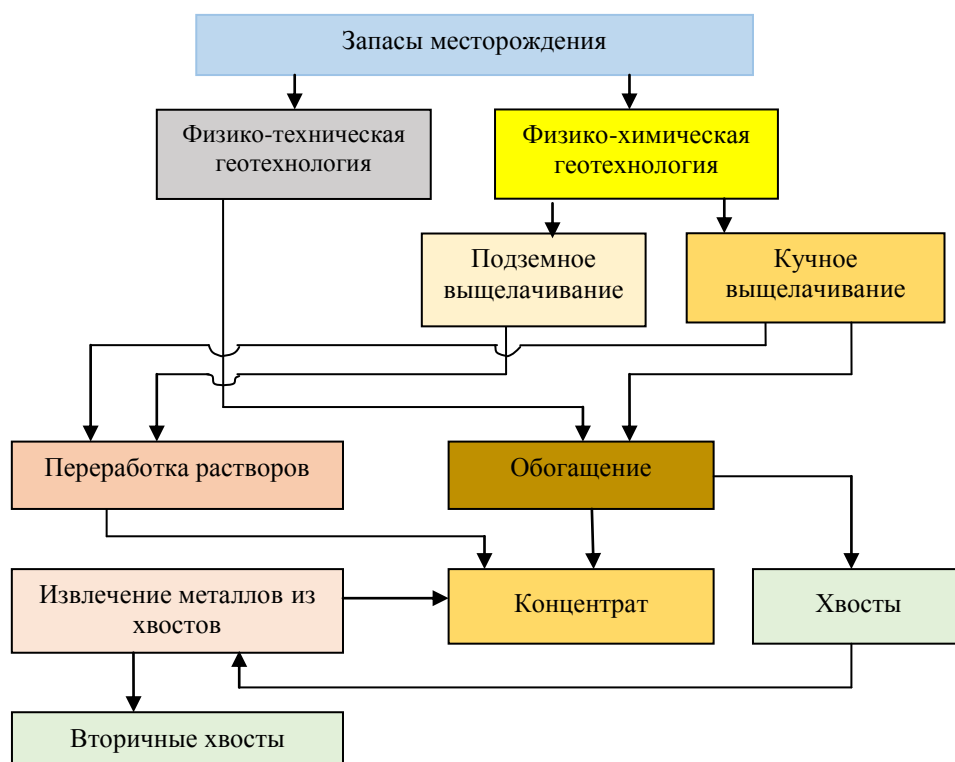


Рис. 4. Комбинированное выщелачивание металлов из руд / Fig. 4. Combined ore leaching

Список литературы

1. Golik V.I., Gabaraev O.Z., Maslennikov S.A., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. The provision of development conversion perspectives into underground one for Russian iron ore deposits development // The Social Sciences (Pakistan). 2016. Vol. 11. № 18. P. 4348–4351.
2. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Каргинов К.Г. Основа устойчивого развития РСО-Алания - горнодобывающая отрасль // Устойчивое развитие горных территорий. 2017. Т. 9. № 2 (32). С. 163–171.
3. Adams M. D. Gold Ore Processing Project Development and Operations. 2 nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016. 980 p.
4. Heap Leaching Technology – Current State, Innovations, and Future Directions: A review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2016. Vol. 37. No. 2. P. 73–119.
5. Selective leaching of nickel and cobalt from limonitic laterite using phosphoric acid: An alternative for value-added processing of laterite // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 189. P. 620–626.
6. Selective leaching of valuable metals from laterite nickel ore with ammonium chloridehydrochloric acid solution // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 179. P. 24–30.
7. Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low-grade saprolitic nickel laterite ore // Hydrometallurgy. 2016. Vol. 160. P. 26–37.
8. Голик В.И., Комащенко В.И. Отходы обогащения железистых кварцитов как сырье для доизвлечения металлов и использования в качестве закладочных смесей // Горный журнал. 2017. № 3. С. 43–47.
9. Совершенствование технологии переработки теннантитсодержащих руд медноколчеданных месторождений Урала / Емельяненко Е.А., Рыльникова М.В., Горбатова Е.А., Ягудина Ю.Р. // Горный журнал. 2016. № 12. С. 65–72.
10. Повышение полноты использования недр путем глубокой утилизации отходов обогащения угля / Голик В.И., Комащенко В.И., Страданченко С.Г., Масленников С.А. // Горный журнал. 2012. № 9. С. 91–95.
11. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов / Гавришев С.Е., Корнилов С.Н., Пыталев И.А., Гапонова И.В. // Горный журнал. 2017. № 12. С. 46–51.
12. Голик В.И., Лукьянов В.Г., Хашева З.М. Обоснование возможности и целесообразности использования хвостов обогащения руд для изготовления твердеющих смесей // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 5. С. 6–14.
13. Новые технологии подземных сооружений в рамках сдержанных городских условий / Плешко М., Панкратенко А., Ревякин А., Щекина Е., Холодова С. // Веб-конференция E3S. 2018. С. 02–36.
14. Повышение эффективности взрывной отбойки на основе новых способов инициирования скважинных зарядов на карьерах / Комащенко В.И., Голик В.И., Белин В.А., Гапоненко А.Л. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 9. С. 293–304.
15. Дмитрак Ю.В., Логачева В.М., Подколзин А.А. Геофизическое прогнозирование нарушенности и обводненности массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 11. С. 35–36.
16. Zaalishvili, V.B., Melkov, D.A., Dzeranov, B.V., Morozov, F.S., Tuae, G.E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center // International Journal of GEOMATE. 2018. 15 (47), pp. 158–163.
17. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Gavrina O. A., Revazov V. C. System analysis of power consumption by nonferrous metal-lurgy enterprises based on rank modeling of individual technocenosis castes. MATEC Web of Conferences / XIV Inter-national Scientific-Technical Conference “Dynamic of Technical Systems” (DTS-2018), 2018, vol. 226.
18. Khomenko O. E., Lyashenko V. I. Geodynamic safety when increasing the depth of underground mining of ore deposits // Вестник Магнитогорского государственного университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16, №4. С. 4–12.
19. Бикбаева Г.А., Орехова Н.Н., Куликова Е.А. Применение клинкера в комплексной технологии переработки техногенных стоков горно-металлургических предприятий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 2 (42). С. 22–25.
20. Калмыков В.Н., Петрова О.В., Янтурина Ю.Д. Оценка технологических резервов обеспечения устойчивого развития горнотехнической системы при подземной разработке рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельные статьи (специальный выпуск). 2014. №10. С. 69–77.

References

1. Golik V.I., Gabaraev O.Z., Maslennikov S.A., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. The provision of development conversion perspectives into underground one for Russian iron ore deposits development. The Social Sciences (Pakistan), 2016, vol. 11, no. 18, pp. 4348–4351.
2. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Karginov K.G. The basis of sustainable development of North Ossetia-Alania is a mining industry. *Ustoychivoe razvitie gornykh territoriy* [Sustainable development of mountain territories], 2017, vol. 9, no. 2 (32), pp. 163–171. (In Russ.)
3. Adams M.D. Gold ore processing project development and operations. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016, 980 p.

4. Heap leaching technology - current state, innovations, and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2016, vol. 37, no. 2, pp. 73–119.
5. Selective leaching of nickel and cobalt from limonitic laterite using phosphoric acid: An alternative for value-added processing of laterite. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 189, pp. 620–626.
6. Selective leaching of valuable metals from laterite nickel ore with ammonium chloride hydrochloric acid solution. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 179, pp. 24–30.
7. Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low-grade saprolitic nickel laterite ore. *Hydrometallurgy*, 2016, vol. 160, pp. 26–37.
8. Golik V.I., Komashchenko V.I. Ferruginous quartzite tailings as a raw material for an additional recovery of metals and their use as filling mixtures. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2017, no. 3, pp. 43–47. (In Russ.)
9. Emelianenko E.A., Rylnikova M.V., Gorbatoeva E.A., Yagudina Yu.R. Improving the processing technology of tennantite-containing ores of copper-sulphide deposits of the Urals. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2016, no. 12, pp. 65–72. (In Russ.)
10. Golik V.I., Komashchenko V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Improving the completeness of the use of mineral resources through a deep recovery of coal waste. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2012, no. 9, pp. 91–95. (In Russ.)
11. Gavrishev S.E., Kornilov S.N., Pytalev I.A., Gaponova I.V. Improving the economic efficiency of mining enterprises through the involvement of man-made geo-resources in operation. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2017, no. 12, pp. 46–51. (In Russ.)
12. Golik V.I., Lukyanov V.G., Khasheva Z.M. Justification of the possibility and feasibility of using ore dressing tailings for manufacturing hardening mixtures. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo-Resource Engineering], 2015, vol. 326, no. 5, pp. 6–14. (In Russ.)
13. Pleshko M., Pankratenko A., Revyakin A., Shchekina E., Kholodova S. New technologies of underground structures in the framework of restrained urban conditions. *E3S Web Conference* 2018, no. 02036.
14. Komashchenko V.I., Golik V.I., Belin V.A., Gaponenko A.L. Improving the efficiency of breaking up by explosives based on new methods for initiating borehole charges in open pits. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2014, no. 9, pp. 293–304. (In Russ.)
15. Dmitrak Yu.V., Logacheva V.M., Podkolzin A.A. Geophysical forecasting of a broken condition and watering of a rock massif. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2006, no. 11, pp. 35–36. (In Russ.)
16. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Dzeranov B.V., Morozov F.S., Tuaeov G.E. Integrated instrumental monitoring of hazardous geological processes under the Kazbek volcanic center. (2018) *International Journal of GEOMATE*, 15 (47), pp. 158–163.
17. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Gavrina O.A., Revazov V.Ch. System analysis of power consumption by nonferrous metallurgy enterprises based on rank modeling of individual technocenosis castes. *MATEC Web of Conferences. The 14th International Scientific Technical Conference Dynamic of Technical Systems (DTS-2018)*, 2018, vol. 226.
18. Khomenko O. E., Lyashenko V. I. Geodynamic safety when increasing the depth of underground mining of ore deposits. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2018, vol. 16, no. 4, pp. 4–12.
19. Bikbaeva G.A., Orekhova N.N., Kulikova E.A. The use of clinker in the integrated technology for processing industrial waste from mining and metallurgical enterprises. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 2 (42), pp. 22–25. (In Russ.)
20. Kalmykov V.N., Petrova O.V., Yanturina Yu.D. Evaluation of technological reserves to ensure sustainable development of the mining system in underground mining of ore deposits. *Gorny informatsionno-analitichesky byulleten (nauchno-tekhnicheskyy zhurnal)* [Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. Stand-alone papers (special issue), 2014, no. 10, pp. 69–77. (In Russ.)

Поступила 08.07.2020; принята к публикации 12.08.2020; опубликована 25.09.2020
Submitted 08/07/2020; revised 12/08/2020; published 25/09/2020

Голик Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Горное дело», Южно-Российский государственный политехнический университет, главный научный сотрудник Геофизического института Владикавказского научного центра РАН. Новочеркасск, Россия. Email: v.i.golik@mail.ru

Разоренов Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор, ректор, Южно-Российский государственный политехнический университет. Новочеркасск, Россия. Email: yiri1963@mail.ru

Дмитрак Юрий Витальевич – д-р техн. наук, профессор, ректор, Северо-Кавказский государственный технологический университет. Владикавказ, Россия. Email: dmitrak@yandex.ru

Габараев Олег Знаурович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Горное дело», Северо-Кавказский государственный технологический университет. Владикавказ, Россия, Email: gabaraev59@mail.ru

Vladimir I. Golik – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Mining Department, South-Russian State Polytechnic University; Chief Researcher, Geophysical Institute, Vladikavkaz Research Center, Russian Academy of Sciences, Novocherkassk, Russia. Email: v.i.golik@mail.ru

Yury I. Razorenov – DrSc (Eng.), Professor, Rector, South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia. Email: yiri1963@mail.ru

Yury V. Dmitrak – DrSc (Eng.), Professor, Rector, North Caucasian State Technological University, Vladikavkaz, Russia. Email: dmitrak@yandex.ru

Oleg Z. Gabaraev – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Mining Department, North Caucasian State Technological University, Vladikavkaz, Russia. Email: gabaraev59@mail.ru

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

УДК 621.74

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-25-33



ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ РАЗУПРОЧНЯЮЩИХ ДОБАВОК В ПРАКТИКЕ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Леушин И.О., Кошелев О.С., Маслов К.А., Титов А.В.

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

Аннотация. Актуальность и цель исследования: статья представляет собой обзор существующих решений по одной из актуальных проблем литейного производства – проблеме затруднённой выбиваемости литейных стержней из отливок. **Результаты исследования:** в статье отмечено, что в наибольшей степени проблема выбиваемости характерна для жидкостекольных стержневых смесей. Представлен широкий спектр применяемых органических и неорганических добавок. Показаны их главные преимущества и недостатки. В меньшей степени проблема выбиваемости стержней существует и для других типов стержневых смесей, например для фосфатных смесей и смесей для Cold-box-amin процесса. В статье делается попытка определить основные направления решения проблемы затруднённой выбивки стержней в зависимости от механизма (физической природы) разупрочнения. В результате предлагаются пять основных направлений решения проблемы выбиваемости стержней. **Выводы:** по мнению авторов статьи, определены два наиболее перспективных направления поиска универсальных разупрочняющих добавок. Первое из них – применение в составе стержневых смесей порообразующих веществ. Второе направление подразумевает использование терморасширяющихся добавок. Эти добавки можно будет применять для нескольких типов стержневых смесей. При этом эксплуатационные характеристики стержня будут оставаться на высоком уровне. Были также перечислены основные требования к универсальным разупрочняющим добавкам.

Ключевые слова: стержневая смесь, литейный стержень, жидкостекольная смесь, затруднённая выбиваемость, разупрочняющие добавки.

© Леушин И.О., Кошелев О.С., Маслов К.А., Титов А.В., 2020

Для цитирования

Оценка применения разупрочняющих добавок в практике производства литейных стержней / Леушин И.О., Кошелев О.С., Маслов К.А., Титов А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 25–33. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-25-33>



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

ASSESSMENT OF THE USE OF SOFTENING ADDITIVES
IN THE PRACTICE OF MANUFACTURING CASTING CORES

Leushin I.O., Koshelev O.S., Maslov K.A., Titov A.V.

Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Relevance and objective of the study: The paper is a review of the existing solutions to one of the urgent problems of foundry, namely the problem of a difficult knocking-out ability of casting cores from castings. **Findings:** The paper outlines that to the greatest extent the problem of the knocking-out ability is typical for liquid glass core mixtures. A wide range of used organic and inorganic additives is presented. Their main advantages and disadvantages are shown. To a lesser extent, the problem of the core knocking-out ability exists for other types of core mixtures, for example, for phosphate mixtures and mixtures for a cold-box-amin process. The authors made an attempt to determine the main directions taken to solve the problem of the difficult knocking-out ability of cores depending on the mechanism (physical nature) of softening. As a result, the paper proposes five main directions for solving the problem of a core knocking-out ability. **Conclusions:** The authors of the paper identified two most promising directions in the search for universal softening additives. The first of them is the use of pore-forming substances in the core mixtures. The second direction involves the use of thermal expansion additives. These additives can be used for several types of core mixtures. At the same time, the operating characteristics of the core will remain at a high level. The paper also presents a list of basic requirements for universal softening additives.

Keywords: core mixture, casting core, liquid glass mixture, difficult knocking-out ability, softening additives.

For citation

Leushin I.O., Koshelev O.S., Maslov K.A., Titov A.V. Assessment of the Use of Softening Additives in the Practice of Manufacturing Casting Cores. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 25–33. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-25-33>

Постановка проблемы

Применяемые в литейном производстве стержневые смеси должны обладать определённым комплексом технологических свойств. Безусловно, одним из таких свойств является хорошая выбиваемость стержней.

Некоторые из стержневых смесей, обладая вполне удовлетворительными характеристиками, плохо выбиваются из отливок. Наиболее яркий пример – жидкостекольные стержневые смеси. Причиной их плохой выбиваемости является высокая остаточная прочность стержня, обусловленная образованием при температуре свыше 800°C легкоплавкой эвтектики (21,6 % Na₂O и 73 % SiO₂), которая после охлаждения цементирует зёрна песка в монолитную массу [1].

Проблема затруднённой выбиваемости присуща также и другим стержневым смесям. Например, стержни сложной геометрической формы, изготовленные Cold-box-amin процессом, плохо выбиваются из алюминиевых отливок [2]. Наиболее вероятной причиной можно считать относительно невысокую температуру прогрева стержня, недостаточную для полного разрушения связующего (полиуретана).

Выбиваемость стержней из отливок зависит не только от применяемой стержневой смеси, но

и от конфигурации самих стержней. Сложная геометрическая форма полостей отливки препятствует выбивке стержней, изготовленных из смесей даже с очень хорошей выбиваемостью.

Проблема выбиваемости стержней характерна также для производства тонкостенных отливок из сплавов, обладающих малой прочностью. В этом случае применение обычных способов выбивки стержней может привести к повреждению или даже разрушению отливки.

Обзор существующих решений проблемы

Из всех применяемых сейчас стержневых смесей, пожалуй, наихудшей выбиваемостью обладают смеси на жидком стекле.

Для решения этой проблемы разработано множество различных добавок, которые разделяются на два класса: органические и неорганические. Их принципиальное различие – поведение при нагреве. Органические добавки разлагаются в интервале температур 300–700°C с выделением газов и образованием пироуглерода [2]. Неорганические добавки, напротив, выдерживают воздействие высоких температур, их разупрочняющее действие обычно проявляется только после прогрева стержня до 800°C и выше. При этом, как правило, выделение газов не происходит.

К неорганическим добавкам относятся глина, феррохромовый шлак, доменный шлак, вермикулит, бентонит, асбест, фосфаты, гидрат окиси алюминия и др.

Одной из наиболее часто применяемых неорганических добавок является глина, которая может входить в состав смеси как отдельно, так и совместно с другими компонентами. Например, жидкостекольная смесь, содержащая прокаленный при 630–770°C каолин [3], или жидкостекольная смесь, содержащая глину, окись алюминия, окись кальция и окись магния [4]. К этой же группе жидкостекольных смесей можно отнести смесь с добавками бентонита и двухзамещённого фосфорно-кислого натрия [5], а также смесь с добавками бентонитовой глины и шлама электрохимического травления изделий из алюминиевых сплавов (шлам содержит около 60% Al_2O_3) [6]. Глина и окиси активных металлов образуют сложную систему, в которой температура спекания превышает температуру прогрева стержня. Второй максимум прочности (800°C) сдвигается в область более высоких температур, что способствует улучшению выбиваемости. Смеси с подобными добавками описаны также в иностранных источниках [7, 8].

Несомненное преимущество всех неорганических добавок – их малая газотворность и, как следствие, благоприятная в санитарно-гигиеническом отношении обстановка на стержневом участке. Основным недостатком является то, что их активное действие начинается только после прогрева стержня до высоких температур. Это ограничивает их применение в производстве литья из низкотемпературных сплавов. К тому же для значительного улучшения выбиваемости требуется довольно большое количество неорганических добавок. Это способствует уменьшению в составе смеси связующего – жидкого стекла, что влечёт за собой снижение рабочих прочностных характеристик стержня.

К органическим добавкам относятся масла, синтетические смолы, сахара, каменноугольный пек, древесный пек, латекс, полистирол, целлюлоза, крахмал, лигнин и др.

Известны жидкостекольные стержневые смеси, где в качестве разупрочняющей добавки применяются органические соединения, состоящие из нескольких гидроксильных групп (глюкоза, патока и др.). Например, смесь, содержащая добавку двойного соединения сахаров с хлористым натрием, причём сахаросодержащий материал является непищевым продуктом производства кристаллической глюкозы из кукурузы [9]. Ещё одним примером является смесь, со-

держащая побочный продукт переработки свеклы на сахар – дефека́т [10]. При этом работа выбивки смесей при прогреве стержня до температур в интервале 600–900°C составляет 1,5 кг/м при содержании добавки в составе смеси в количестве 4%. Известна также жидкостекольная смесь с добавлением крахмальной патоки [11].

Основным недостатком применения сахаросодержащих веществ в качестве разупрочняющих добавок является их высокая себестоимость. К тому же эти добавки работают очень эффективно только при относительно высоком процентном содержании в составе смеси, что в свою очередь негативно влияет на рабочие прочностные свойства стержня (понижается прочность, повышается осыпаемость).

К ещё одной группе часто применяемых органических добавок относятся синтетические смолы. Например, жидкостекольная смесь с добавкой от 0,05 до 0,5% фенолрезольной смолы [12] или жидкостекольная смесь с добавкой от 0,2 до 0,8% диспергированной твёрдой фенолформальдегидной смолы новолачного типа [13].

Добавки синтетических смол разупрочняют жидкостекольные стержни даже при относительно невысоком процентном содержании в составе смеси. Один из основных недостатков применения синтетических смол – выделение в атмосферу цеха при деструкции смол вредных веществ (фенол, формальдегид и др.).

Общим недостатком всех органических добавок является выделение газов при деструкции, что ухудшает условия труда на стержневом участке.

Для фосфатных смесей проблема выбиваемости стоит не так остро, как для жидкостекольных, но, тем не менее, разработано немало добавок, способствующих их разупрочнению. К таким добавкам относятся, прежде всего, неорганические материалы: каолин, трифолин, окись бора, окислы цинка и др.

Например, для фосфатных смесей, отверждаемых тепловой сушкой введение в состав смеси обогащённого каолина способствует связыванию свободной ортофосфорной кислоты алюмохромфосфатного связующего в прочные фосфаты алюминия, которые при прогреве стержня способствуют возникновению больших объёмных напряжений, приводящих к разрушению фосфатных плёнок и улучшению выбиваемости [14].

Ещё одной разупрочняющей добавкой для фосфатных смесей является трифолин – неорганический пылевидный материал тёмного цвета, содержащий оксиды железа без каких-либо по-

сторонних примесей [15]. В результате химической реакции алюмохромфосфатного связующего с трифолином образуется неорганический полимер разветвлённого строения, который при температурах 600–900°C способствует улучшению выбиваемости смеси.

Недостатки применения подобных добавок к фосфатным смесям те же, что и в случае жидкостеклянных смесей – необходимость прогрева стержня до высоких температур и относительно высокое процентное содержание в смеси (снижение прочности из-за снижения количества связующего).

В некоторых случаях проблема выбиваемости стержней характерна и для смесей на органическом связующем. Например, стержни, изготовленные Cold-box-amin процессом для алюминиевых отливок типа патрубков и впускных труб, недостаточно хорошо выбиваются.

Наиболее вероятной причиной затруднённой выбиваемости в данном случае является недостаточный прогрев стержня, из-за чего заключительная стадия термодеструкции связующего (полиуретана) проходит не полностью.

На предприятиях данную проблему пытаются решить следующими путями [2]:

- снижают содержание связующего материала в стержневой смеси до 1%;

- доводят массовое соотношение смолы и изоцианата до 60:40;

- применяют менее термостойкую смолу;

- проводят дополнительный прогрев стержня за счёт термообработки отливок с не выбитыми стержнями.

Первые два способа решения проблемы, безусловно, улучшат выбиваемость стержней. Однако при этом из-за недостатка связующего реакция образования полиуретана будет проходить не полно, в результате чего уменьшится начальная прочность стержня. Оставшиеся два способа имеют один общий недостаток – удорожание процесса изготовления стержней. Кроме того, термообработка с невыбитыми стержнями значительно ухудшит экологическую обстановку в литейном цехе [16].

Необходимо обратить внимание на то, что специальные добавки для улучшения выбиваемости стержней, изготовленных Cold-box-amin процессом, практически не применяются.

Обсуждение результатов

Авторы статьи считают, что из всего разнообразия известных решений проблемы затруднённой выбиваемости литейных стержней можно выделить несколько основных направлений (см. таблицу).

Направления решения проблемы затруднённой выбиваемости литейных стержней
Directions taken to solve the problem of the difficult knocking-out ability of casting cores

Направление решения проблемы	Преимущества	Недостатки	Области применения	Примеры применения
Улучшение выбиваемости за счёт уменьшения содержания связующего в стержневой смеси	Улучшение выбиваемости. Незначительные затраты	Малая эффективность при использовании в разных типах стержневых смесей. Возможность снижения других эксплуатационных характеристик стержня	Жидкостеклянные смеси	[17–19]
Введение в состав стержневой смеси добавок, разупрочняющих связующее при повышенных температурах	Улучшение выбиваемости	Отсутствие универсальности (необходимость разработки различных добавок для разного типа стержневых смесей)	Жидкостеклянные, фосфатные, песчано-глинистые и другие смеси	[20–25]
Применение физических методов обработки связующего и огнеупорной основы смеси	Улучшение выбиваемости	Сложность и высокая стоимость применяемого оборудования	Жидкостеклянные смеси	[26, 27]
Введение в стержневую смесь порообразующих добавок	Значительное улучшение выбиваемости	Выделение газов и, как следствие, ухудшение экологической обстановки на стержневом участке. Загрязнение поверхностного слоя отливки	Жидкостеклянные смеси	[28, 29]
Введение в стержневую смесь терморасширяющихся добавок	Значительное улучшение выбиваемости. Экологичность (отсутствие газовой выделения)	Высокая стоимость. Невозможность применения прокали смеси до высоких температур	Жидкостеклянные, фосфатные, песчано-глинистые и другие смеси	[30]

Первым направлением является улучшение выбиваемости за счёт уменьшения количества связующего в составе смеси путём введения специальных добавок, повышающих физико-механические свойства смеси и тем самым компенсирующих недостаток связующего. Например, известна жидкостекольная смесь, в состав которой вводится жидкостекольно-бокситовая суспензия, модифицированная рафинированным алкиларилсульфонатом [17]. Эти добавки позволяют повысить прочностные свойства смеси и снизить расход связующего – жидкого стекла. Аналогичным образом работает и комплексная добавка, содержащая этилсиликат, аминоспирт и водный раствор щёлочи [18]. При этом работа выбивки может быть снижена в 2–8 раз. Ещё одним примером данного направления решения проблемы выбиваемости может служить жидкостекольная смесь с добавками 25–29%-ного водного раствора аминоспирта и 40%-ного раствора нефтяного битума в жидком хлорпарафине [19].

Основным недостатком данного подхода к решению проблемы можно считать то, что добавки ориентированы на применение в какой-то одной смеси и могут работать неэффективно применительно к другим типам стержневых смесей. К тому же повысить одновременно весь комплекс эксплуатационных свойств стержня с помощью введения добавок довольно сложно.

Второе направление улучшения выбиваемости стержней – введение в смесь добавок, разупрочняющих связующее при прогреве стержня до определённой температуры после заливки формы расплавом. Механизмы разрушения связующего могут быть различными. Например, добавка в жидкостекольную смесь отработанного магний-молибдено-ванадиевого катализатора, получаемого при производстве синтетического каучука, позволяет значительно понизить остаточную прочность стержня при его прогреве до 800°C. Разупрочнение стержня происходит за счёт появления многочисленных центров кристаллизации, в результате чего идёт интенсивный процесс образования многокомпонентных соединений типа $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O} - \text{MoO}_3 - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ [20]. Добавка в состав стержневой смеси на основе жидкого стекла волокон распущенной макулатуры при прогреве стержня приводит к их термодеструкции. В результате выделяющиеся газы разрушают гель кремневой кислоты и стержень разупрочняется [21]. Совместное введение в жидкостекольную смесь окислов железа и серы очень эффективно разупрочняет стержни после их прогрева до 800°C, работа выбивки

снижается в 10 раз [22]. Добавка высших жирных спиртов в самотвердеющие фосфатные смеси влияет в результате реакции полимеризации алюмохромфосфатного связующего на образование совместно с пылевидным кварцем мелкозернистой структуры, способствующей при прогреве стержня его разупрочнению [23].

К этому же направлению можно отнести добавки для жидкостекольных смесей, приводящие к сдвигу второго максимума прочности (800°C) в область более высоких температур, тем самым способствующие улучшению выбиваемости. Например, добавка совместно алюминиевой пудры и технической серы [24] или пропиленкарбоната и каолина [25].

Второму направлению решения проблемы выбиваемости стержней присущ тот же недостаток, что и первому направлению – привязка вводимых в смесь добавок к конкретному типу смеси. Кроме того, некоторые добавки не позволяют при изготовлении стержней применять тепловую сушку [24].

К третьему направлению решения проблемы выбиваемости литейных стержней можно отнести применение физических методов обработки связующих материалов и огнеупорной основы смеси (песка) в сочетании с использованием различных добавок.

К физическим методам обработки относятся в первую очередь обработка электромагнитными полями, ультразвуком, вакуумирование и др.

Например, известен способ приготовления связующего, при котором жидкое стекло модифицируют 8%-ным водным раствором полиакриламида под воздействием электрического поля напряжённостью 400–800 В/м. Это позволяет снизить содержание связующего (жидкого стекла) в смеси и тем самым улучшить выбиваемость [26]. Известен также способ приготовления связующего, при котором жидкое стекло подвергается сначала обработке ультразвуком, а затем обработке импульсными электрическими разрядами. При этом в качестве добавки используется технический углерод. Улучшение выбиваемости в данном случае достигается за счёт более равномерного распределения в массе связующего частичек углерода, пропитанных жидким стеклом [27].

Основным недостатком данного направления решения проблемы выбиваемости стержней является сложность и высокая стоимость применяемого оборудования.

Четвёртое направление решения проблемы выбиваемости литейных стержней – применение так называемых порообразующих добавок. При этом образующиеся в стержне при

выгорании добавок пустоты могут быть заполнены газом под атмосферным или повышенным давлением. В первом случае улучшение выбиваемости происходит только за счёт ослабления поперечного сечения стержня, а во втором – разрушению стержневой смеси способствует оказываемое на неё давление со стороны газа, находящегося в порах. Классический пример порообразующих добавок – древесные опилки.

Весьма важной характеристикой является температура начала выгорания добавки. Необходимо, чтобы выгорание начиналось только после полного затвердевания отливки. Иначе преждевременное разупрочнение стержня может привести к искажению геометрической формы отливки, а повышенная газотворность смеси – к насыщению её поверхности газами.

В качестве примера можно рассмотреть жидкостекольную смесь с добавкой шламовых отходов химической очистки стальных изделий [28]. Это отходы нефтепродуктов, образующиеся при очистке стальных изделий от смазки при подготовке их к химической очистке. Они имеют следующий состав: масло консервационное марки К-17, солидол, уайт-спирит, дизельное топливо (соляр). При выгорании органической масляной добавки возникает газовое давление, которое разрушает плёнки жидкого стекла и улучшает выбиваемость смеси.

Добавка в жидкостекольную смесь раствора полистирола в толуоле улучшает выбиваемость смеси из-за разрушения геля ортокремневой кислоты за счёт выгорания полистирола [29].

К недостаткам применения порообразующих (выгорающих) добавок можно отнести возможность загрязнения поверхностного слоя отливки продуктами деструкции этих добавок, необходимость применения дополнительной вытяжной вентиляции для удаления образующихся газов из зоны заливки, сложность (а иногда и невозможность) применения из-за химического взаимодействия материала-порообразователя с компонентами стержневой смеси.

Пятым направлением решения проблемы выбиваемости стержней является применение специальных добавок – твёрдых веществ, значительно расширяющихся при высоких температурах. Механизм разупрочнения в данном случае основан на механическом разрушении стержня вследствие силового воздействия терморасширяющейся добавки. Ярким примером может служить добавка в жидкостекольную смесь вермикулярного графита – интеркалированного соединения графита [30]. При температурах заливки формы металлом происходит рез-

кое увеличение вермикулярного графита в объёме (в интервале температур 800–1300°C до 250 раз), при этом развиваются значительные усилия, которые нарушают сплошность силикатных плёнок связующего материала, что приводит к их разрушению (смесь разрыхляется). При этом интенсивное газовыделение отсутствует и газотворность смеси не увеличивается.

Недостатком применения терморасширяющихся веществ в качестве разупрочняющих добавок является недопустимость прокалики до высоких температур на этапе изготовления стержней, а также высокая стоимость добавок.

Заключение

Авторы статьи считают, что последние два из перечисленных направлений решения проблемы выбиваемости литейных стержней являются наиболее предпочтительными. Они позволяют вести поиск так называемой универсальной добавки, которую можно было бы применять для большинства известных процессов изготовления стержней, различных по своей химической природе.

Основные требования к универсальным разупрочняющим добавкам можно сформулировать следующим образом:

- разупрочняющее действие добавок должно начинаться только после полного затвердевания отливки;
- добавки не должны ухудшать эксплуатационные свойства стержня;
- добавки не должны обладать высокой гигроскопичностью;
- добавки должны быть инертными к компонентам большинства применяемых на практике смесей и стержневых красок;
- добавки не должны снижать качество поверхностного слоя получаемых отливок;
- добавки не должны препятствовать возможности изготовления стержней с применением тепловой сушки;
- добавки должны быть экологичными;
- добавки должны иметь невысокую стоимость.

Из перечисленных требований последнее может быть обеспечено за счёт использования в качестве разупрочняющих добавок отходов литейного и других производств. В плане экологичности лучшие результаты, вероятно, будут у терморасширяющихся веществ. И, конечно, нужно стремиться улучшать не только выбиваемость, но и одновременно с этим другие эксплуатационные свойства стержней, для чего необходимо осуществлять поиск комплексных добавок.

Список литературы

1. Сварика А.А. Формовочные материалы и смеси: справочник. К.: Техника, 1983. 144 с.
2. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия: справочник/ А.Н. Болдин, Н.И. Давыдов, С.С. Жуковский и др. М.: Машиностроение, 2006. 507 с.
3. А. с. 1369848 СССР, МКИ В 22 С 1/18. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / И.А. Микей, С.А. Флейтман, О.И. Смолькова, Р.И. Мирюк. Оpubл. 30.01.1988. Бюл. №4.
4. А. с. 130633 СССР, МКИ В 22 С 1/18. Смеси для изготовления литейных стержней / А.М. Лясс, И.Б. Куманин, И.В. Валисовский. Оpubл. 01.07.1960. Бюл. №15.
5. А. с. 1560356 СССР, МКИ В 22 С 1/02, 1/18. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / Л.Е. Рожкова, М.М. Антонов, Т.И. Печенникова, Л.Е. Желдакова, Ю.П. Скобелина, Г.Л. Гандыль. Оpubл. 30.04.1990. Бюл. №16.
6. А. с. 1659161 СССР, МКИ В 22 С 1/02, 1/18. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / Ю.Д. Кузьмин, В.Л. Ежов, Е.Ф. Сац, Л.П. Баербаш, Е.Е. Цивадиц, П.И. Зильберберг. Оpubл. 30.06.1991. Бюл. №24.
7. Patent 3203057 US. Process for making cores and molds, articles made thereby and binder compositions therefor / Charles R. Hunt, Denmark Road, Hall Stewart. Publication date 31.08.1965.
8. Patent 4233076 US. Novel sand/silicate compositions for foundry molds/cores / Jean-Pierre Blanc, Francois Meiller. Publication date 11.11.1980.
9. А. с. 172964 СССР, МПК В 22d. Связующее для форм и стержней литейного производства / С.И. Прозорин, Л.Г. Воскова, И.В. Обходов, Т.И. Пешкина, И.Д. Симкин, А.И. Кузякин, В.А. Соколова. Оpubл. 07.07.1965. Бюл. №14.
10. А. с. 814548 СССР, МКИ В 22 С 1/18. Связующее для формовочных и стержневых смесей / И.С. Сычев. Оpubл. 23.03.1981. Бюл. №11.
11. Patent 2059538A1 DE. Bewertete Kern- und Formsandgemische / Gist William David. Veröffentlichung 09.06.1971.
12. Patent 209992B1 CS. Formovací a jadrová chemicky tvrděná směs / Nováček Jaroslav, Turek Miroslav. Vydáno 15.02.1982.
13. А. с. 1260100 СССР, МКИ В 22 С 1/02, 1/18. Самоотверждающая смесь для изготовления литейных форм и стержней / С.П. Дорошенко, А.П. Макаревич, А.С. Кочешков, И.П. Борошенко. Оpubл. 30.09.1986. Бюл. №36.
14. А. с. 1678495 СССР, МКИ В 22 С 1/10, 1/18. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / В.Н. Иванов, А.И. Хацкевич, В.С. Олейник, В.А. Каширин. Оpubл. 23.09.1991. Бюл. №35.
15. А. с. 1662736 СССР, МКИ В 22 С 1/02, 1/18. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / И.Е. Илларионов, Н.В. Багрова, А.Р. Свешников, С.М. Емельянович, Г.П. Королев. Оpubл. 15.07.1991. Бюл. №26.
16. Проблема выбиваемости стержней при производстве отливок из Al-сплавов cold box amin-процессом / И.О. Леушин, А.В. Титов, К.А. Маслов, А.Ю. Субботин // Литейное производство. 2020. №6. С. 10–13.
17. А. с. 1380830 СССР, МКИ В 21 С 1/00, В 22 С 1/20. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / М.Г. Чернявская, И.В. Морозов, Е.К. Аверин. Оpubл. 15.03.1988. Бюл. №10.
18. А. с. 1770023 СССР, МКИ В 22 С 1/02, 1/18. Связующая композиция для формовочных и стержневых смесей / И.С. Сычев, В.А. Скаженник, В.Н. Киселев, В.И. Жморщук, А.А. Лимонова. Оpubл. 23.10.1992. Бюл. №39.
19. А. с. 1704899 СССР, МКИ В 22 С 1/02, 1/16. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / И.С. Сычев, В.А. Скаженник, А.А. Лимонова, В.И. Жморщук. Оpubл. 15.01.1992. Бюл. №2.
20. А. с. 1181774 СССР, МКИ В 22 С 1/02. Разупрочняющая добавка для жидкостекольных смесей / И.С. Сычев, К.И. Вишняков, В.А. Скаженник, А.А. Лимонова, Г.Д. Конюх. Оpubл. 30.09.1985. Бюл. №36.
21. Пат. 2298449 Российская Федерация, МПК В22С 1/18. Легковыбиваемая жидкостекольная смесь и способ ее приготовления / А.И. Евстигнеев, В.В. Петров, Э.А. Дмитриев, Е.А. Тютина; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». № 2005118912/02; заявл. 17.06.2005; опубл. 10.05.2007.
22. А. с. 1316741 СССР, МКИ В 22 С 1/00, 1/02. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / В.Г. Алешинский, Б.П. Беляков, В.И. Каплун, В.Н. Киселев, В.А. Скаженник, Д.Е. Фурман. Оpubл. 15.06.1987. Бюл. №22.
23. А. с. 1558551 СССР, МКИ В 22 С 1/02, 1/18. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / Л.В. Клемчук, В.Ф. Антипенко, Ю.Г. Акарцев, М.И. Тимохина, В.С. Конотопов, Н.И. Кузнецов, В.С. Шибаева. Оpubл. 23.04.1990. Бюл. №15.
24. А. с. 1547936 СССР, МКИ В 22 С 1/02, 1/18. Смесь для изготовления литейных форм и стержней. В.Г. Алешинский, Б.П. Беляков, В.И. Каплун, В.Н. Киселев, В.А. Скаженник, Д.Е. Фурман / Оpubл. 07.03.1990. Бюл. №9.

25. А. с. 1811955 СССР, МКИ В 22 С 1/02, 1/16. Холоднотвердеющая смесь для изготовления литейных форм и стержней / А.И. Белый, А.М. Богуславский, С.В. Межевых. Оpubл. 30.04.1993. Бюл. №16.
26. А. с. 1360876 СССР, МКИ В 22 С 5/04, 1/18. Способ приготовления связующего для литейных форм и стержней / Д.М. Кукуй, Ю.П. Ледян, А.Е. Иоде, В.Ф. Одинокко, С.И. Чигир, Б.Ф. Дудецкий. Оpubл. 23.12.1987. Бюл. №47.
27. А. с. 1673247 СССР, МКИ В 22 С 1/18, 5/04. Способ приготовления модифицированного жидкостекольного связующего для изготовления литейных форм и стержней / С.П. Мартюк, Ю.Е. Шамарин, А.Л. Садомский, Т.К. Степенко, А.М. Глазман. Оpubл. 30.08.1991. Бюл. №32.
28. А. с. 1685586 СССР, МКИ В 22 С 1/02, 1/18. Смесь для изготовления литейных форм / Б.С. Линецкий, В.С. Белогуз, Ю.В. Кудряшов, Л.Г. Ляликова, О.А. Ляхов, И.Э. Плечкин, В.С. Шарпаков, Ю.В. Мельник, Г.Б. Шамес. Оpubл. 23.10.1991. Бюл. №39.
29. Пат. 2292980 Российская Федерация, МПК В22С 1/16. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / В.И. Якимов, В.В. Петров, Э.А. Дмитриев, Б.Н. Марьин, В.П. Паниван, Ю.Л. Иванов, А.В. Якимов, В.В. Зелинский, Н.В. Сузько; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина». № 2004137563/02; заявл. 22.12.2004; опубл. 10.02.2007.
30. А. с. 1637934 СССР, МКИ В 22 С 1/02, 1/18. Смесь для изготовления литейных форм и стержней / В.И. Ковалев, Д.И. Милочкина, В.Д. Кассов, А.А. Кузнецов, А.Г. Турчанин. Оpubл. 30.03.1991. Бюл. №12.

References

1. Svarika A.A. *Formovochnye materialy i smesi: spravochnik* [Molding materials and mixtures: a reference book]. Kiev: Tekhnika, 1983, 144 p. (In Russ.)
2. Boldin A.N., Davydov N.I., Zhukovskiy S.S. et al. *Liteynye formovochnye materialy. Formovochnye, sterzhnevye smesi i pokrytiya: spravochnik* [Foundry molding materials. Molding, core mixtures and coatings: a reference book]. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 507 p. (In Russ.)
3. Mikey I.A., Fleytman S.A., Smolkova O.I., Miryuk R.I. *Smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Mixture for casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1369848, 1988.
4. Lyass A.M., Kumanin I.B., Valisovskiy I.V. *Smesi dlya izgotovleniya liteynykh sterzhney* [Casting core mixtures]. Author's certificate SU, no. 130633, 1960.
5. Rozhkova L.E., Antonov M.M., Pechennikova T.I., Zheldakova L.E., Skobelina Yu.P., Gandyl G.L. *Smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Mixture for manufacturing casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1560356, 1990.
6. Kuzmin Yu.D., Ezhov V.L., Sats E.F., Baerbash L.P., Tsivadits E.E., Zilberberg P.I. *Smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Mixture for manufacturing casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1659161, 1991.
7. Charles R. Hunt, Denmark Road, Hall Stewart. Process for making cores and molds, articles made thereby and binder compositions therefor. Patent US, no. 3203057, 1965.
8. Jean-Pierre Blanc, Francois Meiller. Novel sand/silicate compositions for foundry molds/cores. Patent US, no. 4233076, 1980.
9. Prozorin S.I., Voskova L.G., Obkhodov I.V., Peshkina T.I., Simkin I.D., Kuzyakin A.I., Sokolova V.A. *Svyazuyushchee dlya form i sterzhney liteynogo proizvodstva* [Binder for foundry molds and cores]. Author's certificate SU, no. 172964, 1965.
10. Sychev I.S. *Svyazuyushchee dlya formovochnykh i sterzhnevnykh smesey* [Binder for molding and core mixtures]. Author's certificate SU, no. 814548, 1981.
11. Gist William David. Improved core and molding sand mixtures. Patent DE, no. 2059538A1, 1971.
12. Novacek Jaroslav, Turek Miroslav. Sand and core chemically hardened mixture. Patent CS, no. 209992B1, 1982.
13. Doroshenko S.P., Makarevich A.P., Kocheshkov A.S., Borodenko I.P. *Samotverdeyushchaya smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Self-hardening mixture for making molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1260100, 1986.
14. Ivanov V.N., Khatskevich A.I., Oleynik V.S., Kashirin V.A. *Smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Mixture for casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1678495, 1991.
15. Illarionov I.E., Bagrova N.V., Sveshnikov A.R., Emelyanovich S.M., Korolev G.P. *Smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Mixture for casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1662736, 1991.
16. Leushin I.O., Titov A.V., Maslov K.A., Subbotin A.Yu. The problem of knocking-out ability of cores, when producing castings from aluminum alloys, using a cold-box-amin process. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry], 2020, no. 6, pp. 10–13. (In Russ.)
17. Chernyavskaya M.G., Morozov I.V., Averin E.K. *Smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Mixture for casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1380830, 1988.
18. Sychev I.S., Skazhennik V.A., Kiselev V.N., Zhmorshchuk V.I., Limonova A.A. *Svyazuyushchaya kompozitsiya dlya formovochnykh i sterzhnevnykh smesey* [A binder composition for molding and core mixtures]. Author's certificate SU, no. 1770023, 1992.
19. Sychev I.S., Skazhennik V.A., Limonova A.A., Zhmorshchuk V.I. *Smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Mixture for casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1704899, 1992.
20. Sychev I.S., Vishnyakov K.I., Skazhennik V.A., Limonova A.A., Konyukh G.D. *Razuprochnyayushchaya dobavka*

- dlya zhidkostekolnykh smesey* [A softening additive for liquid glass mixtures]. Author's certificate SU, no. 1181774, 1985.
21. Evstigneev A.I., Petrov V.V., Dmitriev E.A., Tyutina E.A. *Legkovybivaemaya zhidkostekolnaya smes i sposob ee prigotovleniya* [Easily removable liquid glass mixture and method for its preparation]. Patent RF, no. 2298449, 2007.
 22. Aleshinskiy V.G., Belyakov B.P., Kaplun V.I., Kiselev V.N., Skazhennik V.A., Furman D.E. *Smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Mixture for casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1316741, 1987.
 23. Klemchuk L.V., Antipenko V.F., Akartsev Yu.G., Timokhina M.I., Konotopov V.S., Kuznetsov N.I., Shibaeva V.S. *Smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Mixture for casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1558551, 1990.
 24. Aleshinskiy V.G., Belyakov B.P., Kaplun V.I., Kiselev V.N., Skazhennik V.A., Furman D.E. *Smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Mixture for casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1547936, 1990.
 25. Belyi A.I., Boguslavskiy A.M., Mezhevykh S.V. *Kholodnotverdeyushchaya smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Cold-setting mixture for manufacturing casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1811955, 1993.
 26. Kukuy D.M., Ledyan Yu.P., Iode A.E., Odinochko V.F., Chigir S.I., Dudetskiy B.F. *Sposob prigotovleniya svyazuyushchego dlya liteynykh form i sterzhney* [A method of preparing a binder for casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1360876, 1987.
 27. Martyuk S.P., Shamarin Yu.E., Sandomskiy A.L., Stetsenko T.K., Glazman A.M. *Sposob prigotovleniya modifitsirovannogo zhidkostekolnogo svyazuyushchego dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [A method of preparing a modified liquid glass binder for manufacturing casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1673247, 1991.
 28. Linetskiy B.S., Belogub V.S., Kudryashov Yu.V., Lyalikova L.G., Lyakhov O.A., Plechkin I.E., Sharpakov V.S., Melnik Yu.V., Shames G.B. *Smes dlya izgotovleniya liteynykh form* [Mixture for manufacturing casting molds]. Author's certificate SU, no. 1685586, 1991.
 29. Yakimov V.I., Petrov V.V., Dmitriev E.A., Marin B.N., Panivan V.P., Ivanov Yu.L., Yakimov A.V., Zelinskiy V.V., Suzko N.V. *Smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Mixture for manufacturing casting molds and cores]. Patent RF, no. 2292980, 2007.
 30. Kovalev V.I., Milochkina D.I., Kassov V.D., Kuznetsov A.A., Turchanin A.G. *Smes dlya izgotovleniya liteynykh form i sterzhney* [Mixture for casting molds and cores]. Author's certificate SU, no. 1637934, 1991.

Поступила 24.07.2020; принята к публикации 25.08.2020; опубликована 25.09.2020
Submitted 24/07/2020; revised 25/08/2020; published 25/09/2020

Леушин Игорь Олегович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Металлургические технологии и оборудование», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: igoleu@yandex.ru

Кошелев Олег Сергеевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Машиностроительные технологические комплексы», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: mto@nntu.ru

Маслов Константин Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Металлургические технологии и оборудование», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: mto@nntu.ru

Титов Андрей Вячеславович – ст. преп. кафедры «Металлургические технологии и оборудование», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: andavt95@rambler.ru

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

Oleg S. Koshelev – DrSc (Eng.), Professor, Department of Mechanical Engineering Technological Complexes, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: mto@nntu.ru

Konstantin A. Maslov – PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Metallurgical Technologies and Equipment, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: mto@nntu.ru

Andrey V. Titov – Senior Lecturer, Department of Metallurgical Technologies and Equipment, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: andavt95@rambler.ru

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

MATERIAL PROCESS ENGINEERING

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

УДК 621.77

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-34-41



ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ШТОКА ГИДРОЦИЛИНДРА АДДИТИВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

Радионова Л.В., Самодурова М.Н., Быков В.А., Глебов Л.А., Брык А.В.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В данной работе приведены результаты исследования упрочняющей поверхностной обработки штока гидроцилиндра методами аддитивных технологий. Рассмотрены три метода упрочняющей обработки поверхностного рабочего слоя: поверхностная закалка лазером, детонационное напыление и лазерная наплавка порошкового сплава. Поверхностная термическая обработка не позволила получить требуемую твердость, что связано с недостаточной скоростью охлаждения, которая достигается при охлаждении металла на воздухе. Детонационное напыление обеспечило получение упрочненного слоя толщиной около 0,25 мм и твердостью более 61 HRC. Лазерная наплавка порошкового материала Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V на рабочую поверхность штока позволила получить функциональный поверхностный слой с твердостью 52–54 HRC толщиной более 1,0 мм, который при необходимости можно существенно увеличить. Этот метод упрочнения показал перспективность применения не только для повышения износостойкости рабочей поверхности, но и для восстановления геометрических размеров изношенных в процессе эксплуатации деталей.

Ключевые слова: аддитивные технологии, лазерная наплавка, шток гидроцилиндра, детонационное напыление, прямое лазерное сплавление.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (фундаментальное научное исследование), договор № FENU-2020-0020 (2020071ГЗ).

© Радионова Л.В., Самодурова М.Н., Быков В.А., Глебов Л.А., Брык А.В., 2020

Для цитирования

Повышение эксплуатационных свойств поверхности штока гидроцилиндра аддитивными технологиями / Радионова Л.В., Самодурова М.Н., Быков В.А., Глебов Л.А., Брык А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 34–41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-34-41>



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

IMPROVING THE SURFACE PERFORMANCE PROPERTIES OF HYDRAULIC CYLINDER ROD BY APPLYING ADDITIVE TECHNOLOGIES

Radionova L.V., Samodurova M.N., Bykov V.A., Glebov L.A., Bryk A.V.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. This paper presents the results of studies on a hydraulic cylinder rod hardening surface treatment using additive technologies. The authors analyzed three surface working layer hardening processing methods: surface hardening by a laser, detonation spraying, and laser cladding of a powder alloy. Surface heat treatment did not contribute to achieving the required hardness; the reason is an insufficient cooling rate, which is achieved by cooling the metal in air. Detonation spraying provided a hardened layer with a height of about 0.25 mm and a hardness of over 61 HRC. Laser cladding of the Fe-4.5Cr-4.5Mo-5.5W-4V powder material on the rod working surface allowed us to obtain a functional surface layer with a hardness of 52–54 HRC and a height of over 1.0 mm, which could be significantly increased, if necessary. This hardening method showed the potential application not only to increase the working surface wear resistance, but also to restore the geometry of parts worn during their operation.

Keywords: additive technologies, laser cladding, hydraulic cylinder rod, detonation spraying, direct laser fusion.

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the grant for fulfilling the state task (basic scientific research), Contract No. FENU-2020-0020 (2020071GZ).

For citation

Radionova L.V., Samodurova M.N., Bykov V.A., Glebov L.A., Bryk A.V. Improving the Surface Performance Properties of Hydraulic Cylinder Rod by Applying Additive Technologies. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 34–41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-34-41>

Введение

Гидроцилиндр (гидравлический цилиндр) представляет собой гидродвигатель с возвратно-поступательным принципом работы. Простота и компактные размеры конструкции гидравлических цилиндров, а также разнообразие их моделей позволяют применять гидроцилиндры во многих сферах промышленности и строительства [1]. В металлургии гидроцилиндры применяются в механизмах печей, заслонок, прокатных станов, металлообрабатывающих станках, транспортирующих устройствах и т.д. [2]. Металлургическое оборудование постоянно подвергается воздействию тяжелых эксплуатационных условий, что, конечно, сказывается на работе гидравлических цилиндров. Эти сложные условия включают высокую и низкую температуры, пыль, ударные нагрузки. Номенклатура гидроцилиндров (рис. 1), применяемых в металлургической промышленности, обширна [3]. Основной рабочей деталью гидроцилиндра является шток (рис. 2), диаметр которого может быть от 40 до 1200 мм. В процессе работы он испытывает не только давление со стороны поднимаемого груза, но и износ в результате трения о другие детали, насаженные на него. Поэтому для повышения эксплуатационных свойств гидроци-

линдра применяется упрочняющая обработка поверхности штока до твердости 48–50 HRC [4]. На сегодняшний день достаточно широко для этого используется закалка ТВЧ, нанесение защитных покрытий (никелирование, хромирование) [5–7]. Однако появление технологий и распространение оборудования для нанесения функциональных покрытий аддитивными методами ставит вопрос о возможности и целесообразности их применения при разработке ответственных деталей металлургического оборудования, а также для восстановления изношенных.

Целью настоящей работы является получение и исследование функционального поверхностного слоя штока гидроцилиндра аддитивными технологиями.

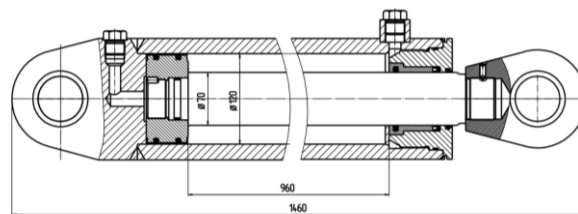


Рис. 1. Общий вид типового поршневого гидроцилиндра

Fig. 1. Overview of a typical piston hydraulic cylinder



Рис. 2. Трехмерная модель штока
Fig. 2. 3D model of the rod

Экспериментальные исследования

Работы по получению функционального поверхностного слоя штока проводились в лаборатории механики, лазерных процессов и цифровых производственных технологий ЮУрГУ. Комплекс КЛС на базе LaserClad 4 C R120, оснащенный иттербиевым волоконным лазером ЛС-4 и промышленным робот-манипулятором KUKA KR-120, предназначен для реализации технологий прямого лазерного сплавления из порошковых и проволоочных материалов, а также позволяет осуществлять поверхностную термическую обработку (рис. 3) [8–10].



Рис. 3. Робот-манипулятор KUKA KR-120
Fig. 3. Robotic manipulator KUKA KR-120

Детонационный комплекс CCDS2000 (рис. 4) основан на технологии нанесения покрытий, в которой для разогрева и разгона порошкообразного материала используется энергия газового взрыва [11–14].

Для изготовления штока могут быть использованы следующие марки стали: 40Х, 30ХГСА,

12Х18Н10Т, 42CrMo4 [15]. Поэтому для разработки технологии упрочняющей обработки в качестве исследуемого материала была выбрана сталь 40ХН с исходной ферритно-пелитной структурой (рис. 5) и твердостью 20 HRC. Поверхность образцов (подложки) перед нанесением упрочняющего слоя подверглась зачистке в абразивоструйной кабине.



Рис. 4. Детонационный комплекс CCDS2000
Fig. 4. Detonation complex CCDS2000

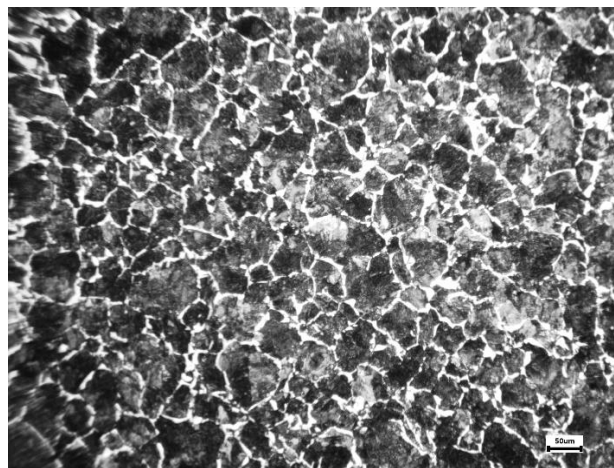


Рис. 5. Микроструктура заготовки из стали марки 40ХН (x100)

Fig. 5. Microstructure of the 40KhN steel sample (x100)

Для получения функционального поверхностного слоя было рассмотрено четыре метода упрочнения поверхности: поверхностная закалка лазером (вариант №1), детонационное напыление (вариант №2), лазерная наплавка порошкового материала (вариант №3).

Для детонационного напыления был выбран порошок компании Castoline под номером 55586С (WC-10Co-4Cr). Порошок на основе карбида вольфрама (WC-10Co-4Cr) применяется для защиты от износа и коррозии при температуре ниже 480°C. Для прямого лазерного сплавления

порошок EuTroLoy® 16606 (Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V). Порошок Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V обладает отличной износостойкостью при работе до 500°C.

Для исследования микроструктуры и определения микротвердости изготавливались металлографические шлифы. Травление образцов осуществлялось 3% раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Эксплуатационные свойства поверхностного слоя оценивались посредством измерения твердости. Определение микротвердости осуществлялось с помощью стационарного твердомера HV-1000.

Вариант №1. Поверхностная закалка лазером.

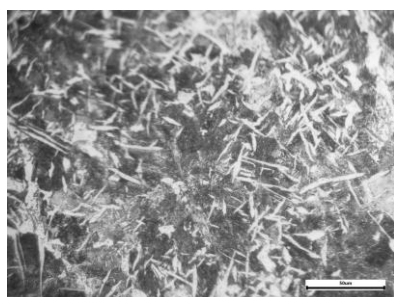
Поверхностную лазерную закалку осуществляли по режимам, указанным в табл. 1. Схема движения лазера и натурный образец приведены на рис. 6. Микроструктура термически обработанного слоя приведена на рис. 7. Закалка во всех режимах проводилась с последующим охлаждением на воздухе. Поскольку скорость охлаждения на воздухе ниже, чем в масле и ещё ниже, чем в воде, то твердость, полученная после такой закалки, не превышает 30 HRC (табл. 2). Для рабочего слоя штока гидроцилиндра такая твердость не допустима.

Таблица 1. Технологические режимы при поверхностной лазерной закалке
Table 1. Technological modes for surface laser hardening

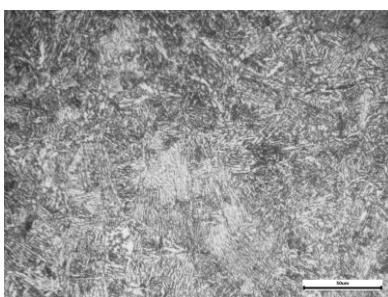
Режим закалки	Скорость перемещения лазера, мм/мин	Шаг, мм	Мощность лазера, Вт	Положение каллибратора	Фокусное расстояние, мм
1	12	4	2600	+5	175
2	14		2200		
3	16		2200		

Таблица 2. Результаты измерения твердости после поверхностной закалки
Table 2. Measurement results of hardness after surface hardening

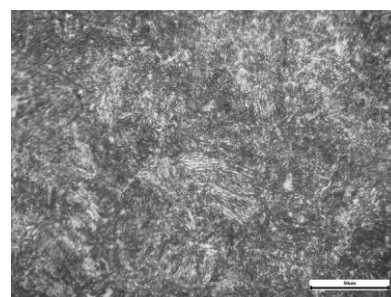
Режим закалки	Значение твердости по Роквеллу, HRC					
	1	2	3	4	5	Среднее
1	21,5	23	21,5	30	29	24
2	22	22,5	24,5	26	26	23
3	33	30	29	31	28	30



а



б



в

Рис. 7. Микроструктура после поверхностной лазерной закалки: а – режим № 1; б – режим № 2; в – режим № 3
Fig. 7. Microstructure after surface laser hardening: a is mode No. 1; б is mode No. 2; в is mode No. 3

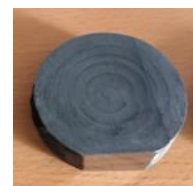
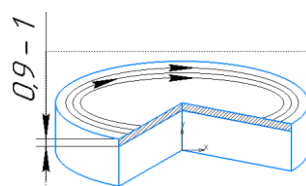


Рис. 6. Образец после поверхностной лазерной закалки
Fig. 6. The sample after surface laser hardening

Вариант №2. Детонационное напыление

При упрочнении детонационным методом с последующим проплавлением на подложку было сделано 35 выстрелов порошком на основе карбида вольфрама WC-10Co-4Cr. Полученное покрытие было равномерным. Металлографическое исследование показало, что толщина покрытия составляет около 0,25 мм (рис. 8), трещины в покрытии отсутствуют. Пористость покрытия не превышает 1%. Зона сцепления покрытия с основным металлом приведена на рис. 8, б. Эксплуатационные свойства поверхностного слоя оценивались через твердость. Результаты замера и перевод полученных значений в единицы HRC приведены в табл. 3. Среднее значение твердости составляет 764 HV или 62 HRC. Термическое воздействие на микроструктуру основного металла отсутствует.

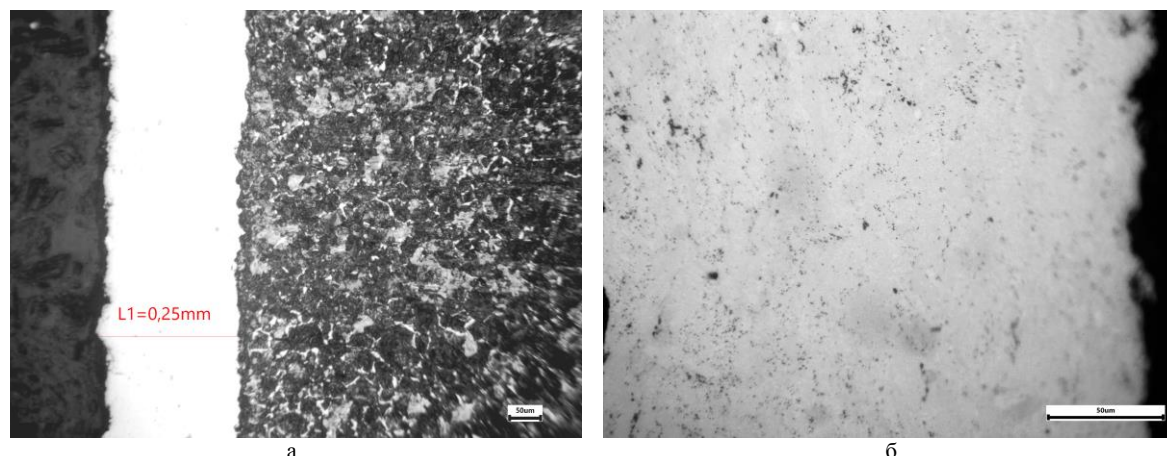


Рис. 8. Микроструктура детонационно напыленного слоя: а – $\times 100$; б – $\times 500$
Fig. 8. Microstructure of the detonation sprayed layer: а is ($\times 100$); б is ($\times 500$)

Таблица 3. Результаты измерения твердости поверхностного слоя, полученного детонационным напылением
Table 3. Measurement results of surface layer hardness obtained by detonation spraying

Единицы измерения	Значение твердости					
	1	2	3	4	5	Среднее
HV	840	730	760	760	730	764
HRC	65	61	62	62	61	62

Вариант №3. Лазерная наплавка порошкового материала

Для третьего метода упрочнения использовалось прямое лазерное сплавление порошкового материала. На подложку наплавлялся металлический порошок Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V с помощью отработанного ранее [5] режима (табл. 4).

Результаты металлографических исследований полученного слоя показали, что в структуре отсутствуют трещины и микротрещины, а также пористость наплавленного слоя не превышает 3%. Толщина наплавленного слоя находится в пределах 1,00 мм (рис. 9, а). При необходимости толщину наплавленного слоя можно увеличи-

вать, так как технологических препятствий для этого нет. Микроструктура наплавленного слоя приведена на рис. 9, б.

Под наплавленным слоем образуется слой основного материала стали марки 40ХН, подвергнутый термическому воздействию в ходе наплавки. Микроструктура этого участка приведена на рис. 9, в, г. Толщина зоны термического влияния составляет более 1 мм. При этом под наплавленным слоем образуется мартенситная зона толщиной около 0,5 мм. Следовательно, упрочненный слой в общей сложности составляет более 1,5 мм. Результаты измерения твердости наплавленного слоя приведены в табл. 5.

Таблица 4. Режим наплавки порошкового сплава Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V
Table 4. Surfacing mode of Fe-4.5Cr-4.5Mo-5.5W-4V powder alloy

Скорость наплавки, мм/мин	Шаг, мм	Мощность лазера, Вт	Подача порошка, %	Положение каллибратора	Фокусное расстояние, мм
12	1,4	1200	12	0	43

Таблица 5. Результаты измерения твердости поверхностного слоя, полученного лазерной наплавкой порошкового сплава Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V

Table 5. Measurement results of surface layer hardness obtained by laser cladding of Fe-4.5Cr-4.5Mo-5.5W-4V powder alloy

Единицы измерения	Значение твердости					
	1	2	3	4	5	Среднее
HV	580	560	560	560	560	564
HRC	54	52	52	52	52	52

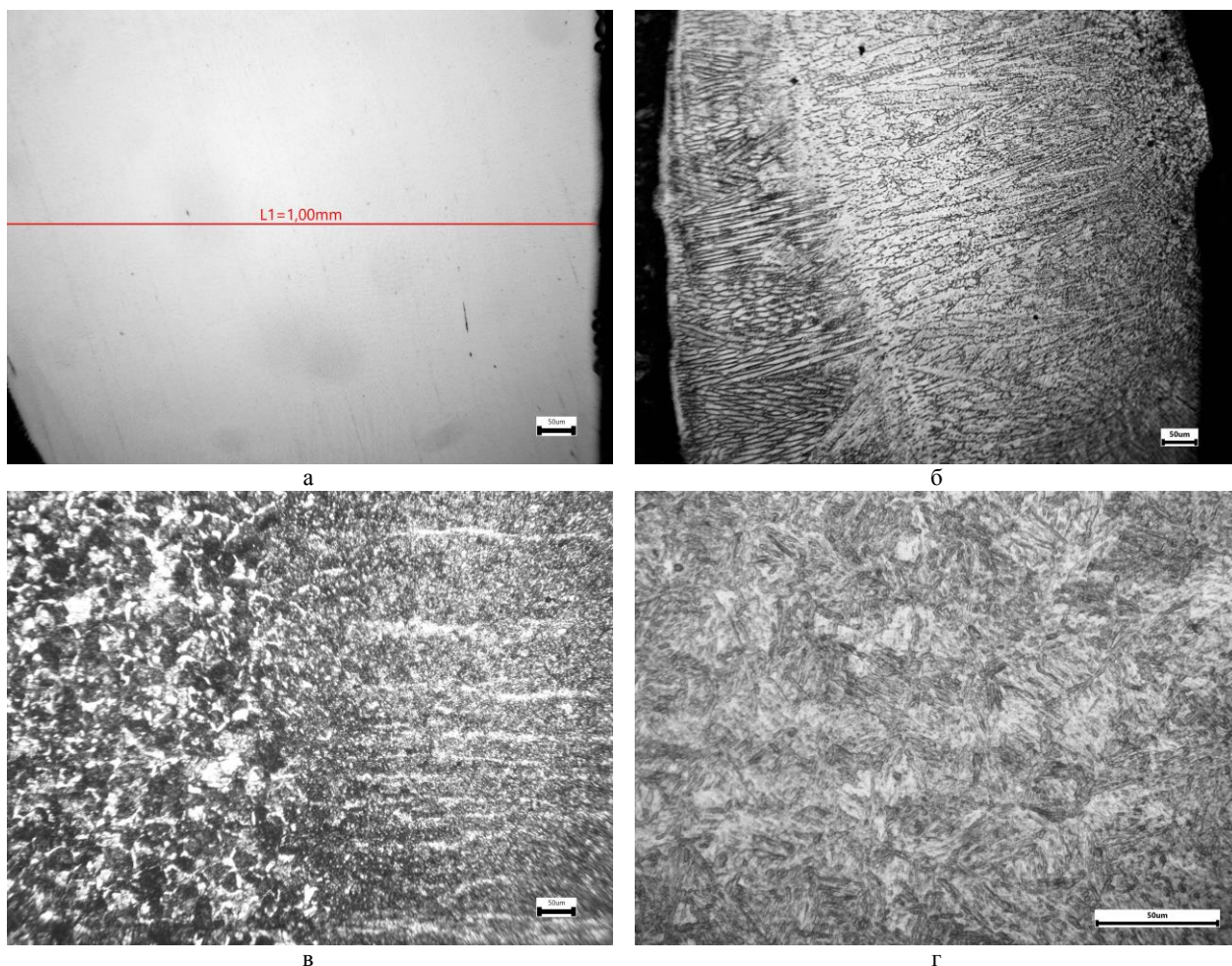


Рис. 9. Микроструктура наплавленного порошковым слоем: а – наплавленный слой до травления (x100); б – наплавленный слой после травления (x100); в – зона термического влияния (x100); г – зона термического влияния (x500)

Fig. 9. Microstructure of the powder surfaced layer: а is a surfaced layer before etching (x100); б is a surfaced layer after etching (x100); в is a heat-affected zone (x100); г is a heat-affected zone (x500)

Закключение

В работе исследованы три метода упрочнения поверхностного слоя штока гидроцилиндра аддитивными технологиями.

Твёрдость при поверхностной закалке лазером по трем разным режимам составила от 23 до 30 HRC. Это гораздо меньше, чем требуется для рабочей поверхности штока, поэтому данный способ упрочнения гидроцилиндра при рассмотренных технологических условиях на практике применяться не может. Причиной пониженной твердости является низкая скорость охлаждения, не обеспечивающая получения мартенситной структуры необходимой морфологии.

Твёрдость при детонационном напылении порошкового сплава WC-10Co-4Cr оказалась довольно высокой и составила 62 HRC. Это очень перспективный способ упрочнения рабо-

чей поверхности таких высоконагруженных деталей металлургического оборудования, как шток гидравлического цилиндра.

При лазерной порошковой наплавке сплавом Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V значения твёрдости получены в пределах 52-54 HRC. Это выше требуемого нормативно-технической документацией значения – 48–50 HRC. Пористость при этом не превышает 3%, трещины и микротрещины отсутствуют. Толщина наплавленного слоя составила около 1 мм, которую при необходимости можно значительно увеличить. Следовательно, данный способ применим не только для упрочнения поверхности, но и может быть использован для восстановления размеров изношенных деталей металлургического оборудования с высокими требованиями к износостойкости рабочей поверхности.

Список литературы

1. Ивановский Ю.К., Моргунов К.П. Основы теории гидропривода. Санкт-Петербург: Лань, 2018. 200 с. ISBN 978-5-8114-2955-4. Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/102590> (дата обращения: 11.07.2020). Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Марутов В.А., Павловский С.А. Гидроцилиндры: Конструкции и расчет. М.: Книга по Требованию, 2012. 172 с.
3. Пневматические и гидравлические цилиндры [Электронный ресурс]: Уральский инжиниринговый центр: официальный интернет-сайт. URL: <http://www.cheltec.ru/> (дата обращения: 09.04.2020)
4. Новроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов: учеб. для студентов вузов по спец. «Гидравлические машины, гидроприводы и гидроавтоматика». М.: Машиностроение, 1991. 384 с.
5. Богодухов С.И., Козик Е.С., Лобода С.А. Повышение эксплуатационных свойств штоков плунжерных насосов с использованием токов высокой частоты // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 6. С. 36–39.
6. Токарева И.А., Шалимов Ю.Н. Особенности технологических процессов хромирования из электролитов на основе низковалентных соединений хрома // Технология машиностроения. 2014. №1. С. 35–41.
7. Композиционные электрохимические покрытия на основе никеля / Р. Е. Фомина [и др.] // Вестник Казан. технолог. ун-та. 2018. Т. 21, № 2. С. 70–73.
8. Быков В.А., Радионова Л.В., Самодурова М.Н. Восстановление изношенной поверхности шеек прокатных валков методом прямого лазерного сплавления // MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2019: Материалы IV международной молодежной научно-практической конференции / под ред. А.Г. Корчунова. Магнитогорск, 2019. С. 120–122.
9. Samodurova M., Radionova L., Zakirov R. A study of the structural characteristics of titanium alloy products manufactured using additive technologies by combining the selective laser melting and direct metal deposition methods // Materials. 2019. Vol. 12. № 19. <https://doi.org/10.3390/ma12193269>
10. Samodurova M., Radionova L., Zakirov R. A Study of Characteristics of Aluminum Bronze Coatings Applied to Steel Using Additive Technologies // Materials. 2020. Vol. 13. № 461. doi.org/10.3390/ma13020461
11. Быков В.А., Радионова Л.В., Самодурова М.Н. Восстановление плунжерной пары путем детонационного напыления функционального покрытия // Материалы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов: сборник докладов. 2020. С. 200–203.
12. Борисов Ю.С., Петров С.В. Использование сверхзвуковых струй в технологии газотермического напыления // Автомат. сварка. 1995. № 1. С. 41–44.
13. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко и др. Киев: Наук. думка, 1987. 544 с.
14. Chivavibul P., Watanabe M., Kuroda S. Development of WC–Co Coatings Deposited by Warm Spray Process // J. of Thermal Spray Technology. 2008. V. 17, Iss. 5–6. P. 750–756.
15. Плесовских А.Ю., Крылова С.Е., Оплеснин С.П. Импортзамещающая технология изготовления деталей нефтегазодобывающей отрасли с нанесением износостойких покрытий на основе вольфрама // Вестник современных технологий. 2019. № 2 (14). С. 9–14.

References

1. Ivanovskiy Yu.K., Morgunov K.P. Fundamentals of the hydraulic drive theory. St. Petersburg: Lan, 2018, 200 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/102590> (Accessed July 11, 2020).
2. Marutov V.A., Pavlovskiy S.A. *Gidrotsilindry: Konstruktsii i raschet* [Hydraulic cylinders: designs and calculations]. Moscow: Book on Request, 2012, 172 p. (In Russ.)
3. Pneumatic and hydraulic cylinders. Ural Engineering Center: the official website. Available at: <http://www.cheltec.ru> (Accessed April 9, 2020).
4. Novrotsky K.L. *Teoriya i proektirovanie gidro- i pnevmoprivodov: ucheb. dlya studentov vuzov po spets. "Gidravlicheskie mashiny, gidroprivody i gidroavtomatika"* [Theory and design of hydraulic and pneumatic drives: textbook for university students majoring in "Hydraulic machines, hydraulic drives and hydraulic automation"]. Moscow: Mechanical Engineering, 1991, 384 p. (In Russ.)
5. Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Loboda S.A. Improving the performance of plunger pump rods using high frequency currents. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank Production in Mechanical Engineering], 2014, no. 6, pp. 36–39. (In Russ.)
6. Tokareva I.A., Shalimov Yu.N. Special features of chromium plating technological processes from electrolytes based on low-valent chromium compounds. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Engineering Technology], 2014, no. 1, pp. 35–41 (In Russ.)
7. Fomina R.E., et al. Nickel-based composite electrochemical coatings. *Vestnik Kazan. tekhnolog. un-ta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2018, vol. 21, no. 2, pp. 70–73. (In Russ.)
8. Bykov V.A., Radionova L.V., Samodurova M.N. Restoration of the worn surface of roll necks by direct laser fusion. *MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2019: Materialy IV mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-*

- prakticheskoy konferentsii* [MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2019: Proceedings of the 4th International Youth Scientific-Practical Conference]. Ed. by A.G. Korchunov. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2019, vol. 1, pp. 120–122. (In Russ.)
9. Samodurova M., Radionova L., Zakirov R. A study of the structural characteristics of titanium alloy products manufactured using additive technologies by combining the selective laser melting and direct metal deposition methods. *Materialy* [Materials], 2019, vol. 12, no. 19. doi:10.3390/ma12193269
 10. Samodurova M., Radionova L., Zakirov R. A study of characteristics of aluminum bronze coatings applied to steel using additive technologies. *Materialy* [Materials], 2020, vol. 13, no. 461. doi:10.3390/ma13020461
 11. Bykov V.A., Radionova L.V., Samodurova M.N. Recovery of a plunger pair by a detonation spraying of a functional coating. *Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i studentov: sbornik dokladov* [Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students: Collection of Papers], 2020, pp. 200–203. (In Russ.)
 12. Borisov Yu.S., Petrov S.V. The use of supersonic jets in the thermal spraying technology. *Avtomat. svarka* [Automatic welding], 1995, no. 1, pp. 41–44. (In Russ.)
 13. Borisov Yu. S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L. et al. *Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovykh materialov: spravochnik* [Thermal Powder Coatings: A Handbook]. Kiev: Nauk. Dumka, 1987, 544 p. (In Russ.)
 14. Chivavibul P., Watanabe M., Kuroda S. Development of WC–Co coatings deposited by warm spray process. *J. of Thermal Spray Technology*, 2008, vol. 17, no. 5–6, pp. 750–756.
 15. Pleskovskikh A.Yu., Krylova S.E., Oplesnin S.P. Import-substituting technology for manufacturing parts of the oil and gas industry with the application of tungsten based wear-resistant coatings. *Vestnik sovremennykh tekhnologiy* [Bulletin of Modern Technologies], 2019, no. 2 (14), pp. 9–14. (In Russ.)

Поступила 19.07.2020; принята к публикации 04.09.2020; опубликована 25.09.2020
Submitted 19/07/2020; revised 04/09/2020; published 25/09/2020

Радионова Людмила Владимировна – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. Email: radionovalv@susu.ru. ORCID 0000-0001-9587-2925

Самодурова Марина Николаевна – д-р техн. наук, доцент кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, руководитель Ресурсного центра специальной металлургии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

Быков Виталий Алексеевич – студент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. Email: vitaliy.bykov.97@mail.ru. ORCID 0000-0002-1036-900X

Глебов Лев Александрович – студент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. Email: 79193293392@yandex.ru. ORCID 0000-0001-6484-1894

Брык Анастасия Владимировна – студент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. Email: 89193497818n@gmail.com. ORCID 0000-0003-2266-4599

Lyudmila V. Radionova – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Metal Forming Processes and Machines Department, South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia. Email: radionovalv@susu.ru. ORCID 0000-0001-9587-2925

Marina N. Samodurova – DrSc (Eng.), Associate Professor, the Metal Forming Processes and Machines Department, Head of the Special Metallurgy Resource Center, South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia. Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

Vitaliy A. Bykov – student, South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia. Email: vitaliy.bykov.97@mail.ru. ORCID 0000-0002-1036-900X

Lev A. Glebov – student, South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia. Email: 79193293392@yandex.ru. ORCID 0000-0001-6484-1894

Anastasia V. Bryk – student, South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia. Email: 89193497818n@gmail.com. ORCID 0000-0003-2266-4599

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

УДК 004.942.001.57

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-42-49



ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК КАДМИЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ СВИНЦА

Наврузов Х.П.¹, Ганиев И.Н.¹, Амонулло Х.², Эшов Б.Б.³, Муллоева Н.М.³

¹Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

²Таджикский технический университет им. М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан

³Государственное научное учреждение «Центр исследования инновационных технологий при Национальной академии наук Таджикистана», Душанбе, Таджикистан

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): Повсеместно свинец и его сплавы применяются в гидрометаллургии, аккумуляторном производстве, гальванотехнике и ряде других областей. Свинцовый анод, как легированный, так и нелегированный, является неоднородной системой, и на пространственно разграниченных участках протекают два основных процесса, это выделение кислорода и окисление свинца. Для увеличения стойкости свинцового анода необходимо максимально облегчить первый процесс и затормозить второй. Одним из путей увеличения стойкости свинцового анода является его легирование другими металлами. В настоящей работе в качестве легирующей добавки к свинцу использован кадмий до 0,5 мас.%. Электрохимические исследования свидетельствуют о положительном влиянии добавок кадмия на коррозионную устойчивость свинца. В литературе нет сведений о действии добавок кадмия на теплофизические свойства свинца. **Цель работы:** изучение влияния легирования свинца добавками кадмия и его влияние на теплофизические свойства свинца. **Используемые методы:** в работе исследования теплотемкости сплавов свинца с кадмием проведены в режиме «охлаждения» путем сравнения кривых охлаждения эталона (Pb марки C00) и исследуемых образцов. Расчёты проводились с применением компьютерной техники и программы «Sigma Plot». **Новизна:** впервые выполнены исследования влияния легирования свинца кадмием на теплофизические и термодинамические свойства сплавов. **Практическая значимость:** повышение теплотемкости и коэффициента теплоотдачи свинца при его легировании кадмием способствует улучшению качества работы электродов электролизных ванн и, в свою очередь, получаемой продукции.

Ключевые слова: свинец, кадмий, система Pb-Cd, теплоёмкость, коэффициент теплоотдачи, режим «охлаждения», термодинамические функции.

© Наврузов Х.П., Ганиев И.Н., Амонулло Х., Эшов Б.Б., Муллоева Н.М., 2020

Для цитирования

Влияние добавок кадмия на теплофизические свойства и термодинамические функции свинца / Наврузов Х.П., Ганиев И.Н., Амонулло Х., Эшов Б.Б., Муллоева Н.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 42–49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-42-49>



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

INFLUENCE OF CADMIUM ADDITIVES ON THERMAL PROPERTIES AND THERMODYNAMIC FUNCTIONS OF LEAD

Navruzov Kh.P.¹, Ganiev I.N.¹, Amonullo Kh.², Eshov B.B.³, Mulloeva N.M.³

¹Nikitin Institute of Chemistry, the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

²Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Tajikistan

³State Scientific Institution Center for Research of Innovative Technologies at the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

Abstract. Problem Statement (Relevance): Lead and its alloys are commonly used in hydrometallurgy, battery production, electroplating and a number of other areas. The lead anode, both alloyed and unalloyed one, is a heterogeneous system; in spatially delimited areas two main processes take place, namely oxygen evolution and lead oxidation. To increase the resistance of the lead anode, it is necessary to facilitate the first process to the maximum and slow down the second one. One of the methods aimed at increasing resistance of a lead anode is its alloying with other metals. In this research up to 0.5 wt% of cadmium was used as an alloying addition to lead. Electrochemical studies indicate a positive effect of cadmium additives on the corrosion resistance of lead. There is no information in the literature on the effect of cadmium additives on the thermal properties of lead. **Objective:** To study the effect of lead alloying with cadmium additives and its effect on the thermal properties of lead. **Methods Applied:** In the research the heat capacity of lead-cadmium alloys was studied in a "cooling" mode by comparing the cooling curves of the reference standard (Pb grade C00) and the samples under study. The calculations were carried out using computer technology and the Sigma Plot software. **Novelty:** For the first time, the effect of alloying of lead with cadmium on the thermal and thermodynamic properties of alloys. **Practical Relevance:** An increase in the heat capacity and heat transfer coefficient of lead, when alloyed with cadmium, helps to improve the performance quality of the electrodes of electrolysis baths and, consequently, the finished products.

Keywords: lead, cadmium, Pb-Cd system, heat capacity, heat transfer coefficient, "cooling" mode, thermodynamic functions.

For citation

Navruzov Kh.P., Ganiev I.N., Amonullo Kh., Eshov B.B., Mulloeva N.M. Influence of Cadmium Additives on Thermal Properties and Thermodynamic Functions of Lead. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 42–49. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-42-49>

Введение

Совершенствование электролиза направлено на использование новых методов, интенсификацию, автоматизацию и повышение технико-экономических показателей производства. В свою очередь, улучшение качества продуктов тесно связано с созданием новых анодных материалов, обладающих повышенной стойкостью и комплексом других технологических и электрохимических свойств [1, 2].

Проблема стойкости анода является одной из центральных в ряде электрохимических производств, в таких как извлечение цветных металлов из растворов, получение хлора, кислорода и водорода и отдельных продуктов неорганической и органической природы, а также в гальванотехнике, промышленности химических источников тока и т.д. [3, 4].

Существует мнение, согласно которому стойкость свинца при его легировании зависит напрямую от модифицирования или изменения

его структуры. Структурные образования фаз переменного или постоянного составов в сплавах вызывают существенные изменения их анодных свойств [3, 4].

В литературе сообщается о влиянии добавок кадмия на коррозионную устойчивость свинца в среде электролита NaCl. Отмечается, что наименьшей скоростью коррозии обладают сплавы с содержанием кадмия в пределах растворимости, что связано с структурными факторами [5, 6].

В литературе хорошо освещены действия добавок элементов второй группы на физико-химические свойства свинца [7, 8].

Для свинца как анодного материала существенное место отводится знаниям теплофизических свойств. Как известно, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи и термодинамические свойства являются важнейшими характеристиками сплавов и как конструкционных материалов, и в качестве материала анода. В литературе нет сведений о теплоемкости и термодинамиче-

ских свойствах сплавов свинца с кадмием. В связи с этим в настоящей работе поставлена цель исследовать температурную зависимость теплоемкости сплавов системы свинец-кадмий (до 0,5 мас.%) и по экспериментально определенным значениям теплоемкости рассчитать изменения термодинамических функций сплавов.

Теория метода и схема установки

Всякое тело, которое имеет температуру выше температуры окружающей среды, будет охлаждаться. При этом скорость охлаждения в основном зависит от значения теплоемкости тела. Если взять два металлических стержня (определенной формы), один из которых служит эталоном с известной удельной теплоемкостью, и сравнить их кривые охлаждения (термограммы), можно определить теплоемкость другого, зная скорость его охлаждения.

Количество теплоты металла объемом dV , теряемое за время dt , равно:

$$dQ = c m dt = c \rho dV dt \frac{1}{dt}, \quad (1)$$

где ρ – плотность металла; c – его удельная теплоемкость; T – температура образца (допускается одинаковой во всех точках образца, имея в виду, что теплоемкость металла большая, а линейные размеры тела малы).

Значение dQ по закону Ньютона

$$dQ = \alpha (T - T_0) dS dt, \quad (2)$$

где dS – участок поверхности; T_0 – температура внешней среды; α – коэффициент теплопередачи.

Приравняв формулы (1) и (2), получим:

$$dQ = c m dt = c \rho dV dt \frac{1}{dt} = \alpha (T - T_0) dS dt. \quad (3)$$

Количество теплоты, теряемое образцами:

$$Q = \int c \rho dV dt \frac{dT}{dt} = \int \alpha (T - T_0) dS dt.$$

Допуская, что dT/dt , c и ρ не зависят от координат точек объема, а α , T , T_0 от координат точек поверхности образца, можно записать:

$$c \rho dV dt \frac{dT}{dt} = \alpha (T - T_0) S dt. \quad (4)$$

где S – поверхность и V – объем образца.

Для двух образцов одинакового размера и формы после преобразований выражения (4) получим:

$$c_1 = c_2 \frac{m_2 \left(\frac{dT}{dt} \right)_2}{m_1 \left(\frac{dT}{dt} \right)_1}. \quad (5)$$

При этом допускается, что $V_1 = V_2$, $S_1 = S_2$, $T_1 = T_2$. В таком случае у них коэффициенты теплоотдачи будут равны ($\alpha_1 = \alpha_2$) и $m_1 = \rho_1 V_1$, $m_2 = \rho_2 V_2$ – соответственно массы первого и второго образцов.

Скорости охлаждения образцов определяются из их кривых охлаждений (термограммы). Термограммы представляют собой зависимость температуры от времени при охлаждении образца на воздухе.

Измерение теплоемкости проводилось по методике, описанной в работе [9]. Схема установки для измерения теплоемкости приведена на **рис. 1**. Электропечь 3 смонтирована на стойке 6, по которой она может перемещаться вверх и вниз (стрелкой показано направление перемещения). Образец 4 и эталон 5 (тоже могут перемещаться) представляют собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 16 мм с высверленными каналами с одного конца, в которые вставлены термодпары. Концы термодпар подведены к цифровому термометру 7 «Digital Multimeter DI9208L». Электропечь запускается через лабораторный автотрансформатор 1 (ЛАТР), установив нужную температуру с помощью терморегулятора 2. По показаниям цифровых термометров «Digital Multimeter DI9208L» фиксируется значение начальной температуры. Помещаем образец и эталон в электропечь и нагреваем до нужной температуры, контролируя температуру по показаниям цифровых термометров «Digital Multimeter DI9208L» на компьютере 8. Образец и эталон одновременно выдвигаем из электропечи и с этого момента фиксируем температуру. Записываем показания цифрового термометра «Digital Multimeter DI9208L» на компьютер через каждые 10 с, до охлаждения температуры образца и эталона.

Для измерения температуры использовали многоканальный цифровой термометр, который позволял прямо фиксировать результаты измерений на компьютере в виде таблиц. Точность измерения температуры составляла 0,1 С. Относительная ошибка измерения температуры в интервале от 40 до 400°C составляла $\pm 1\%$. Погрешность измерения теплоемкости по предлагаемой методике не превышает 4–6% в зависимости от температуры. Результаты измерений обрабатывались с помощью программы MS Excel, а графики строились с использованием программы Sigma Plot. Значения коэффициента корреляции $R_{\text{корр}} = 0,9989 \pm 1,00$ свидетельствуют о правильности выбора аппроксимирующей функции.

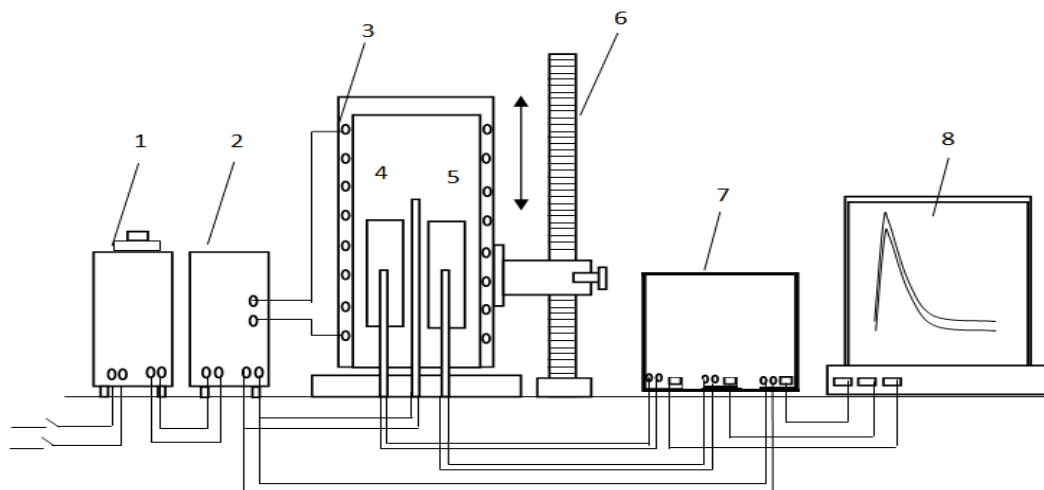


Рис. 1. Установка для определения теплоемкости твердых тел в режиме охлаждения
Fig. 1. The unit used to determine heat capacity of solids in a cooling mode

Результаты и их обсуждение

Полученные экспериментально кривые охлаждения образцов из сплавов системы Pb-Cd представлены на рис. 2, а.

Полученные зависимости температуры сплавов от времени с достаточной точностью описываются уравнением вида

$$T = ae^{-bt} + pe^{-kt}, \quad (6)$$

где a , b , p , k – постоянные константы для изучаемых образцов; t – время их охлаждения.

Дифференцируя (6) по t , имеем уравнение для определения скорости охлаждения (рис. 2, б) образцов из сплавов в виде зависимости

$$\frac{dT}{dt} = -abe^{-bt} - pke^{-kt}. \quad (7)$$

В табл. 1 представлены значения постоянных a , b , p , k , ab , pk в уравнении (7) для исследованных сплавов.

Для температурной зависимости удельной теплоемкости сплавов системы Pb-Cd получено общее уравнение типа

$$c = \alpha + bt + cT^2 + dT^3. \quad (8)$$

В табл. 2 обобщены значения коэффициентов в уравнении (8).

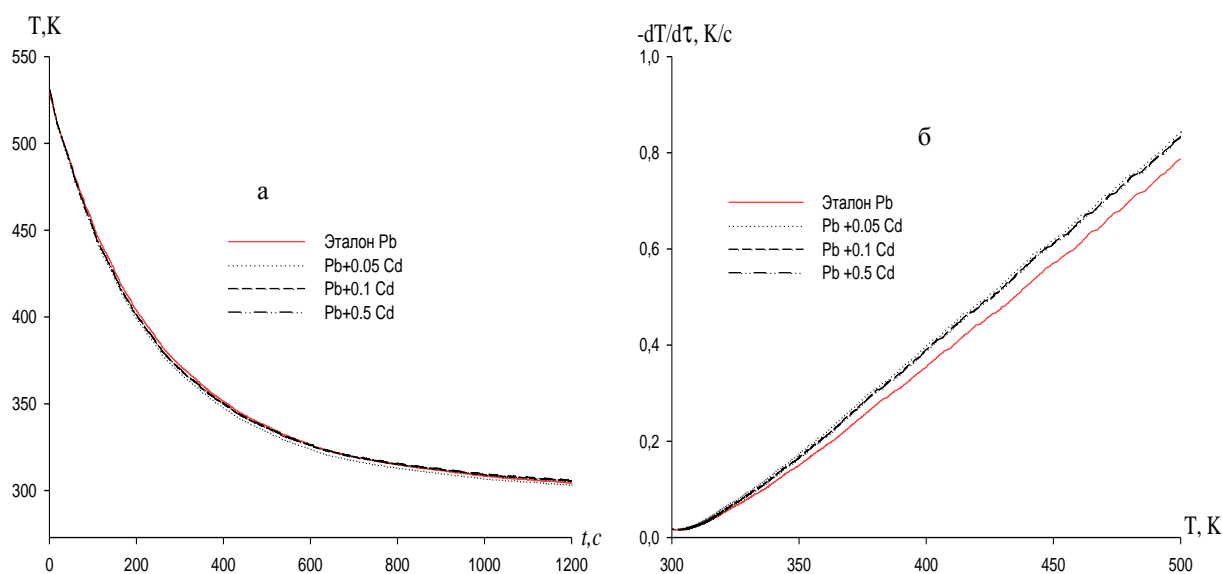


Рис. 2. Зависимость температуры от времени (а) и скорости (б) охлаждения образцов из сплавов системы Pb-Cd
Fig. 2. Relationship between temperature and time (a) and cooling rate (б) of the Pb-Cd alloy samples

Результаты расчета c по уравнениям (5) и (8) через 50 К представлены в табл. 3 и на рис. 3, а. Удельная теплоемкость сплавов от температуры и концентрации кадмия в свинце увеличивается.

Температурную зависимость коэффициента теплоотдачи сплавов системы Pb-Cd вычислили, используя экспериментально полученные значения скорости охлаждения образцов и их удельную теплоемкость, по уравнению

$$\alpha = \frac{cm \frac{dT}{d\tau}}{(T - T_0) \cdot S}, \quad (9)$$

где T_0 и T – температуры окружающей среды и образца; m , S – масса образца и площадь поверхности соответственно.

Температурная зависимость α для сплавов системы Pb-Cd представлена на рис. 3, б. Видно, что с ростом температуры и добавок кадмия в свинце α увеличивается.

Таблица 1. Значения постоянных a , b , p , k , ab , pk в уравнении (7) для сплавов системы Pb-Cd и эталона (Pb марки C00)
T a b l e 1. Values of constants a , b , p , k , ab , pk in equation (7) for Pb-Cd alloys and the reference standard (Pb grade C00)

Содержание кадмия в свинце, мас. %	a , К	b , $с^{-1}$	p , К	$k \cdot 10^{-5}$, $с^{-1}$	$a \cdot b$, $К \cdot с^{-1}$	$pk \cdot 10^{-2}$, $К \cdot с^{-1}$
Эталон	209,36	4,33	319,27	4,31	9,07	1,38
0,05Cd	207,28	4,60	320,12	4,75	9,54	1,52
0,1 Cd	207,29	4,60	322,12	4,72	9,54	1,52
0,5 Cd	207,30	4,60	322,52	4,71	9,54	1,52

Таблица 2. Значения коэффициентов уравнении (8) для сплавов системы Pb-Cd и эталона (Pb марки C00)
T a b l e 2. Coefficient values in equation (8) for Pb-Cd alloys and the reference standard (Pb grade C00)

Содержание кадмия в свинце, мас. %	a , $Дж/кг \cdot К$	b , $Дж/кг \cdot К^2$	$c \cdot 10^{-3}$, $Дж/кг \cdot К^3$	$d \cdot 10^{-6}$, $Дж/кг \cdot К^4$	Коэффициент корреляции R , %
Эталон	105,600	0,0940	-0,085	0,05	1,0
0,05Cd	-68,1776	1,3252	-2,90	2,19	0,9988
0,1 Cd	-69,5321	1,3347	-2,92	2,21	0,9989
0,5 Cd	-68,8769	1,3229	-2,87	2,16	0,9989

Таблица 3. Температурная зависимость c , кДж/(кг·К), сплавов системы Pb-Cd и эталона (Pb марки C00)
T a b l e 3. Temperature dependence c , kJ/(kg·K), of Pb-Cd alloys and the reference standard (Pb grade C00)

Содержание кадмия в свинце, мас. %	T , К				
	300	350	400	450	500
Эталон	127,50	130,23	132,80	135,24	137,60
0,05Cd	127,51	134,29	138,06	140,48	143,17
0,1 Cd	127,75	134,67	138,59	141,17	144,08
0,5 Cd	128,01	135,17	139,32	142,08	145,07

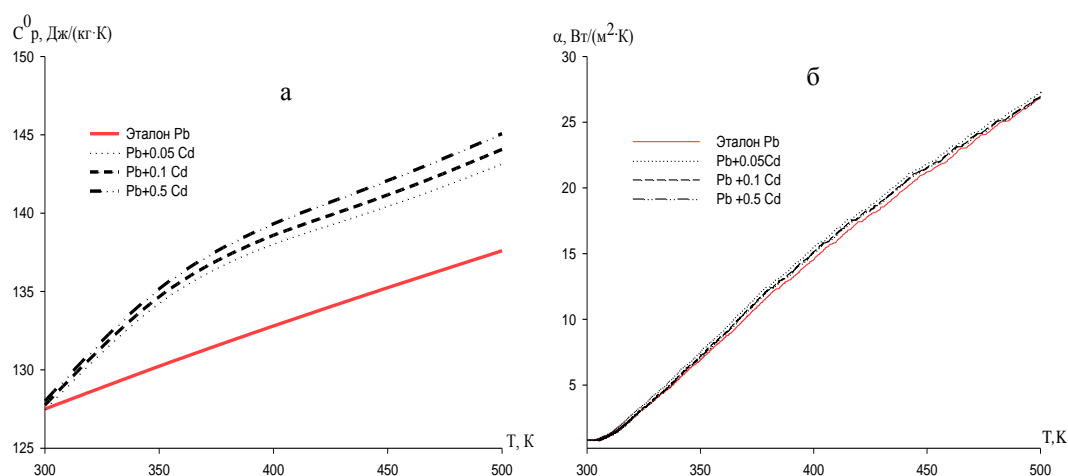


Рис. 3. Температурная зависимость c (а) и α (б) сплавов системы Pb-Cd
Fig. 3. Temperature dependence c (a) and α (b) of Pb-Cd alloys

Расчет температурной зависимости изменений энтальпии, энтропии и энергии Гиббса сплавов проводился с помощью интеграла от удельной теплоемкости по уравнениям:

$$[H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0)] = a(T - T_0) + \frac{b}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{c}{3}(T^3 - T_0^3) + \frac{d}{4}(T^4 - T_0^4); \quad (10)$$

$$[S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0)] = a \ln \frac{T}{T_0} + b(T - T_0) + \frac{c}{2}(T^2 - T_0^2) + \frac{d}{3}(T^3 - T_0^3); \quad (11)$$

$$[G^{\circ}(T) - G^{\circ}(T_0)] = [H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0)] - T[S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0)], \quad (12)$$

где $T_0 = 298,15$ К.

Результаты расчета температурных зависимостей изменений термодинамических функций сплавов системы Pb-Cd по уравнениям (10)–(12) через 50 К представлены в **табл. 4**.

Как известно, элементы-модификаторы структуры металлов тормозят их рост, адсорбируясь на зарождающихся кристаллах [10, 11]. Результатом этого является уменьшение поверхностной энергии вновь зарождающихся кристаллов, что, в свою очередь, способствует образованию сплава с высокодисперсной структурой.

Таблица 4. Зависимость изменений термодинамических функций сплавов системы Pb-Cd и эталона (Pb марки С00) от температуры

Table 4. Thermodynamic functions-temperature dependence of Pb-Cd alloys and the reference standard (Pb grade C00)

Содержание кадмия в свинце, мас. %	T, К				
	300	350	400	450	500
	$[H^{\circ}(T) - H^{\circ}(T_0^*)]$, кДж/кг, для сплавов				
Эталон	0,2358	6,6798	13,2562	19,9577	26,7791
0,05Cd	0,2356	6,7965	13,6144	20,5801	27,6667
0,1 Cd	0,2360	6,8123	13,6527	20,6488	27,7749
0,5 Cd	0,2365	6,8321	13,7036	20,7412	27,9158
	$[S^{\circ}(T) - S^{\circ}(T_0^*)]$, кДж/(кг·К), для сплавов				
Эталон	0,0008	0,0206	0,0382	0,0540	0,0684
0,05Cd	0,0008	0,0210	0,0392	0,0556	0,0705
0,1 Cd	0,0008	0,0210	0,0393	0,0558	0,0708
0,5 Cd	0,0008	0,0211	0,0395	0,0560	0,0711
	$[G^{\circ}(T) - G^{\circ}(T_0^*)]$, кДж/кг, для сплавов				
Эталон	-0,0007	-0,5477	-2,0275	-4,3391	-7,4033
0,05Cd	-0,0007	-0,5541	-2,0673	-4,4445	-7,6037
0,1 Cd	-0,0007	-0,5553	-2,0723	-4,4567	-7,6269
0,5 Cd	-0,0007	-0,5567	-2,0788	-4,4728	-7,6576

* $T_0 = 298,15$ К.

По величине обобщенного момента, который характеризует адсорбционную способность металлов в зависимости от эффективности радиуса иона и заряда, кадмий располагается после свинца ($Pb_{7,1}^{2+}$). Металлы, расположенные правее свинца, являются активными модификаторами [12]. С учётом этого следует заключить, что увеличение теплоемкости свинца при его легировании кадмием объясняется ростом степени гетерогенности структуры свинца. Диффузия в металлах быстрее происходит вдоль границ зерен, нежели в самих зёрнах. Наличие границ зерен влияет на такие свойства поликристаллов, как внутреннее трение, скольжение, тепловые и теплофизические свойства [13]. Таким образом, рост теплоемкости свинца легированием его кадмием

можно объяснить изменением зернистости микроструктуры сплава. Это подтверждают имеющиеся предпосылки о роли модифицирующих добавок в изменении физико-химических и механических свойств сплавов [10,11].

Выводы

1. В режиме «охлаждения» по известной теплоемкости эталонного образца из свинца марки С00 установлена температурная зависимость теплоемкости сплавов системы Pb-Cd.

2. Получены полиномы, описывающие температурную зависимость теплоемкости и изменений термодинамических функций (энтальпия, энтропия, энергия Гиббса) системы Pb-Cd в интервале температур 300–500 К.

3. С помощью полученных полиномиальных зависимостей показано, что с ростом температуры теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпия и энтропия сплавов увеличиваются, а значение энергии Гиббса уменьшается.

4. Установлено, что добавки кадмия в изученном концентрационном интервале (0,05–0,5 мас.%) увеличивает теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, энтальпию и энтропию свинца и уменьшает величину энергии Гиббса.

Список литературы

1. Taranjot K., Jeewan Sh., Tejbir S. Feasibility of Pb-Zn Binary Alloys as Gamma Rays Shielding Materials // International Journal of Pure and Applied Physics. 2017. Vol. 13. No 1. P. 222–225.
2. Chikova O.A., Sakun G.V., Tsepelev V.S. Formation of Cu-Pb alloys by means of liquid metal homogenization // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2016. Vol. 57. P. 580–585.
3. Asiful H.S., El-Sayed M.S., Sohail M.A., Khan M., Muneer B., Mohammad A.A., Nabeel A. Microstructure characterization and corrosion resistance properties of Pb-Sb alloys for lead acid battery spine produced by different casting methods // PLOS ONE 13(5): e0197227. 8 May 2018.
4. Osório W.R., Rosa D.M., Garcia A. Electrochemical behaviour of a Pb-Sb alloy in 0.5m NaCl and 0.5 MH₂SO₄ solutions // Materials & Design 2012. No. 34. P. 660–665.
5. Osório W.R., Freitas E.S., Peixoto L.C., Spinelli J.E., Garcia A. The effects of tertiary dendrite arm spacing and segregation on the corrosion behavior of a Pb-Sb alloy for lead-acid battery components // J. Power Sour. 2012. No. 207. P. 183–190.
6. Дунаев Ю.Д. Нерастворимые аноды из сплавов на основе свинца. Алма-Ата: Наука КазССР, 1978. 316 с.
7. Муллоева Н.М., Ганиев И.Н. Сплавы свинца с щелочноземельными металлами. Душанбе: Андалеб Р., 2015. 166 с.
8. Муллоева Н.М., Ганиев И.Н., Махмадуллоев Х. Теплофизические и термодинамические свойства сплавов свинца с ЩЗМ. Германия, Изд. дом LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 66 с.
9. Умаров М.А., Ганиев И.Н. Температурная зависимость теплоемкости и изменение термодинамических функций свинца марки С2 // Известия Самарского научного центра РАН. 2018. Т. 20. № 1. С. 23–29.
10. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.
11. Модифицирование силуминов стронцием / Ганиев И.Н., Пархутик П.А., Вахобов А.В., Куприянова И.Ю. Минск: Наука и техника, 1985. 152 с.
12. Брынцева В.И., Дунаев Ю.Д. Кинетика и механизм электрохимических реакций. Алма-Ата: Наука, 1977. 47 с.
13. Ван Бюрен. Дефекты в кристаллах. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 610 с.

References

1. Taranjot K., Jeewan Sh., Tejbir S. Feasibility of Pb-Zn binary alloys as gamma rays shielding materials. International Journal of Pure and Applied Physics, 2017, vol. 13, no 1, pp. 222–225.
2. Chikova O.A., Sakun G.V., Tsepelev V.S. Formation of Cu-Pb alloys by means of liquid metal homogenization. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2016, vol. 57, pp. 580–585.
3. Asiful H.S., El-Sayed M.S., Sohail M.A., Khan M., Muneer B., Mohammad A.A., Nabeel A. Microstructure characterization and corrosion resistance properties of Pb-Sb alloys for lead acid battery spine produced by different casting methods. PLOS ONE 13(5): e0197227. 8 May 2018.
4. Osório W.R., Rosa D.M., Garcia A. Electrochemical behaviour of a Pb-Sb alloy in 0.5m NaCl and 0.5 MH₂SO₄ solutions. Materials & Design, 2012, no. 34, pp. 660–665.
5. Osório W.R., Freitas E.S., Peixoto L.C., Spinelli J.E., Garcia A. The effects of tertiary dendrite arm spacing and segregation on the corrosion behavior of a Pb-Sb alloy for lead-acid battery components. J. Power Sour. 2012, no. 207, pp. 183–190.
6. Dunaev Yu.D. *Nerastvorimye anody iz splavov na osnove svintsa* [Insoluble lead alloy anodes]. Alma-Ata: Science, 1978, 316 p. (In Russ.)
7. Mulloeva N.M., Ganiev I.N. *Splavy svintsa s shchelochnozemelnymi metallami* [Alloys of lead with alkaline earth metals]. Dushanbe: Andaleb R., 2015, 166 p. (In Russ.)
8. Mulloeva N.M., Ganiev I.N., Makhmadulloev Kh. *Teplofizicheskie i termodinamicheskie svoystva splavov svintsa s shchelochnozemelnymi metallami* [Thermophysical and thermodynamic properties of lead alloys with alkaline earth metals]. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, 66 p. (In Russ.)
9. Umarov M.A., Ganiev I.N. Temperature dependence of heat capacity and changes in thermodynamic functions of C2 grade lead. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, vol. 20, no. 1, pp. 23–29. (In Russ.)
10. Maltsev M.V. *Modifitsirovanie struktury metallov i splavov* [Modification of the structure of metals and alloys]. Moscow: Metallurgy, 1984, 280 p. (In Russ.)
11. Ganiev I.N., Parkhutik P.A., Vakhobov A.V., Kupriyanova I.Yu. *Modifitsirovanie siluminov strontsiem* [Modification of silumins with strontium]. Minsk: Science and technology, 1985, 152 p. (In Russ.)
12. Bryntseva V.I., Dunaev Yu.D. *Kinetika i mekhanizm elektrokhimicheskikh reaktsiy* [In the book: Kinetics and the mechanism of electrochemical reactions]. Alma-Ata: Science, 1977, 47 p. (In Russ.)
13. Van Bueren. *Defekty v kristallakh* [Defects in crystals]. Moscow: Foreign Languages Publishing House, 1962, 610 p. (In Russ.)

Наврузов Хуршед Парвизович – магистрант Института химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана. Душанбе, Республика Таджикистан

Ганиев Изатулло Наврузович – д-р хим. наук, профессор, академик НАНТ, зав. лабораторией Института химии В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана. Душанбе, Республика Таджикистан. Email: ganiev48@mail.ru

Амонулло Хайрулло – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры «Материаловедение, металлургические машины и оборудование» Таджикского технического университета им. М.С. Осими. Душанбе, Республика Таджикистан

Эшов Бахтиёр Бадалович – д-р техн. наук, доц., директор Государственного научного учреждения «Центр исследования инновационных технологий при Национальной академии наук Таджикистана». Душанбе, Республика Таджикистан. Email: ishov1967@mail.ru

Муллоева Нукра Мазабшоевна – зав. лабораторией Государственного научного учреждения «Центр исследования инновационных технологий при Национальной академии наук Таджикистана». Душанбе, Республика Таджикистан.

Khurshed P. Navruzov – Master's student, Nikitin Institute of Chemistry, the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, the Republic of Tajikistan.

Izatullo N. Ganiev – DrSc (Chem.), Professor, Academician of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Head of the Laboratory, Nikitin Institute of Chemistry, the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, the Republic of Tajikistan. Email: ganiev48@mail.ru

Khayrullo Amonullo – PhD (Eng.), Senior Lecturer, the Department of Materials Science, Metallurgical Machines and Equipment, Osimi Tajik Technical University, Dushanbe, Tajikistan.

Bakhtier B. Eshov – DrSc (Eng.), Associate Professor, Director of the State Scientific Institution Center for Research of Innovative Technologies at the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan. Email: ishov1967@mail.ru

Nukra M. Mulloeva – Head of the Laboratory, State Scientific Institution Center for Research of Innovative Technologies at the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan.

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 669.718
DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-50-57



ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ АЛЮМИНИЕВЫХ БАНОК В ПРУТКИ И ПРОВОЛОКУ НЕОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ИСКЛЮЧАЮЩАЯ ИХ ПЕРЕПЛАВ

Загиров Н.Н.¹, Логинов Ю.Н.², Иванов Е.В.¹, Феськова Е.В.¹

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): в статье описаны суть и особенности реализации технологии переработки дробленых сыпучих отходов использованных алюминиевых банок в прутки и проволоку различного диаметра, полностью исключая плавильный передел. Такой подход позволяет заметно повысить выход годного и снизить энергозатраты на проведение основных операций по переработке отходов.

Цель работы: составление и практическая апробация базовой технологической схемы по изготовлению полуфабрикатов из сыпучих отходов алюминиевых банок с поэтапным изучением характера изменения их механических характеристик. **Используемые методы:** при воплощении предлагаемой схемы использованы приемы и методы, применяемые в смежных областях промышленного производства, связанных с реализацией технологий порошковой металлургии и обработки металлов давлением. **Новизна:** полученные данные можно считать сравнительно новыми, так как до последнего времени рассматриваемые в работе металлические отходы утилизировались и возвращались в производственный оборот, как правило, через предварительное их пакетирование и последующий переплав. **Результаты:** показана возможность получения прутковой и проволоочной продукции из вторичных ресурсов на основе алюминия, приведены возможные параметры процессов обработки, выполнены механические испытания продукции, определены прочностные и пластические характеристики произведенных из дробленых отходов прутков и проволоки разного диаметра в зависимости от сообщаемой материалу при волочении степени деформации и места проведения по ходу волочения промежуточного отжига по выбранному режиму. **Практическая значимость** заключается в определении параметров обработки, позволяющих получить прутковую и проволоочную продукцию с установленным уровнем свойств.

Ключевые слова: отходы алюминиевых банок, дробление, предварительная обработка, брикетирование, горячая экструзия, волочение, отжиг, прутково-проволоочная продукция, механические свойства.

© Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Иванов Е.В., Феськова Е.В., 2020

Для цитирования

Переработка отходов алюминиевых банок в прутки и проволоку неответственного назначения, исключая их переплав / Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н., Иванов Е.В., Феськова Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 50–57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-50-57>



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

PROCESSING OF ALUMINUM CAN WASTE INTO LOW DUTY RODS AND WIRE WITHOUT REMELTING

Zagirov N.N.¹, Loginov Yu.N.², Ivanov E.V.¹, Feskova E.V.¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Yeltsin Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): The paper describes a key point and features of processing of bulk crushed aluminum can waste into rods and wire of various diameters, completely excluding their remelting. Such approach leads to a significant yield gain and energy cost reduction for the main operations of waste processing. **Objectives:** To draw out and practically test a basic process flow diagram for manufacturing semi-finished products from bulk aluminum can waste, and study step by step a pattern of changes in mechanical characteristics. **Methods Applied:** When introducing the suggested diagram, the authors applied the techniques and methods used in related areas of industrial production connected with powder metallurgy and metal forming. **Originality:** The obtained data can be considered relatively new, as until quite recently metal waste under study in the paper was disposed and returned to production, as a rule, by preliminary baling and subsequent remelting. **Findings:** The paper shows the possibility of producing bar and wire products from aluminum-based secondary resources, contains possible processing parameters, and performed mechanical tests of products, identifies strength and ductility of bars and wire of various diameters produced from crushed waste depending on the degree of deformation and the place of intermediate annealing in the course of drawing according to the selected mode. **Practical Relevance:** It lies in determining the processing parameters that make it possible to produce bar and wire products with a specified level of properties.

Keywords: aluminum can waste, crushing, preparatory treatment, briquetting, hot-melt extrusion, drawing, annealing, rods and wire products, mechanical properties.

For citation

Zagirov N.N., Loginov Yu.N., Ivanov E.V., Feskova E.V. Processing of Aluminum Can Waste into Low Duty Rods and Wire Without Remelting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 50–57. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-50-57>

Введение

Одним из наиболее распространенных видов отходов, привлекающих внимание переработчиков вторичного алюминиевого сырья, являются остающиеся после использования банки из-под различных напитков [1, 2]. По данным статистики, емкость российского рынка алюминиевых банок оценивается приблизительно в 2–3 миллиарда. Учитывая вес банки даже небольшого объема, составляющий порядка 15 г, получаем необходимое количество затрачиваемого алюминия, которое даже по грубым оценкам составляет 30–40 тыс. т чистого металла в год. А если принять во внимание и энергетические ресурсы, связанные с производством металла из первичного сырья, становятся очевидными перспективы развития в алюминиевой промышленности перерабатывающей отрасли [3].

Сбором использованных банок занимаются, как правило, мелкие фирмы, которые реализуют только часть цикла утилизации: отделение магнитной сепарацией механической примеси железа, пакетирование и обжиг пакетов с целью удаления обычно применяемых поверхностных по-

крытий, а также передачу другим предприятиям для переплавки.

Стоит отметить, что различные элементы алюминиевых банок изготавливают из различных марок алюминиевых сплавов [4]. В корпусе банки применяют сплав 3004 (Д12) или близкий к нему по химическому составу сплав 3104: марганца и магния в них в среднем по 1%, меди – до 0,25% и железа – до 0,7–0,8%. Крышку банки делают из сплава 5182. В этом сплаве магния уже 4–5%, а марганца – 0,20–0,50%. Ключ для открывания банки, дающий самый малый вклад в общую массу банки, изготавливают из сплава 5042 с содержанием магния 3–4% и марганца – 0,20–0,50%. Вид баночных отходов после разделки на отдельные составляющие показан на **рис. 1**.

Область рециркуляции алюминия и относительно высокая стоимость материала означают, что в отличие от конкурирующих упаковок, таких как стеклянные и пластиковые бутылки, подавляющая часть металла из лома алюминиевых банок – около 80% – возвращается к производителям новых банок. Процесс можно считать замкнутым, экологически устойчивым, с достаточно эффективным циклом высоких показателей

рециркуляции [5, 6]. При этом руководствуются, как правило, общим подходом к их переработке, схематично отображенным на **рис. 2** [7].



Рис. 1. Вид баночных отходов после их разделки на отдельные составляющие

Fig. 1. Can waste after crushing into fragments

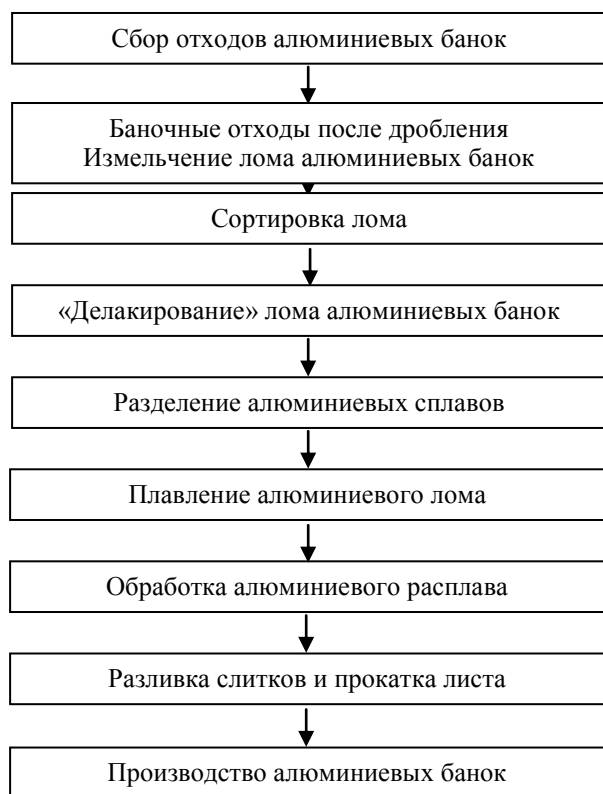


Рис. 2. Общая технологическая схема переработки отходов алюминиевых банок, применяемая на многих заводах Западной Европы

Fig. 2. A general process flow diagram of processing aluminum can waste applied at many plants in Western Europe

Некоторую часть лома алюминиевых банок переплавляют в обычных или роторных плавильных печах, и она идет на изготовление литейных сплавов. Существует, однако, на наш взгляд, и другой альтернативный вариант вовлечения баночных отходов в производственный оборот, заключающийся в реализации, по терминологии зарубежных исследователей, твердотельного способа утилизации сыпучих металлических отходов. Базируется он на применении только традиционных процессов обработки давлением пористых металлических сред без использования плавильного передела [8, 9].

Материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

В работе для опробования указанного подхода в качестве исходного сырья использовали дробленые фрагменты корпуса банок, выполненного, как отмечалось выше, из алюминиевого сплава марки 3004. В развернутом виде химический состав указанного сплава приведен в **табл. 1**.

Таблица 1. Химический состав сплава 3004
Table 1. Chemical composition of alloy 3004

Массовая доля элементов, %							
Основные компоненты				Примеси, не более			
Al	Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Zn	Cr
Основа	0,85–1,15	1,0–1,25	0,35–0,55	0,2	0,05–0,2	0,15	0,15

Конечным объектом переработки была принята прутково-проволочная продукция разного диаметра, практическое назначение которой в первом приближении определить однозначно не представлялось возможным. Была поставлена общая задача составления базовой технологической схемы по изготовлению такого рода полуфабрикатов с поэтапным изучением характера изменения их механических характеристик.

Исходный материал изначально был получен за счет реализации процессов дробления отходов банок и их фрагментирования с использованием специальных измельчающих машин-шредеров. После дробления на поверхности частиц оставались следы лакокрасочных покрытий, которые в виде тематических рисунков и текстов наносятся на корпуса банок при их изготовлении. С точки зрения последующей переработки это является нежелательным фактором, поэтому дробленые отходы подвергали дополнительной предварительной обработке, после чего они приобретали вид, приведенный на **рис. 3**.



Рис. 3. Общий вид отходов после дробления и термической обработки (обжига) на воздухе
Fig. 3. A general view of waste after crushing and heat treatment (annealing) in air

На **рис. 4** представлена развернутая технологическая схема изготовления прутков и проволоки, включающая стадии предварительной подготовки дробленых отходов к переработке, холодного брикетирования, горячей экструзии и холодного волочения.



Рис. 4. Технологическая схема изготовления прутков и проволоки из дробленых баночных отходов
Fig. 4. A process flow diagram of producing rods and wire from crushed can waste

Обоснование выбранной схемы состоит в следующем. В перечне операций отсутствует переплав, поскольку тонкомерные фрагменты

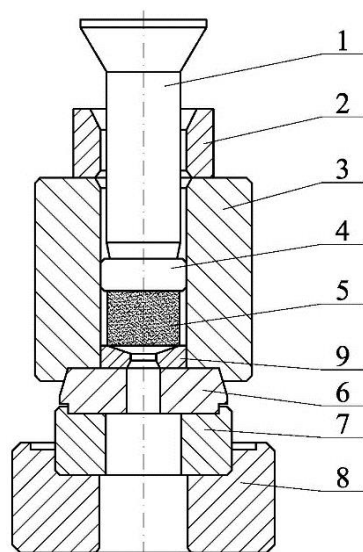
будут окислены в атмосфере печи. Обычно такие отходы плавают по поверхности расплава. Их окружает пленка оксидов алюминия, которая не дает возможности слияния отдельных расплавленных фрагментов в единое целое. Поэтому выгоднее использовать режим твердофазной обработки, включающий элементы порошковой металлургии. После получения брикета целесообразно применить именно горячую экструзию, а не прокатку, поскольку этому способствует форма брикета, а также схема всестороннего сжатия, повышающая пластичность металла.

Из-за неправильности формы и относительной крупности фрагментов отходов насыпная плотность их перед брикетированием была сравнительно низкой. Поэтому в конечном итоге, несмотря на прикладываемое давление $p = 180$ МПа (что соответствовало для диаметра рабочего канала пресс-формы 42 мм усилию брикетирования 250 кН), брикеты, как видно из **рис. 5**, получались достаточно низкими, высотой 20–25 мм. При общей массе каждого брикета порядка 60–75 г их интегральная плотность составляла 2,23–2,29 г/см³, что соответствовало относительной плотности 82–84%.



Рис. 5. Общий вид брикетов, полученных холодным брикетированием дробленых баночных отходов
Fig. 5. A general view of briquettes produced by cold briquetting of crushed can waste

В дальнейшем для повышения выхода годного при получении прутков решено было использовать составные (состоящие из 2-х брикетов) заготовки, общая высота которых равнялась 40–50 мм. Поскольку для прессования заготовок из сплава системы Al-Mn рекомендуют оснастку нагревать до температуры 400–430°C, а саму заготовку – до температуры 440–480°C [10], составной брикет размещали внутри рабочей зоны контейнера. После чего инструментальную наладку нагревали до 430–450°C, обеспечивая в ходе экструзии изотермические условия деформирования. Для проведения экспериментов использовали оснастку и оборудование, общий вид которых показан на **рис. 6**.



а



б

Рис. 6. Схема инструментальной оснастки (а) и сборки (б) установки для проведения горячей экструзии:

1 – пресс-штемпель; 2 – ограничитель хода; 3 – контейнер; 4 – пресс-шайба; 5 – заготовка; 6 – подкладка; 7 – матрицедержатель; 8 – основание; 9 – матрица

Fig. 6. Tool equipment (a) and assembly (б) of the hot-melt extrusion machine: 1 is an extrusion ram; 2 is a stop block; 3 is a bin; 4 is a pressure disc; 5 is a workpiece; 6 is a plate; 7 is a die holder; 8 is a base stand; 9 is a die

Результаты исследования и их обсуждение

Как уже отмечалось выше, горячей экструзией были получены прутки $\varnothing 8,4$ мм и $6,8$ мм, которые далее подвергали холодной обработке волочением, сопровождая ее промежуточными отжигами. Это объясняется тем, что сплав, отходы которого рассматривались в работе, термической обработкой не упрочняется, а профили из него поставляются, как правило, в отожженном или упрочненном холодной деформацией состояниях [10]. При составлении маршрута волочения не стремились к его оптимальности, назначая единичные обжатия на уровне 10–12% за проход. Произвольно выбирались и места проведения отжигов, которые каждый раз проходили по единому режиму: $\theta_{\text{отж}} = 380^\circ\text{C}$, $\tau = 1$ ч. После одного из этапов обработки по мере уменьшения диаметра осуществлялся отбор образцов проволоки (по 3 шт. на каждый диаметр) для проведения механических испытаний на растяжение. Общий вид фрагментов проволоки разного диаметра приведен на рис. 7. Результаты выполненных с использованием стандартных методик испытаний, в ходе которых определяли временное сопротивление разрыву σ_b , относительное удлинение δ и относительное сужение ψ , представлены в табл. 2 и 3, в которых приведены усредненные показатели указанных величин для двух опробованных вариантов.

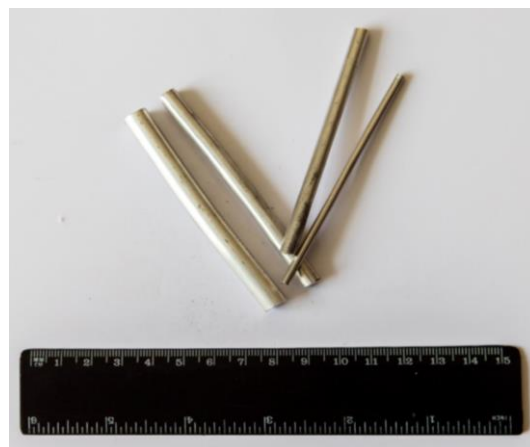


Рис. 7. Проволока разного диаметра, полученная из дробленых баночных отходов

Fig. 7. Wire of various diameters produced from crushed can waste

Приведенные в табл. 2 и 3 данные свидетельствует о следующем:

1. Изменение коэффициента вытяжки при горячей экструзии в интервале значений λ от 29 до 44 принципиального влияния на уровень механических характеристик экструдированных прутков не оказывает. При реализуемом в ходе экспериментов температурно-скоростном режиме горячей обработки временное сопротивление разрыву σ_b достигает значений 210–220 МПа, относительное удлинение $\delta = 10$ –15%, относительное сужение $\psi = 30$ –35%.

2. Проведение после горячей экструзии отжига прутков по выбранному температурно-временному режиму приводит к некоторому снижению прочности и повышению пластичности. Однако изменение показателей, характеризующих указанные свойства, довольно несущественно. По величине σ_b снижение составляет 9–12%, по δ увеличение чуть больше и равняется 28–30%, по ψ – чуть меньше и равняется 15–20%.

3. Холодное волочение как неотожженных, так и отожженных прутков приводит к заметному упрочнению материала с одновременным снижением пластичности. При этом деформация горячепрессованного прутка, который промежуточному отжигу не подвергается, при значении суммарного относительного обжатия $\epsilon_\Sigma = 45,5\%$ вызывает увеличение показателя прочности в 1,3 раза (σ_b достигает максимальных

для рассматриваемого случая значений 270–275 МПа). Показатели пластичности при этом снижаются по величине δ в 2 раза, а по величине ψ – в 1,2 раза. Волочение полученного горячей экструзией прутка после проведения отжига также способствует повышению прочности и снижению пластичности. Однако изменение абсолютных значений основных их показателей в значительной мере зависит от сообщаемой материалу степени деформации. Чем больше величина суммарного относительного обжатия ϵ_Σ , тем заметнее упрочнение материала. Причем следуя общим тенденциям, отражающим характер изменения механических свойств металлов при холодной обработке, наиболее интенсивный прирост прочности происходит на начальном этапе развития деформации после проведения отжига до значений $\epsilon_\Sigma = 20$ –30%.

Таблица 2. Результаты механических испытаний прутков и проволоки, полученных из прутка $\varnothing 8,4$ мм
Table 2. Mechanical tests of rods and wire produced from rods with a diameter of 8.4 mm

Стадии технологического процесса	Механические характеристики		
	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
1. Горячая экструзия	209	13	30
2. Отжиг на $\varnothing 8,4$ мм	190	18,5	34,5
3. Волочение с $\varnothing 8,4$ мм до $\varnothing 7,5$ мм ($\epsilon_\Sigma = 20\%$)	233	7,5	17
4. Отжиг на $\varnothing 7,5$ мм	178,5	14	28

Таблица 3. Результаты механических испытаний прутков и проволоки, полученных из прутка $\varnothing 6,8$ мм
Table 3. Mechanical tests of rods and wire produced from rods with a diameter of 6.8 mm

Стадии технологического процесса	Механические характеристики		
	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
1. Горячая экструзия	215	14	32
2. Отжиг на $\varnothing 6,5$ мм	189,5	19,5	43,5
3. Волочение с $\varnothing 6,5$ мм до $\varnothing 5,4$ мм ($\epsilon_\Sigma = 31\%$)	252,5	7,5	31
4. Волочение с $\varnothing 5,4$ мм до $\varnothing 5,1$ мм ($\epsilon_\Sigma = 38,5\%$)	254,5	6	20
5. Волочение с $\varnothing 6,5$ мм до $\varnothing 4,8$ мм ($\epsilon_\Sigma = 45,5\%$)	273,5	7	26
6. Отжиг на $\varnothing 4,8$ мм	202	19,5	40
7. Волочение с $\varnothing 4,8$ мм до $\varnothing 4,0$ мм ($\epsilon_\Sigma = 31\%$)	226	4,5	6
8. Волочение с $\varnothing 4,0$ мм до $\varnothing 3,0$ мм ($\epsilon_\Sigma = 61\%$)	257	3	2

Заключение (выводы)

1. Установлена возможность переработки отходов алюминиевых банок в прутки и проволоку с использованием приемов, исключающих переplав.

2. Опробована последовательность операций, позволяющая получить продукт в виде прутков и проволоки, а также описан комплекс свойств этого продукта.

3. Применение методов холодной пластической деформации позволяет повышать прочностные свойства продукта.

Список литературы

1. Stotz P.M., Niero M., Bey N., Paraskevas D. Environmental screening of novel technologies to increase material circularity: A case study on aluminium cans. *Resources, Conservation and Recycling* 127, 96–106 (2017).
2. Ingaldi M., Borkowski S. Recycling process of the aluminium cans as an element of the sustainable development concept. *Manufacturing Technology*. 14(2), 172–178 (2014).
3. Duan R.B., Bai P.K., Yang J., Zhang W.D., Ding H. Study on waste aluminum cans remelting and purification technology. *Applied Mechanics and Materials*. 372, 360–363 (2013).
4. Промышленные алюминиевые сплавы: справочник. М.: Металлургия, 1984. 526 с.
5. Bulei C., Todor M.P., Heput T., Kiss I. Recovering Aluminium for Recycling in Reusable Backyard Foundry that Melts Aluminium Cans. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 416(1), 012099 (2018).
6. Verran G.O., Kurzawa U. An experimental study of aluminum can recycling using fusion in induction furnace. *Resources. Conservation and Recycling*. 52(5), 731–736 (2008).
7. Фомин Б. А. Металлургия вторичного алюминия. М.: Экомет, 2004. 240 с.
8. Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н. Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих стружковых отходов меди и ее сплавов методами обработки давлением: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 171 с.
9. Вариант технологии получения прутково-проволочной продукции из силумина АК12 / Н.Н. Загиров, Ю.Н. Логинов, С.Б. Сидельников, Е.В. Иванов // *Металлург*. 2018. № 6. С. 89–95.
10. Ерманок М.З., Фейгин В.И., Сухоруков Н.А. Прессование профилей из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1977. 264 с.

References

1. Stotz P.M., Niero M., Bey N., Paraskevas D. Environmental screening of novel technologies to increase material circularity: A case study on aluminium cans. *Resources, Conservation and Recycling* 127, 96–106 (2017).
2. Ingaldi M., Borkowski S. Recycling process of the aluminium cans as an element of the sustainable development concept. *Manufacturing Technology*, 14(2), 172–178 (2014).
3. Duan R.B., Bai P.K., Yang J., Zhang W.D., Ding H. Study on waste aluminum cans remelting and purification technology. *Applied Mechanics and Materials*, 372, 360–363 (2013).
4. *Promyshlennyye alyuminievye splavy: Spravochnik* [Industrial aluminum alloys: Reference guide]. Moscow: Metallurgy, 1984, 526 p. (In Russ.)
5. Bulei C., Todor M.P., Heput T., Kiss I. Recovering aluminium for recycling in reusable backyard foundry that melts aluminium cans. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 416(1), 012099 (2018).
6. Verran G.O., Kurzawa U. An experimental study of aluminum can recycling using fusion in induction furnace. *Resources. Conservation and Recycling*, 52(5), 731–736 (2008).
7. Fomin B.A. *Metallurgiya vtorichnogo alyuminiya* [Metallurgy of secondary aluminum]. Moscow: Ekomet, 2004, 240 p. (In Russ.)
8. Zagirov N.N., Loginov Yu.N. *Tekhnologicheskie osnovy polucheniya materialov i izdeliy iz sypuchikh struzhkovykh otkhodov medi i ee splavov metodami obrabotki davleniem: monografiya* [Technological basis for producing materials and products from chip waste of copper and its alloys by metal forming: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2015, 171 p. (In Russ.)
9. Zagirov N.N., Loginov Yu.N., Sidelnikov S.B., Ivanov E.V. An option of the technology for producing bars and wire products from silumin AK12. *Metallurg* [Metallurgist], 2018, no. 6, pp. 89–95. (In Russ.)
10. Ermanok M.Z., Feigin V.I., Sukhorukov N.A. *Pressovanie profiley iz alyuminievykh splavov* [Extrusion of aluminum alloy profiles]. Moscow: Metallurgy, 1977, 264 p. (In Russ.)

Поступила 09.07.2020; принята к публикации 07.09.2020; опубликована 25.09.2020
Submitted 09/07/2020; revised 07/09/2020; published 25/09/2020

Загиров Николай Наильич – канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. Email: kafomd_1@mail.ru

Логинов Юрий Николаевич – д-р техн. наук, профессор, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. Email: unl@mtf.ustu.ru

Иванов Евгений Владимирович – ст. преподаватель, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. Email: kafomd_1@mail.ru

Феськова Елена Васильевна – канд. пед. наук, доцент, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия. Email: kafomd_1@mail.ru

Nikolay N. Zagirov – PhD (Eng.), Associate Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Email: kafomd_1@mail.ru

Yury N. Loginov – DrSc (Eng.), Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Yeltsin Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia. Email: unl@mtf.ustu.ru

Evgeny V. Ivanov – Senior Lecturer, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Email: kafomd_1@mail.ru

Elena V. Feskova – PhD (Ed.), Associate Professor, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Email: kafomd_1@mail.ru

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

METALLURGICAL POWER ENGINEERING, ENERGY SAVING AND ELECTRICAL SYSTEMS

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

УДК 621.365.22

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-58-68



УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТУРА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Николаев А.А., Тулупов П.Г., Денисевич А.С.

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

Аннотация. Актуальность работы. В современной промышленности при вводе дуговых сталеплавильных печей в эксплуатацию для решения практических задач широко применяются математические модели электрического контура печи. При этом адекватность модели во многом зависит от корректности определения фактических параметров самого контура. При этом методики определения данных параметров в отечественной литературе описаны не достаточно подробно, а также имеют ряд недостатков. **Цель работы** – разработка усовершенствованного способа определения параметров электрического контура дуговой сталеплавильной печи на основании экспериментальных данных, полученных непосредственно на промышленной площадке. **Используемые методы:** для выполнения конечного расчёта параметров электрического контура проводится серия опытов двухфазных и трёхфазного коротких замыканий с полным погружением электродов в расплав с последующей фиксацией результатов эксперимента с использованием регистратора электрических сигналов РЭС-3. **Новизна:** в отечественной и зарубежной литературе при описании способов проведения опытов КЗ не используется контроль взаимного расположения фаз, что снижает точность определения параметров электрического контура. В предлагаемом методе данная особенность учитывается. **Полученные результаты.** На основании результатов опытов коротких замыканий получены параметры электрического контура и величины взаимной индуктивности дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125. **Практическая значимость.** Полученные результаты имеют высокую практическую значимость, поскольку в дальнейшем могут применяться при проведении исследований по выявлению энергетических резервов и оптимизации электрических режимов ДСП.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, установка ковш-печь, электрическая дуга, электрический контур, электрический режим, энергоэффективность, опыт короткого замыкания.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект №FZRU-2020-0011).

© Николаев А.А., Тулупов П.Г., Денисевич А.С., 2020

Для цитирования

Николаев А.А., Тулупов П.Г., Денисевич А.С. Усовершенствованный способ определения параметров электрического контура электродуговой сталеплавильной печи на основе экспериментальных данных // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 58–68. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-58-68>



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

AN IMPROVED METHOD OF DETERMINING THE ELECTRIC CIRCUIT PARAMETERS FOR AN ELECTRIC ARC FURNACE BASED ON THE EXPERIMENTAL DATA

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Denisevich A.S.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): In modern industry, when commissioning electric arc furnaces, mathematical models of the electric circuit of the furnace are widely used to solve practical problems. In this case, the adequacy of the model largely depends on the correct determination of the actual parameters of the circuit. Moreover, the methods for determining the parameters are not detailed enough in the Russian literature, and they also have a number of disadvantages. The objective of the study is to develop an improved method for determining the electric circuit parameters of an electric arc furnace based on experimental data obtained directly at the industrial site. **Methods Applied:** To make the final calculation of the electric circuit parameters, a series of experiments of two-phase and three-phase short circuits with a full immersion of electrodes in the melt is carried out, including recording the results of the experiment using the RES-3 electrical signal recorder. **Originality:** In Russian and foreign literature, when describing the methods of conducting short circuit tests, control of the relative position of phases is not used, reducing the accuracy of determining the electric circuit parameters. This peculiarity is taken into account in the proposed method. **Findings:** Based on the results of the short circuit experiments, the electric circuit parameters and the mutual inductance values of the shaft-type electric arc furnace ShP-125 were obtained. **Practical Relevance:** The results obtained are of a high practical importance, ensuring the fulfillment of energy conditions, when conducting research to identify energy reserves and optimize electrical modes of EAF.

Keywords: electric arc furnace, ladle furnace, electric arc, electric circuit, electrical mode, energy efficiency, short circuit experiment.

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZRU-2020-0011).

For citation

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Denisevich A.S. An Improved Method of Determining the Electric Circuit Parameters for an Electric Arc Furnace Based on the Experimental Data. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 58–68. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-58-68>

Введение

В настоящее время электрометаллургия является одной из наиболее приоритетных отраслей развития современной промышленности. При строительстве современных электросталеплавильных цехов в подавляющем большинстве случаев при производстве жидкой стали применяются мощные и сверхмощные дуговые сталеплавильные печи (ДСП) с удельной мощностью печного трансформатора близкой к 1 МВА/т с использованием технологии внепечной обработки расплава в установке ковш-печь (УКП).

Очевидно, что производство жидкой стали в ДСП и УКП является ресурсоёмким процессом и требует значительных затрат электроэнергии. Снижение производственных издержек при выплавке стали в ДСП и УКП является одним из приоритетных направлений в научных исследованиях, посвящённых данной тематике.

Так, в рамках исследования [1] была обоснована методика подбора оптимальных значений балансировочных коэффициентов ДСП, применение которой обеспечивает снижение износа огнеупорной футеровки, а также сокращения времени работы под током. В свою очередь, в исследовании [2] рассматривался подход к выявлению энергетических резервов работы печи, базирующийся на разработке и внедрении принципиально новой системы диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам напряжения электрической дуги. Эффективность подобного подхода была также обоснована с использованием реальных экспериментальных данных в исследовании [3].

Важно отметить, что в исследованиях [1–3] основой в той или иной вариации является математическая модель электрического контура ДСП [4–9] с заранее предопределёнными параметрами, такими как активное и реактивное сопротив-

ление печного трансформатора $R_{\text{ТР}}$ и $X_{\text{ТР}}$, активное и реактивное сопротивление участка короткой сети $R_{\text{КС}}$ и $X_{\text{КС}}$, а также взаимные индуктивности между фазами M_{12} , M_{23} и M_{13} . Очевидно, что корректность определения исходных данных определяет точность математической модели и, как следствие, эффективность методик повышения энергоэффективности работы сталеплавильного комплекса.

В соответствии с этим особую актуальность приобретает задача разработки усовершенствованного способа определения параметров электрического контура ДСП (УКП) на основе экспериментальных данных. Отметим, что в отечественной и зарубежной литературе при описании способов проведения опытов КЗ контроль взаимного расположения фаз не используется, что снижает точность определения параметров электрического контура сталеплавильных агрегатов.

Теоретические основы усовершенствованного способа определения параметров электрического контура ДСП

Наиболее простым и очевидным способом определения параметров электрического контура является метод трёхфазного короткого замыкания, когда все электроды погружаются в расплав с дальнейшим расчётом по стандартным формулам:

$$Z_{\text{КС}_i} = \frac{U_{2\Phi_i}}{I_{\text{Д}_i}}; \quad (1)$$

$$R_{\text{КС}_i} = \frac{P_{2_i}}{I_{\text{Д}_i}^2}; \quad (2)$$

$$X_{\text{КС}_i} = \sqrt{Z_{\text{КС}_i}^2 - R_{\text{КС}_i}^2}, \quad (3)$$

где $i=\{1,2,3\}$ – номер фазы; $U_{2\Phi_i}$ – фазное напряжение на вторичной стороне печного трансформатора; $I_{\text{Д}_i}$ – ток электрической дуги, P_{2_i} – активная мощность на вторичной стороне печного трансформатора; $Z_{\text{КС}_i}$ – полное сопротивление участка короткой сети; $R_{\text{КС}_i}$ – активное сопротивление участка короткой сети; $X_{\text{КС}_i}$ – реактивное сопротивление участка короткой сети.

Тем не менее применение данного способа даёт значительную погрешность. Это связано с высоким влиянием явления переноса мощности между фазами, а также смещением нейтральной

точки на векторной диаграмме. Кроме того, данный способ не позволяет точно определить значения взаимных индуктивностей, что делает его неприменимым в случае с компланарным расположением фаз [10].

В связи с этим наиболее предпочтительным является применение способа расчёта на основании двухфазного и трёхфазного короткого замыкания. При этом при проведении эксперимента важно следить за тем, чтобы при контакте электродов с расплавом консоли располагались на одном уровне. В противном случае результаты эксперимента будут искажены. Схема корректного взаимного расположения хомутов электрододержателей и рукавов приведена на **рис. 1**. Схема эксперимента при использовании данного способа приведена на **рис. 2**.

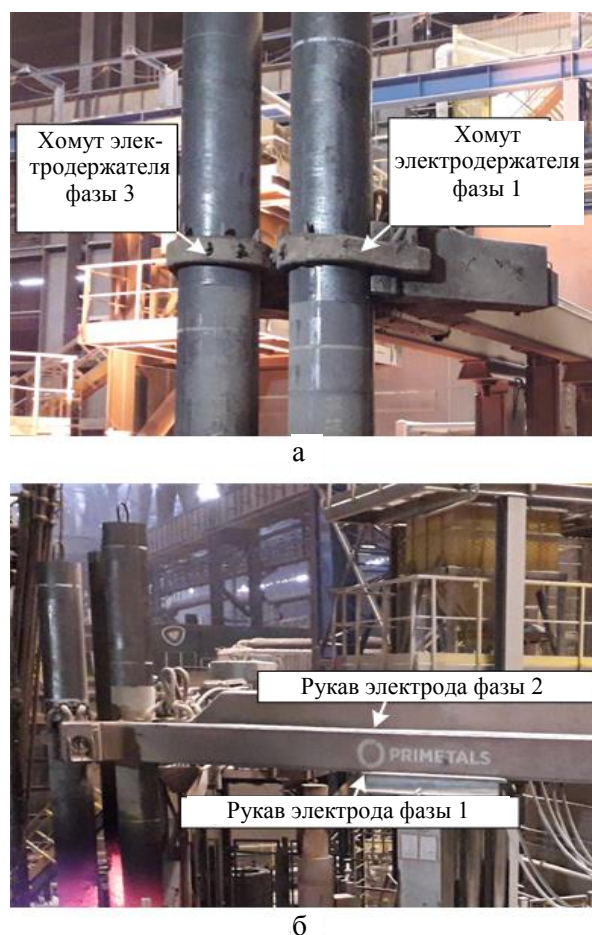


Рис. 1. Корректное взаимное расположение хомутов (а) и рукавов электродов (б) при проведении опытов КЗ

Fig.1. A correct relative position of clamps (a) and hoses of the electrodes (b), when conducting the short circuit experiments

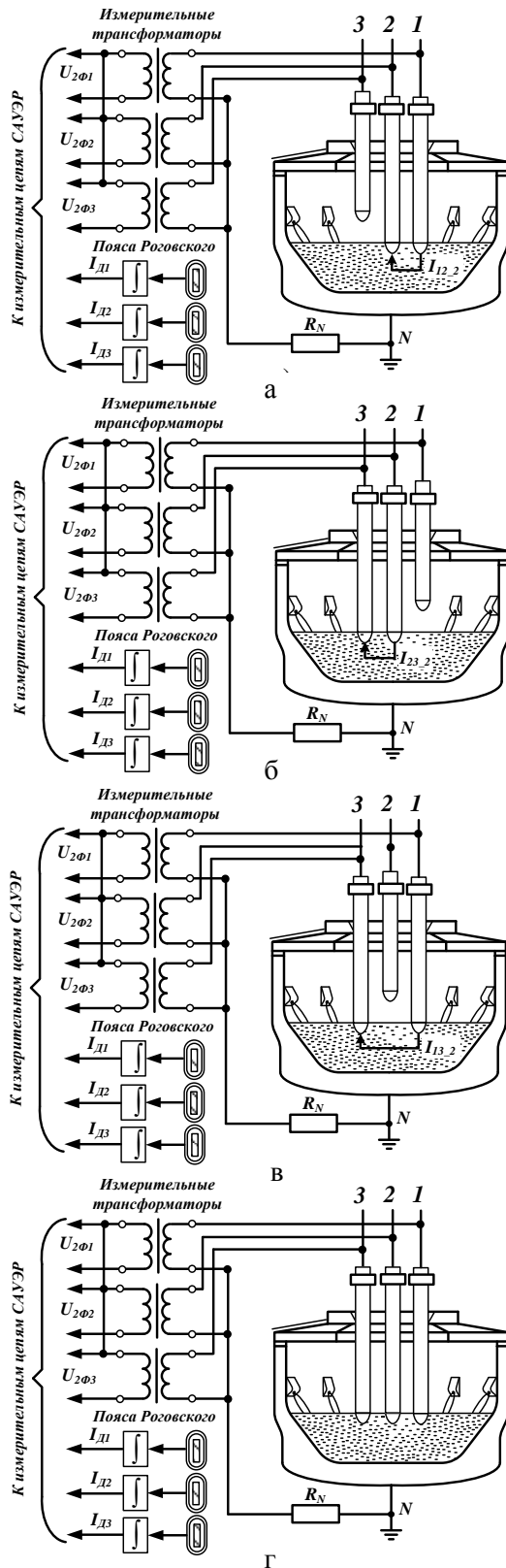


Рис. 2. Схема проведения экспериментов двухфазных и трёхфазных КЗ

Fig.2. The procedure of conducting the experiments of two-phase and three-phase short circuits

В соответствии с усовершенствованной методикой расчёт параметров короткой сети производится с использованием следующего набора формул:

$$Z_{2-12} = \frac{S_{2-1} + S_{2-2}}{0,25(I_{2-1} + I_{2-2})^2} = \frac{U_{2\Phi-1} \cdot I_{2-1} + U_{2\Phi-2} \cdot I_{2-2}}{0,25(I_{2-1} + I_{2-2})^2}; \quad (4)$$

$$Z_{2-23} = \frac{S_{2-2} + S_{2-3}}{0,25(I_{2-2} + I_{2-3})^2} = \frac{U_{2\Phi-2} \cdot I_{2-2} + U_{2\Phi-3} \cdot I_{2-3}}{0,25(I_{2-2} + I_{2-3})^2}; \quad (5)$$

$$Z_{2-13} = \frac{S_{2-1} + S_{2-3}}{0,25(I_{2-1} + I_{2-3})^2} = \frac{U_{2\Phi-1} \cdot I_{2-1} + U_{2\Phi-3} \cdot I_{2-3}}{0,25(I_{2-1} + I_{2-3})^2}, \quad (6)$$

где Z_{2-12} , Z_{2-23} , Z_{2-31} – полные сопротивления замкнутого контура в каждом из трёх режимов двухфазного КЗ соответственно; $S_{2-1}, S_{2-2}, S_{2-3}$ – полные фазные мощности на вторичной стороне печного трансформатора в фазах «1», «2» и «3» соответственно; $S_{2-1}, S_{2-2}, S_{2-3}$ – полные фазные мощности на вторичной стороне печного трансформатора в фазах «1», «2» и «3» соответственно; $U_{2\Phi-1}, U_{2\Phi-2}, U_{2\Phi-3}$ – фазные напряжения на вторичной стороне печного трансформатора в фазах «1», «2» и «3» соответственно; $I_{2-1}, I_{2-2}, I_{2-3}$ – значения токов, полученных с помощью датчиков Роговского, установленных на каждой из трёх фаз.

$$R_{2-12} = \frac{P_{2-1} + P_{2-2}}{0,25 \cdot (I_{2-1} + I_{2-2})^2}; \quad (7)$$

$$R_{2-23} = \frac{P_{2-2} + P_{2-3}}{0,25 \cdot (I_{2-2} + I_{2-3})^2}; \quad (8)$$

$$R_{2-13} = \frac{P_{2-1} + P_{2-3}}{0,25 \cdot (I_{2-1} + I_{2-3})^2}, \quad (9)$$

где R_{2-12} , R_{2-23} , R_{2-13} – активные сопротивления замкнутого контура в каждом из трёх режимов двухфазного КЗ соответственно; $P_{2-1}, P_{2-2}, P_{2-3}$ – фазные активные мощности на вторичной стороне печного трансформатора в фазах «1», «2» и «3» соответственно.

$$Z_{2-1} = \frac{Z_{2-12} + Z_{2-31} - Z_{2-23}}{2}; \quad (10)$$

$$Z_{2-2} = \frac{Z_{2-12} + Z_{2-23} - Z_{2-31}}{2}; \quad (11)$$

$$Z_{2-3} = \frac{Z_{2-23} + Z_{2-31} - Z_{2-12}}{2}; \quad (12)$$

$$R_{2-1} = \frac{R_{2-12} + R_{2-31} - R_{2-23}}{2}; \quad (13)$$

$$R_{2-2} = \frac{R_{2-12} + R_{2-23} - R_{2-31}}{2}; \quad (14)$$

$$R_{2-3} = \frac{R_{2-23} + R_{2-31} - R_{2-12}}{2}; \quad (15)$$

$$X_{2-1} = \sqrt{Z_{2-1}^2 - R_{2-1}^2}; \quad (16)$$

$$X_{2-2} = \sqrt{Z_{2-2}^2 - R_{2-2}^2}; \quad (17)$$

$$X_{2-3} = \sqrt{Z_{2-3}^2 - R_{2-3}^2}, \quad (18)$$

где $Z_{2-1}, Z_{2-2}, Z_{2-3}$ – полное сопротивление участков короткой сети фаз «1», «2» и «3» соответственно; $R_{2-1}, R_{2-2}, R_{2-3}$ – активное сопротивление участков короткой сети фаз «1», «2» и «3» соответственно; $X_{2-1}, X_{2-2}, X_{2-3}$ – реактивное сопротивление участков короткой сети фаз «1», «2» и «3» соответственно.

В свою очередь, определение величины коэффициентов взаимной индуктивности производится исходя из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} R_{\text{ПЕР.1}} = \omega [M_{12} \frac{I_2}{I_1} \cos(\alpha_{12} - \frac{\pi}{2}) - M_{13} \frac{I_3}{I_1} \cos(\alpha_{13} - \frac{\pi}{2})] \\ X_{\text{ПЕР.1}} = -\omega [M_{12} \frac{I_2}{I_1} \sin(\alpha_{12} - \frac{\pi}{2}) - M_{13} \frac{I_3}{I_1} \sin(\alpha_{13} - \frac{\pi}{2})] \end{cases}, \quad (19)$$

где $R_{\text{ПЕР}}$ – активное сопротивление переноса; $X_{\text{ПЕР.}}$ – индуктивное сопротивление переноса; ω – частота питающей сети; I_1, I_2, I_3 – действующее значение тока электрической дуги в каждой из трёх фаз; M_{12}, M_{13} – взаимные индуктивности между фазами «1» и «2», «1» и «3» соответственно; α_{12}, α_{13} – углы между векторами токов в фазах «1» и «2», «1» и «3» соответственно.

В случае двухфазного КЗ между фазами «1» и «2» (рис. 2, а) действующие значения токов дуг I_1 и I_2 равны между собой, а угол между векторами токов составляет 180° . С учётом того, что $I_3=0$, система (3) трансформируется в следующий вид:

$$\begin{cases} R_{\text{TRANSF.1}} = 0 \\ X_{\text{TRANSF.1}} = \omega M_{12} \end{cases} \quad (20)$$

В случае КЗ между фазами «2» и «3» (рис. 2, б), «1» и «3» (рис. 2, в) результирующее выражение будет аналогично выражению (20).

Опираясь на вышеизложенное, рассмотрим результаты практических исследований, проведённых на базе ШП-125.

Результаты экспериментальных исследований на базе ШП-125

В рамках данного исследования на базе дуговой сталеплавильной печи шахтного типа ШП-125 с мощностью печного трансформатора 85 МВА в соответствии со схемой, представленной на рис. 2, а также с использованием регистратора электрических сигналов РЭС-3, были получены осциллограммы, приведённые на рис. 3.

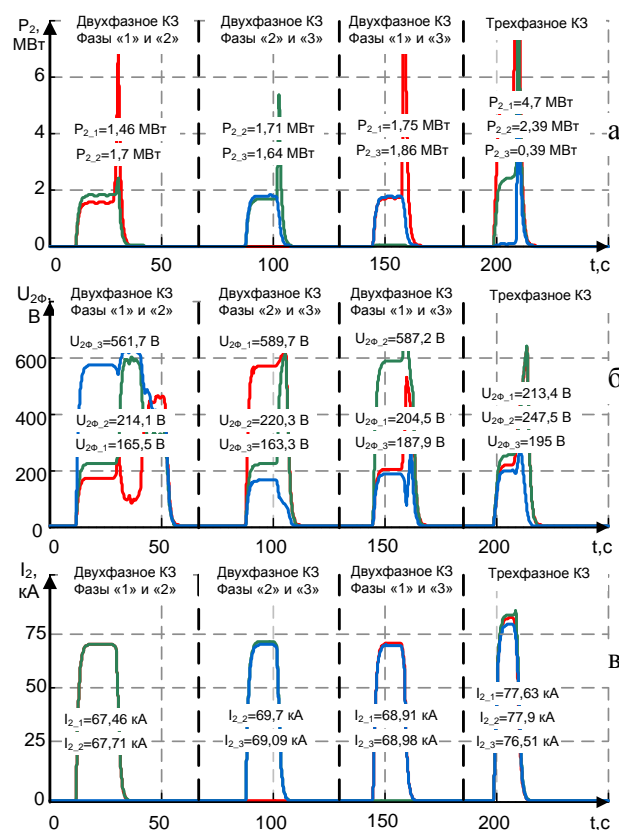


Рис.3. Осциллограммы сигналов в фазах «1», «2», «3» при проведении эксперимента по определению электрических параметров короткой сети и взаимных индуктивностей для ДСП шахтного типа (85 МВА): а – фазных активных мощностей на вторичной стороне печного трансформатора P_2 ; б – фазных напряжений на вторичной стороне печного трансформатора $U_{2\phi}$; в – сигналов токов на вторичной стороне печного трансформатора I_2 , полученных с помощью датчиков Роговского, установленных на каждой из трёх фаз

Fig.3. Oscillograms of signals in phases “1”, “2”, “3”, when conducting the experiment to determine the electrical parameters of the high current system and mutual inductance for the shaft-type electric arc furnace (85 MVA): а is phase active power on the secondary side of the furnace transformer, P_2 ; б is Y voltage on the secondary side of the furnace transformer, $U_{2\phi}$; в is signals of currents on the secondary side of the furnace transformer, I_2 , received using Rogowski sensors installed on each of three phases

Численные результаты эксперимента, а также результаты промежуточных расчётов, сведены в **табл. 1–4**. Кроме того, в данных таблицах приведены результаты аналогичного эксперимента, проведённого на математической модели, структура которой подробно описана в работах [11–15].

Расчёт параметров короткой сети по ранее описанной методике показал, что $R_{KC1}=0,382$ мОм, $R_{KC2}=0,313$ мОм, $R_{KC3}=0,378$ мОм, $X_{KC1}=2,881$ мОм, $X_{KC2}=2,704$ мОм, $X_{KC3}=2,757$ мОм.

Таблица 1. Результаты эксперимента двухфазного короткого замыкания с погружением в расплав электродов фаз «1» и «2»
Table 1. Experimental results of two-phase short circuit, including the immersion of electrodes of phases “1” and “2” in the melt

Параметр	Эксперимент			Модель		
	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»
$U_{2\Phi}$ [В]	165,5	214,1	561,7	165,1	211,4	562,8
I_2 [кА]	67,46	67,61	0,06	66,53	66,53	0
S_2 [МВА]	11,17	14,48	0,04	10,99	14,07	0
P_2 [МВт]	1,46	1,7	-0,03	1,989	1,73	0
Z_2 [мОм]	2,453	3,167	-	2,482	3,178	-
$X_{2,12}$ [мОм]	2,43	3,14	-	2,44	3,15	-
$R_{2,12}$ [мОм]	0,32	0,37	-	0,45	0,39	-

Таблица 2. Результаты эксперимента двухфазного короткого замыкания с погружением в расплав электродов фаз «2» и «3»
Table 2. Experimental results of two-phase short circuit, including the immersion of electrodes of phases “2” and “3” in the melt

Параметр	Эксперимент			Модель		
	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»
$U_{2\Phi}$ [В]	589,7	220,3	163,3	575,4	214	160,9
I_2 [кА]	0,34	69,7	69,09	0	67,72	67,72
S_2 [МВА]	0,2	15,36	11,28	0	14,49	10,9
P_2 [МВт]	0,17	1,71	1,64	0	1,79	2,033
Z_2 [мОм]	-	3,161	2,364	-	3,160	2,376
$X_{2,23}$ [мОм]	-	3,14	2,34	-	3,14	2,33
$R_{2,23}$ [мОм]	-	0,35	0,34	-	0,39	0,44

В соответствии с формулой (20) также были определены реактивные сопротивления взаимной индуктивности между фазами: $X_{M12}=0,445$ мОм, $X_{M23}=0,4275$ мОм, $X_{M13}=0,0625$ мОм. В свою очередь, результаты моделирования показывают, что параметры схемы замещения электрического контура определены верно и математическая модель является адекватной.

Таблица 3. Результаты эксперимента двухфазного короткого замыкания с погружением в расплав электродов фаз «1» и «3»
Table 3. Experimental results of two-phase short circuit, including the immersion of electrodes of phases “1” and “3” in the melt

Параметр	Эксперимент			Модель		
	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»
$U_{2\Phi}$ [В]	204,5	587,2	187,9	212,1	604,9	194,5
I_2 [кА]	68,91	0	68,98	71,1	0	71,1
S_2 [МВА]	14,09	0	12,86	15,08	0	13,83
P_2 [МВт]	1,75	0	1,86	2,3	0	2,263
Z_2 [мОм]	2,968	-	2,724	2,983	-	2,736
$X_{2,23}$ [мОм]	2,94	-	2,70	2,95	-	2,70
$R_{2,23}$ [мОм]	0,37	-	0,39	0,45	-	0,45

Таблица 4. Результаты эксперимента трёхфазного короткого замыкания
Table 4. Experimental results of three-phase short circuit

Параметр	Эксперимент			Модель		
	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»
$U_{2\Phi}$ [В]	213,4	247,5	195	222,3	251,2	199,4
I_2 [кА]	77,63	77,9	76,51	78,54	79,25	79,12
S_2 [МВА]	16,57	19,28	14,92	17,46	19,91	15,78
P_2 [МВт]	4,7	2,39	0,39	5,5	2,52	0,79
Z_2 [мОм]	2,749	3,177	2,549	2,830	3,170	2,520
$X_{2,13}$ [мОм]	2,64	3,15	2,55	2,69	3,14	2,52
$R_{2,13}$ [мОм]	0,78	0,39	0,07	0,89	0,40	0,13

Описание практического результата применения усовершенствованной методики определения параметров электрического контура

Влияние точности определения параметров короткой сети для построения математической модели электрического контура ДСП является очевидным и не вызывает сомнений. Вследствие этого, наибольший интерес в рамках данного исследования представляет оценка влияния взаимной индуктивности между фазами на формирование электрического режима.

Важно отметить, что в подавляющем большинстве современных исследований принимается в качестве допущения, что короткая сеть триангулирована и коэффициенты взаимной индуктивности равны между собой, вследствие чего их влияние нивелируется. Тем не менее данный вопрос требует более детального рассмотрения.

Рассмотрим случай, когда ступень печного трансформатора $N_{TP}=7$, а номер рабочей кривой $N_{PK}=5$. В соответствии с действующим на объекте

профилем плавки системы управления электрическим режимом ARCOS (Primetals Technologies), данному сочетанию соответствует набор уставок сопротивления электрической дуги $R_{Д1.3АД}=6,35$ МОм, $R_{Д2.3АД}=6,25$ МОм, $R_{Д3.3АД}=6,5$ МОм.

Для данных значений уставок был проведён расчёт электрических характеристик печи $P_d=f(I_d)$, $KИФ=f(I_d)$ и $KИН=f(I_d)$ на математической модели как с учётом, так и без учёта взаим-

ной индуктивности, с последующим нанесением рабочей точки (рис. 4).

Активная мощность электрической дуги P_d определяется по формуле:

$$P_d = P_2 - \Delta P, \quad (21)$$

где P_2 – активная мощность на вторичной стороне печного трансформатора, ΔP – потери активной мощности на участке короткой сети.

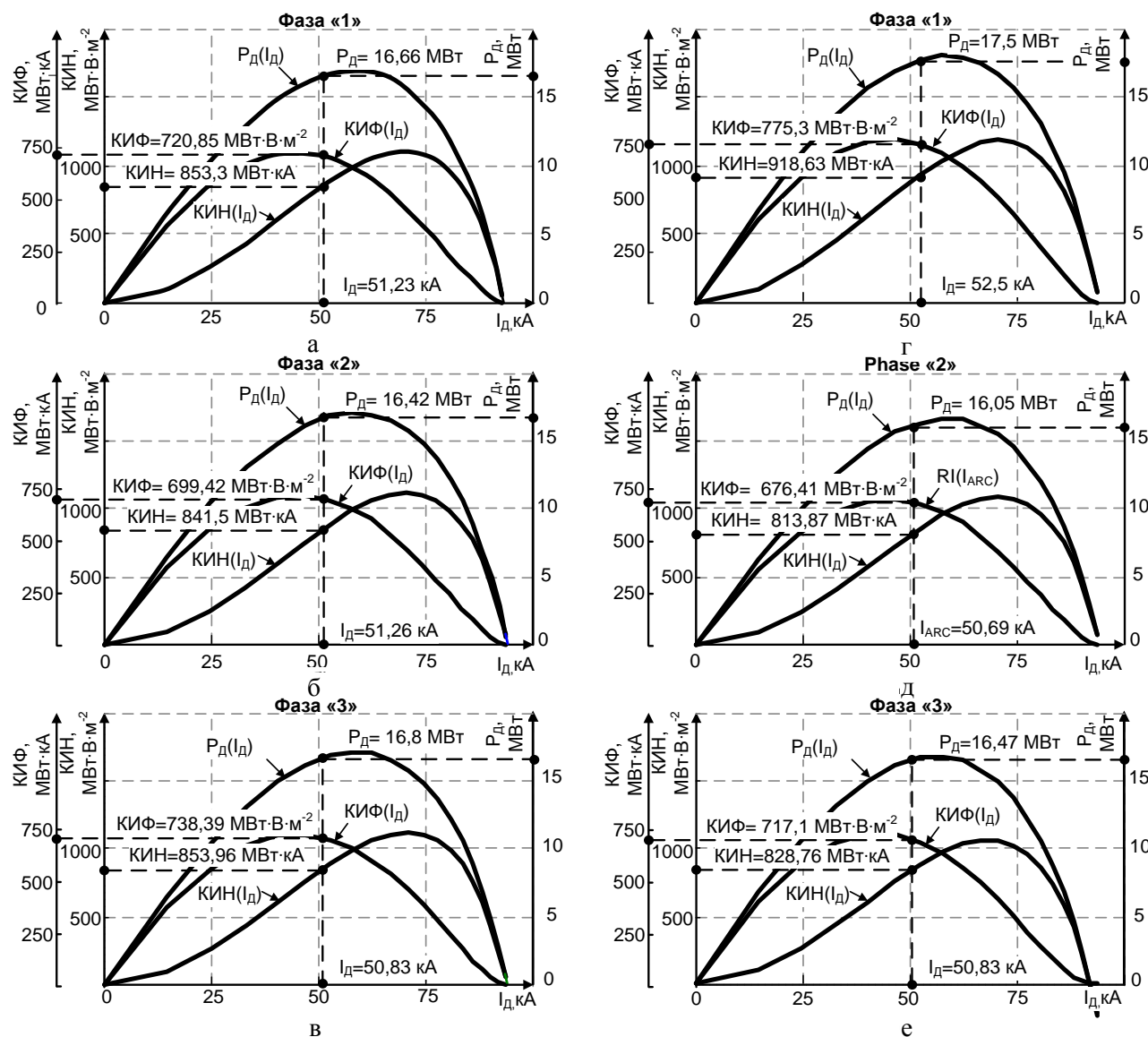


Рис.4. Электрические характеристики печи в фазах «1», «2» и «3» соответственно с нанесением рабочей точки: а, б, в – без учёта влияния взаимной индуктивности; г, д, е – с учётом влияния взаимной индуктивности
Fig.4. Electrical performance of the furnace in phases “1”, “2” and “3” correspondingly, including the marking of an operating point: а, б, в are exclusive of the effect of mutual inductance; г, д, е are inclusive of the effect of mutual inductance

Параметры P_2 и ΔP определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T U_{2\Phi}(t) I_d(t) dt, \quad (22)$$

$$\Delta P = I_d^2 \cdot R_{КС}, \quad (23)$$

где $U_{2\Phi}(t)$ – мгновенное значение фазного напряжения на вторичной стороне печного трансформатора; $I_d(t)$ – мгновенное значение тока электрической дуги; T – период (для промышленной частоты 50 Гц составляет 0,02 с).

Коэффициент износа футеровки КИФ определяется в соответствии со следующим выражением:

$$\text{КИФ} = \frac{P_d U_d}{a^2} = \frac{P_d^2}{a^2 I_d}, \quad (24)$$

где a – расстояние между осью столба дуги и ближайшей точкой футеровки или водоохлаждаемой панели.

В свою очередь, коэффициент интенсивности нагрева КИН определяется следующим образом:

$$\text{КИН} = P_d I_d. \quad (25)$$

С целью проведения сравнительного анализа характеристик на **рис. 4**, величины R_d , КИФ и КИН, определяющие рабочую точку для набора уставок $R_{d1}=6,35$ МОм, $R_{d2}=6,25$ МОм, $R_{d3}=6,5$ МОм для случаев, когда взаимная индуктивность учитывается и не учитывается в математической модели, были сведены в **табл. 5**.

Анализ абсолютных значений параметров в **табл. 5** показал, что суммарные значения $R_{d\Sigma}$, КИФ_Σ и КИН_Σ остаются практически неизменными вне зависимости от того, учитывается ли при моделировании влияние взаимной индуктивности. При этом значительному изменению подвергается соотношение параметров в трёх фазах. Для проведения оценки введём следующие показатели:

$$\Delta I_{dj} = I_{dj} - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 I_{di}; \quad (26)$$

$$\delta I_{dj} = \frac{I_{dj}}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 I_{di}}; \quad (27)$$

$$\Delta P_{dj} = P_{dj} - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 P_{di}; \quad (28)$$

$$\delta P_{dj} = \frac{P_{dj}}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 P_{di}}; \quad (29)$$

$$\Delta \text{КИФ}_j = \text{КИФ}_j - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \text{КИФ}_i; \quad (30)$$

$$\delta \text{КИФ}_j = \frac{\text{КИФ}_j}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \text{КИФ}_i}; \quad (31)$$

$$\delta \text{КИН}_j = \frac{\text{КИН}_j}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \text{КИН}_i}; \quad (32)$$

$$\Delta \text{КИН}_j = \text{КИН}_j - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \text{КИН}_i. \quad (33)$$

Результаты расчётов в соответствии с формулами (26)–(33) также сведены в **табл. 5**.

В исследовании [1] подробно описывалась методика формирования балансировочных коэффициентов с целью снижения тепловой нагрузки на водоохлаждаемые панели в холодной зоне печи. В рамках данного исследования было определено, что величина балансировочного коэффициента для каждой фазы лежит в диапазоне от 0,95 до 1,05. Результаты расчёта, приведённые в **табл. 5**, показывают, что взаимная индуктивность оказывает значительное влияние на балансировку фаз. Вследствие этого сочетание балансировочных коэффициентов, являющееся оптимальным при расчёте на математической модели без учёта влияния взаимной индуктивности, может оказаться неоптимальным при использовании на действующем технологическом оборудовании и, в свою очередь, не обеспечит ожидаемого экономического эффекта.

Таблица 5. Сравнительный анализ основных технологических параметров для двух вариантов математической модели (с учётом и без учёта влияния взаимной индуктивности)
Table 5. A comparative analysis of main process parameters for two options of a mathematical model (inclusive and exclusive of the effect of mutual inductance)

Параметр	Без учёта влияния взаимной индуктивности			С учётом влияния взаимной индуктивности		
	«1»	«2»	«3»	«1»	«2»	«3»
I_d , кА	51,22	51,26	50,83	52,50	50,69	50,32
P_d , МВт	16,66	16,42	16,8	17,50	16,05	16,47
КИФ, МВт·В·м ⁻²	720,85	699,42	738,39	775,30	676,41	717,10
КИН, МВт·кА	853,53	841,50	853,96	918,63	813,87	828,76
$I_{d,CP}$, кА	51,10			51,17		
$P_{дс}$, МВт	49,88			50,02		
КИФ _Σ , МВт·В·м ⁻²	2158,66			2168,81		
КИН _Σ , МВт·кА	2548,99			2561,26		
ΔI_d , кА	0,12	0,16	-0,27	1,40	-0,41	-0,78
δI_d , о.е.	1,0023	1,0031	0,9947	1,0273	0,9919	0,9847
ΔP_d , МВт	0,03	-0,21	0,17	0,87	-0,58	-0,16
δP_d , о.е.	1,002	0,9876	1,0104	1,0525	0,9653	0,9906
Δ КИФ, МВт·В·м ⁻²	1,30	-20,13	18,84	55,75	-43,14	-2,45
δ КИФ, о.е.	1,0018	0,9720	1,0262	1,0775	0,9400	0,9966
Δ КИН, МВт·кА	3,87	-8,16	4,30	68,97	-35,79	-20,90
δ КИН, о.е.	1,0046	0,9904	1,0051	1,0812	0,9579	0,9754

Выводы

1. Методика определения взаимных индуктивностей между фазами короткой сети путём расчёта на основании экспериментальных данных, полученных в ходе опытов трёхфазных и двухфазных коротких замыканий, является эф-

фективной и позволяет построить уточнённую математическую модель, учитывающую взаимную индуктивность и явление переноса мощности. Данный факт подтверждается путём сравнения результатов опытов КЗ, полученных на математической модели с учётом взаимной индуктивности и в процессе эксперимента на действующем технологическом оборудовании.

2. При проведении экспериментов двухфазных и трёхфазного коротких замыканий важно обеспечить корректное взаимное расположение хомутов и рукавов электродов. В противном случае расчёт параметров короткой сети и взаимных индуктивностей будет выполнен со значимой погрешностью.

3. Учёт взаимной индуктивности является важным условием корректного выбора балансирующих коэффициентов с применением математической модели в системе управления электрическим режимом. Результаты сравнительного анализа показали, что основные технологические параметры, такие как мощность электрической дуги, коэффициент износа футеровки и коэффициент интенсивности нагрева для определённого сочетания уставок, формирующих рабочие точки на электрических характеристиках ДСП и У КП, подвержены значительному влиянию взаимной индуктивности и явления переноса мощности. Отсутствие учёта в математической модели данных явлений может привести к тому, что расчётное оптимальное значение балансирующих коэффициентов не будет соответствовать фактическому. Как показывает практика, данный негативный эффект приводит к повышенному износу огнеупорной футеровки в горячей зоне печи и повышенной нагрузке на водоохлаждаемые панели, что сокращает межремонтный цикл и увеличивает экономические издержки в процессе эксплуатации ДСП.

Список литературы

1. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace// in Proc. 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2016, pp. 033-037. DOI:10.1109/MECATRO-NICS.2016.7547111.
2. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / Николаев А.А., Руссо Ж.-Ж., Сцымански В., Тулупов П.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14, №3. DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120
3. Николаев А.А., Тулупов П.Г., Омельченко Е.Я. Экспериментальные исследования гармонического состава токов и напряжений дуг мощной дуговой сталеплавильной печи шахтного типа // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №4 (41). С. 63–72
4. B. Bowman, K. Krüger, Arc Furnace Physics, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2009.
5. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity). CIGRE Report No. 102, 1939.

6. Игнатов И.И., Хаинсон А.В. Математическое моделирование электрических режимов дуговых сталеплавильных печей // *Электричество*. 1985. № 8. С. 69–72.
7. Köhle S., Lichtbogenreaktanzen von Drehstrom-Lichtbogenöfen (Arc reactances of AC arc furnace) // *Elektrowärme International* 51, B4, 1993, pp. 175–185.
8. Krüger K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces). Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
9. Timm K. Reaktanzsymmetrierung von Hochstromleitungen für drehstrom Lichtbogenöfen (Reactance symmetrization of the high-current lines for AC arc furnaces) // *Elektrowärme International* 49, B4, 1991, pp. 201–211.
10. Электрические промышленные печи: дуговые печи и установки специального нагрева: учебник для вузов / Свенчанский А.Д., Жердев И.Т., Кручинин А.М. и др. М.: Энергоиздат, 1981. 296 с.
11. B. Boulet, G. Lalli and M. Ajersch “Modeling and control of an electric arc furnace”// presented at the American Control Conference, Denver, CO, USA, Jun. 4–6, 2000.
12. M. Panoiu, C. Panoiu and L. Ghiormez “Modeling of the electric arc behaviour of the electric arc furnace”// 5th International Workshop on Soft Computing Applications, Szeged, Hungary, 2012, pp. 261–271.
13. Wang Yan, Mao Zhi-zhong, Tian Hui-xin, Li Yan, Yuan Ping Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace // *J.Cent. South Univ. Technol.* (2010) 17:560-565, DOI:10.1007/s11771-010-0523-3
14. Bowman B. Computer modeling of arc furnace electrical operation // *Metalurgia International* 1, 1988, no. 4, pp. 286–291.
15. A.A. Nikolaev, P.G. Tulupov, D.A. Savinov “Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs” // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, pp. 1–6, 2017, DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076205.

References

1. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace. Proc. 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2016, pp. 033-037. DOI:10.1109/MECATRO-NICS.2016.7547111.
2. Nikolaev A.A., Rousseau J.-J., Szymanski V., Tulupov P.G. An experimental study of electric arc current harmonics in electric arc furnaces with different power characteristics. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol.14, no. 3. DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120 (In Russ.)
3. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Omelchenko E.Ya. Experimental analysis of electric arc current and electric arc voltage harmonic composition of powerful shaft electric arc furnace. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* (Electrotechnical Systems and Complexes), 2018, no. 4 (41), pp.63–72. (In Russ.)
4. B. Bowman, K. Krüger. Arc furnace physics. Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2009.
5. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity). CIGRE Report No. 102, 1939.
6. Ignatov I.I., Khainson A.V. Mathematical modeling of electric modes of electric arc furnaces. *Elektrichestvo* [Electricity], 1985, no. 8, pp. 69–72. (In Russ.)
7. Köhle S., Lichtbogenreaktanzen von Drehstrom-Lichtbogenöfen (Arc reactances of AC arc furnace). *Elektrowärme International* 51, B4, 1993, pp. 175–185.
8. Krüger K. Modellbildung und Regelung der elektrischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen (Modeling and control of the electrical energy conversion in arc furnaces). Dr.-Ing. Dissertation, Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 6, Nr. 382, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
9. Timm K. Reaktanzsymmetrierung von Hochstromleitungen für drehstrom Lichtbogenöfen (Reactance symmetrization of the high-current lines for AC arc furnaces). *Elektrowärme International* 49, B4, 1991, pp. 201–211.
10. Sventchansky A.D., Zherdev I.T., Kruchinin A.M. et al. *Elektricheskie promyshlennye pechi: dugovye pechi i ustanovki spetsialnogo nagreva: uchebnyk dlya vuzov* [Electric industrial furnaces: Arc furnaces and special heating installations: Textbook for universities]. Moscow: Energoizdat, 1981, 296 p. (In Russ.)
11. B. Boulet, G. Lalli, M. Ajersch. Modeling and control of an electric arc furnace. The American Control Conference, Denver, CO, USA, Jun. 4–6, 2000.
12. M. Panoiu, C. Panoiu, L. Ghiormez. Modeling of the electric arc behaviour of the electric arc furnace. The 5th International Workshop on Soft Computing Applications, Szeged, Hungary, 2012, pp. 261–271.
13. Wang Yan, Mao Zhi-zhong, Tian Hui-xin, Li Yan, Yuan Ping. Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace. *J.Cent. South Univ. Technol.* (2010) 17:560-565. DOI:10.1007/s11771-010-0523-3
14. Bowman B. Computer modeling of arc furnace electrical operation. *Metalurgia International* 1, 1988, no. 4, pp. 286–291.
15. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Savinov D.A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, pp. 1-6, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076205

Поступила 14.08.2020; принята к публикации 14.09.2020; опубликована 25.09.2020
Submitted 14/08/2020; revised 14/09/2020; published 25/09/2020

Николаев Александр Аркадьевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, Россия. Email: aa.nikolaev@magtu.ru

Тулупов Платон Гарриевич – аспирант, мл. науч. сотрудник, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, Россия. Email: tulupov.pg@mail.ru

Денисевич Александр Сергеевич – аспирант, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, Россия. Email: denisevich933@mail.ru

Alexander A. Nikolaev – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: aa.nikolaev@magtu.ru

Platon G. Tulupov – postgraduate student, junior researcher, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: tulupov.pg@mail.ru

Alexander S. Denisevich – postgraduate student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: denisevich933@mail.ru

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

УДК 621.982.47

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-69-78



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ НАТЯЖЕНИЙ ПОЛОСЫ И НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ИЗГИБО-РАСТЯЖНОЙ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНО-ТРАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА

Корнилов Г.П., Филатов А.М., Филатова О.А., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р.

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

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): электропривод изгибо-растяжной машины (ИРМ) непрерывно-травильного агрегата выполнен многодвигательным с применением планетарных редукторов. Подобное исполнение приводов приводит к двум типам взаимосвязей между ними: через механическую часть – сложную цепь цилиндрических и планетарных редукторов, а также через технологический процесс – обрабатываемую полосу, находящуюся в состоянии упруго-пластической деформации. **Цель работы:** обеспечение безаварийной работы ИРМ за счет корректного задания установок моментов и скоростей электроприводов при различных сортаментах полосы. **Используемые методы:** сбор и обработка экспериментальных данных по распределению натяжения в ИРМ и смежных натяжных станциях путем осциллографирования моментов и скоростей электроприводов; математическое моделирование скоростных и силовых параметров на валах привода ИРМ. **Новизна:** заключается в разработке математического описания, устанавливающего взаимосвязь между моментами электроприводов изгибо-растяжной машины и натяжением полосы, создаваемым роликами натяжных станций. **Результат:** установлено, что благодаря планетарной передачи между вторым и третьим роликами ИРМ энергия заднего натяжения, создаваемого приводом удлинения, передается по механической передаче вперед и через третий ролик превращается в переднее натяжение. В результате главный привод лишь добавляет переднее натяжение, но основная его часть создается приводом удлинения и задним натяжением, передаваемым вперед механическим образом. На основе анализа изменения заднего и переднего натяжения полосы в функции загрузки двигателей главного привода и привода удлинения получены формулы для расчета натяжения полосы на участке ИРМ. Установлено, что натяжение полосы перед ИРМ напрямую определяется нагрузкой привода удлинения. **Практическая значимость:** полученные зависимости для расчета нагрузочных режимов позволяют скорректировать задания на скорости и моменты электроприводов таким образом, чтобы не допустить перегрузок привода удлинения и чрезмерных нагрузок на планетарную передачу, тем самым повысить ее ресурс и стабильность работы.

Ключевые слова: непрерывно-травильный агрегат, изгибо-растяжная машина, натяжение полосы, электропривод, математическая модель, привод удлинения, натяжная станция.

© Корнилов Г.П., Филатов А.М., Филатова О.А., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., 2020

Для цитирования

Исследование взаимосвязи натяжений полосы и нагрузок электроприводов изгибо-растяжной машины непрерывно-травильного агрегата / Корнилов Г.П., Филатов А.М., Филатова О.А., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 69–78. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-69-78>



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

RESEARCH ON THE RELATIONS BETWEEN STRIP TENSION AND LOADS OF ELECTRIC DRIVES OF A TENSION LEVELLER ON A CONTINUOUS PICKLING LINE

Kornilov G.P., Filatov A.M., Filatova O.A., Khramshin T.R., Khramshin R.R.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem statement (Relevance): The electric drive of the tension leveller (TL) of the continuous pickling line is multi-motor using planetary gears. Such a drive design leads to two types of relations between them: through a mechanical part - a complex chain of cylindrical and planetary gears, and also through a technological process - treated strips in a state of elastic-plastic deformation. **Objectives:** To ensure a trouble-free operation of TL by setting correct electric drive torques and speeds for a various product range of strips. **Methods Applied:** Experimental data on the distribution of strip tension in TL and adjacent tension stations were collected and processed by oscillography of drive torques and speeds; mathematical modeling of speed and power parameters on drive shafts of TL. **Originality:** It lies in the development of a mathematical description that establishes the relations between torques of the electric drives of TL and the strip tension created by rollers of the tension stations. **Findings:** It was found that due to the planetary gear between the second and third rollers of TL, energy of rear tension created by the elongation drive was transmitted forward by a mechanical transmission and converted into forward tension through the third roller. As a result, the main drive only adds front tension, but its main part is created by the elongation drive and rear tension mechanically transmitted forward. Based on the analysis of changes in the rear and front strip tension as a function of load of the main drive motors and the elongation drive, formulas are obtained for calculating the strip tension in the TL section. It was found that the load of the elongation drive directly determines the strip tension in front of TL. **Practical relevance:** The obtained dependences to calculate the load conditions make it possible to correct set values of speeds and torques of the TL electric drives to prevent elongation drive overloads and excessive loads on the planetary gear, thereby increasing its service life and stability.

Keywords: continuous pickling line, tension leveller, strip tension, electric drive, mathematical model, elongation drive, tension station.

For citation

Kornilov G.P., Filatov A.M., Filatova O.A., Khramshin T.R., Khramshin R.R. Research on the Relations Between Strip Tension and Loads of Electric Drives of a Tension Leveller on a Continuous Pickling Line. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 69–78. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-69-78>

Введение

На непрерывно-травильном агрегате (НТА) осуществляются следующие технологические процессы: размотка полосы из рулонов, взрыхление окалины, собственно травление полосы, ее последующая промывка, сушка и намотка в рулоны. Изгибо-растяжная машина предназначена для правки профиля полосы и взрыхления окалины, возникающей на поверхности полосы после процесса горячей прокатки [2, 4, 5]. В настоящей работе исследуется ИРМ, разработанная и поставленная итальянской фирмой Techint для обработки полос широкого сортамента: толщиной полосы от 2 до 4 мм, шириной от 1250 до 1850 мм. Конструктивной особенностью исполнения механической части машины является применение трех планетарных редукторов в составе электроприводов натяжных станций (НС). Опыт эксплуатации показал, что в элементах

планетарных передач возникают чрезмерные усилия, приводящие к выходу их из строя [7, 12]. Стабильность работы изгибо-растяжной машины напрямую влияет на работу всего агрегата НТА [3, 6, 8, 1].

Целью настоящей статьи является обеспечение безаварийной работы ИРМ за счет корректного задания установок моментов и скоростей электроприводов при различных сортаментах полосы. Достижение поставленной цели требует решения следующих задач: вывод формул, связывающих моменты на валу электроприводов с натяжениями полосы до и после ИРМ (рис. 1), а также на входе в травильные ванны; анализ влияния моментов главного привода и привода удлинения на натяжения полосы; установление взаимосвязи между передним и задним натяжениями полосы; корректировка уставок задания приводов, недопускающая чрезмерных нагрузок на планетарные передачи.

Расчет моментов электроприводов в зависимости от натяжения полосы в ИРМ

В составе непрерывно-травильной линии следует выделить две группы электроприводов: электроприводы, регулирующие скорость полосы (в зарубежной литературе Speed Master – «ведущий по скорости») и электроприводы, регулирующие натяжение полосы. Электроприводы, регулирующие натяжение, составляют большую

часть. Поскольку прямое регулирование натяжения требует установки датчика натяжения, что не всегда возможно ввиду компактной конструкции агрегата, то на практике чаще применяется косвенный метод, при котором регулируют момент электропривода, величина которого пропорциональна натяжению.

Обозначение натяжений полосы, используемое фирмой Techint, показано на **рис. 2**.

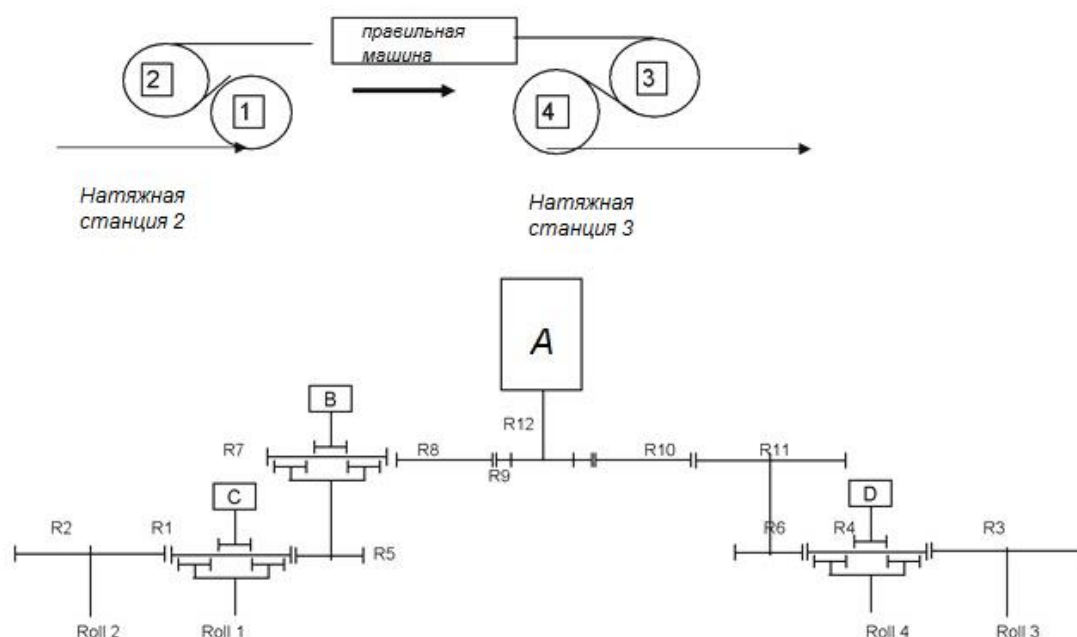


Рис. 1. Схема расположения зубчатых колес редукторов ИРМ: А – двигатель главного привода; В – двигатель привода удлинения; С – двигатель НС №2; D – двигатель НС №3; 1 – ролик, связанный через планетарный редуктор с двигателем С; 2 – ролик, который расположен на входе в ИРМ; 3 – ролик, расположенный на выходе из ИРМ; 4 – ролик, связанный через планетарный редуктор с двигателем D

Fig. 1. A layout diagram of gear wheels of gears on TL: A is a main drive motor; B is an elongation drive motor; C is a motor of tension station no. 2; D is a motor of tension station no. 3; 1 is a roller related to motor C via the planetary gear; 2 is a roller located on the section when the strip enters TL; 3 is a roller located on the section when the strip exits TL; 4 is a roller related to motor D via the planetary gear

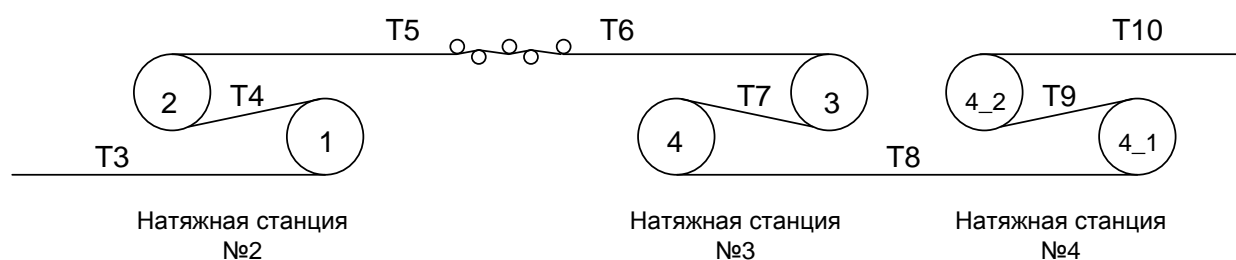


Рис. 2. Обозначение натяжений на участке натяжной станции (НС) №2–4: Т3 – натяжение в полосе на выходе из накопителя; Т4 – натяжение в полосе между роликками НС №2; Т5 – натяжение на входе в ИРМ; Т6 – натяжение на выходе из ИРМ; Т7 – натяжение между роликками НС №3; Т8 – натяжение между 3-й и 4-й натяжными станциями; Т9 – натяжение между роликками НС №4; Т10 – натяжение после НС №4 (на входе в ванны)

Fig. 2. Tension on the section of tension stations (TS) no. 2–4: T3 is strip tension when the strip exits the looper; T4 is strip tension between rollers of TS no. 2; T5 is tension when the strip enters TL; T6 is tension when the strip exits TL; T7 is tension between rollers of TS no. 3; T8 is tension between TS no. 3 and 4; T9 is tension between rollers of TS no. 4; T10 is tension after TS no. 4 (when the strip enters the baths)

Входной накопитель, НС №2 и привод удлинения своим суммарным действием задают заднее натяжение Т5 на входе в ИРМ. Главный электропривод, НС №3 и 4 вытягивают полосу из роликов ИРМ и обеспечивают требуемый уровень натяжения на входе в ванны. Согласно технологическому режиму, предложенному фирмой Techint, в ИРМ основной регулируемой координатой является не натяжение, а удлинение полосы. Это связано с тем фактом, что датчики скорости, которые необходимы для контроля удлинения, обладают более высокой надежностью, чем датчики натяжения. Информация о натяжении полосы в ИРМ очень важна, потому что при завышенных натяжениях происходит ускоренный износ и поломка механического оборудования. Ситуация осложняется также наличием нескольких планетарных передач и взаимосвязи через них электроприводов НС № 2 и 3.

Натяжение полосы на выходе из ИРМ (переднее натяжение) складывается из натяжений, создаваемых натяжными станциями № 3, 4 и натяжения полосы на входе в ванны Т10:

$$T6 = T_{\text{НС3}} + T_{\text{НС4}} + T10. \quad (1)$$

Натяжение полосы на входе в ИРМ (заднее натяжение) складывается из натяжения, создаваемого натяжной станцией №2, и натяжения входного накопителя

$$T5 = T_{\text{НС2}} + T3. \quad (2)$$

Согласно технической документации максимальное переднее натяжение составляет 600 кН, в то время как максимальное заднее натяжение только 300 кН. Очевидно, что разность между двумя натяжениями покрывается за счет пластической деформации полосы между роликами ИРМ.

Максимальное переднее натяжение в 2 раза больше заднего, в этой связи логичным является установка на выходе ИРМ двух натяжных станций НС №3 и 4, которые своими четырьмя роликами способны создать в два раза больше усилия, чем два ролика в составе натяжной станции №2, расположенной на входе в ИРМ.

Выясним, как распределены натяжения между двумя роликами в составе натяжной станции №4. Логичным было бы поделить суммарное усилие поровну, однако мощность двигателей, приводящих эти ролики, неодинакова, поэтому рационально распределить усилия между роликами пропорционально мощности двигателя.

На **рис. 3** показаны графики зависимости натяжений от толщины полосы, создаваемые каждым роликом натяжной станции №4 и их суммарное натяжение. Была рассчитана доля натяжения, вносимого каждым роликом: для 1-го ролика – 0,64–0,62, для 2-го ролика – 0,35–0,37. Полученные данные полностью согласуются с распределением мощности двигателей НС №4, которое представлено в **табл. 1**, ролик 1–0,60, ролик 2–0,38. Таким образом, можно утверждать, что нагрузки натяжной станции №4 выбраны верно.

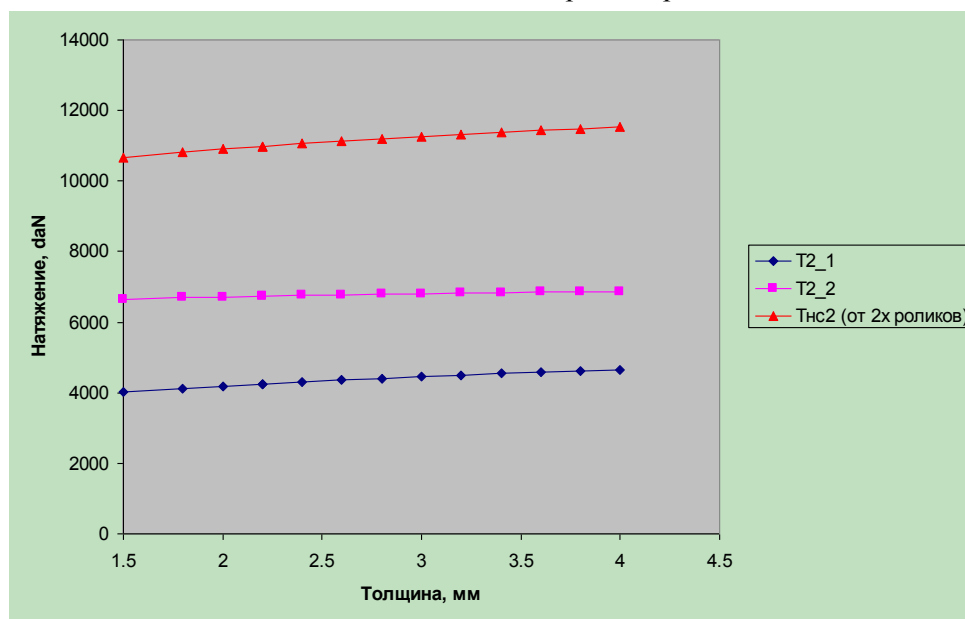


Рис. 3. Диаграмма натяжений полосы в НС №4 (ширина 1850 мм)

Fig. 3. Diagram of strip tension in TS no. 4 (width: 1850 mm)

Таблица 1. Данные по приводам НС №4
Table 1. Data on drives of TS no. 4

Параметр	Ролик 1	Ролик 2
Мощность двигателя, кВт	600	380
Передаточное число редуктора	20,3	20,3
Диаметр ролика, мм	1250	1250

Проанализируем работы натяжной станции № 2. Согласно документации фирмы Techint задача этой натяжной станции состоит в создании заднего натяжения перед роликами ИРМ. Натяжную станцию №2 образуют два ролика – 1-й и 2-й (см. **рис. 2**). Очевидно, что распределение натяжений между ними также должно согласовываться с распределением мощностей приводных двигателей. Ситуация несколько осложняется тем, что механическая связь между роликами и двигателями осуществляется посредством двух планетарных передач.

Приведем уравнения, связывающие натяжения, создаваемые роликами, с моментами двигателей С и В – M_c и M_b (см. **рис. 2**).

$$T2_1 = M_c \cdot 147,965 / (D / 2); \quad (3)$$

$$T2_2 = (M_b - M_c \cdot 147,965 / 203,468) \times 184,191 / (D / 2), \quad (4)$$

где 147,965 – передаточное отношение между двигателем С и роликом 1; 203,468 – передаточное отношение между двигателем В и роликом 1; 184,191 – передаточное отношение между двигателем В и роликом 2 [1, табл. 3].

В **табл. 2** приведен расчет максимальных натяжений, создаваемых роликами 1 и 2 натяжной станции №2.

Таблица 2. Данные по приводам НС № 2 (максимальные натяжения)
Table 2. Data on drives of TS no. 2 (maximum tension)

Мощность двигателя В, кВт	180
Мощность двигателя С, кВт	60
Момент двигателя В, Н·м	1 185,5
Момент двигателя С, Н·м	395,2
Коэффициент загрузки В и С, %	100
Натяжение (ролик 1), кН	93,5
Натяжение (ролик 2), кН	264,7
Натяжение НС №2 (суммарное), кН	358,2

Таким образом, соотношение между натяжениями первых двух роликов составляет $26,4:9,3=2,8$, что приблизительно равно соотношению мощностей двигателей $180:60=3$.

Суммарное натяжение НС №2 определится как

$$\begin{aligned} T_{НС2} &= T2_1 + T2_2 = \\ &= M_c \cdot 147,965 / (D / 2) + \\ &+ (M_b - M_c \cdot 147,965 / 203,468) \times \\ &\times 184,191 / (D / 2) = \\ &= (M_b \cdot 184,191 + M_c \cdot 14,01) / (D / 2). \end{aligned} \quad (5)$$

На основе формулы (5) был выполнен расчет, результаты которого приведены в **табл. 3**.

Таблица 3. Влияние момента двигателя С на суммарное натяжение НС №2
Table 3. Effect of torque of motor C on aggregate tension of TS no. 2

Коэффициент загрузки В, %	50	50	50
Коэффициент загрузки С, %	50	10	-50
Натяжение (ролик 1), кН	46,7	9,35	-46,7
Натяжение (ролик 2), кН	132,3	166,2	217,0
Натяжение НС №2 (суммарное), кН	179,1	175,6	170,2

Момент привода В был принят равным 50% от номинального значения и не менялся. Момент привода С изменялся в диапазоне от -50 до 50% от номинала. Как следует из **табл. 3**, суммарное натяжение при этом изменилось лишь на 5% с 179,1 кН до 170,2 кН. Объяснение этому заключается в следующем: изменение натяжения, создаваемое 1-м роликом компенсируется соответствующим изменением натяжения, создаваемым 2-м роликом, так, что их сумма приблизительно постоянна.

В технологической инструкции фирмы Techint предусмотрен специальный режим работы НС №2, связанный с прохождением сварного шва, групповым толчком и созданием предварительного натяжения перед запуском линии. В этом режиме привод удлинения переходит в регулирование момента, величина которого определяется исходя из следующих натяжений НС №2 на 1-м и 2-м роликах:

$$T2_1 = 2,0351 \cdot H^{-0,8462} \cdot H \cdot B, \quad (6)$$

$$T2_2 = 3,545 \cdot H^{-0,966} \cdot H \cdot B, \quad (7)$$

где H и B – толщина и ширина полосы соответственно.

На **рис. 4** показаны графики зависимости натяжений от толщины полосы для НС №2, причем согласно документации при прохождении сварного шва по натяжению должен быть дополнительно учтен понижающий коэффициент 0,2. Представленные графики построены без учета этого коэффициента.

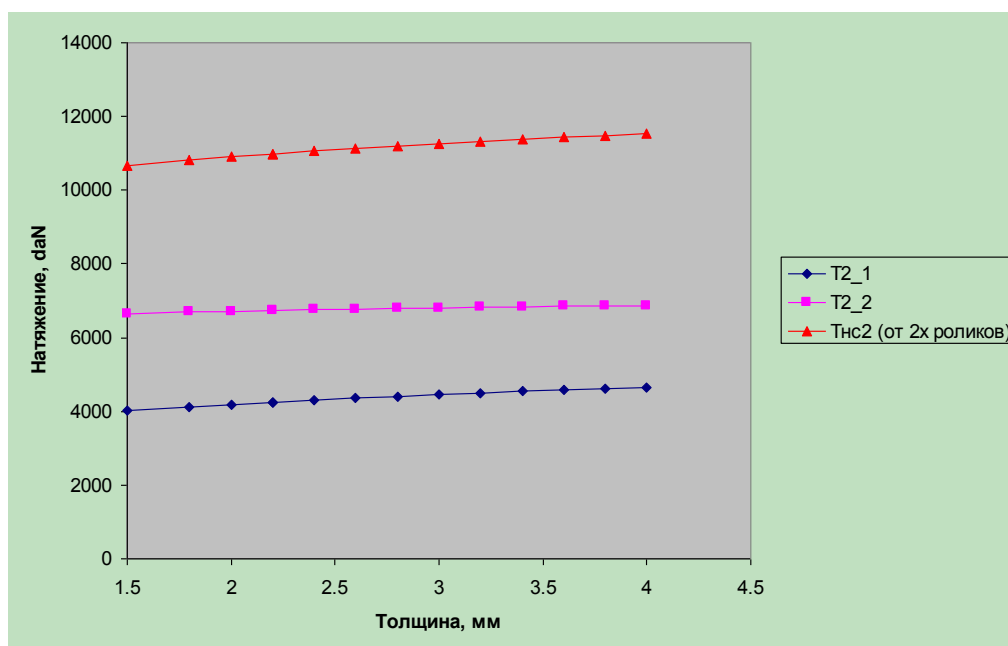


Рис. 4. Диаграмма натяжений полосы в НС №2 (ширина 1850 мм) (при пропуске сварного шва натяжения следует умножить на 0,2)

Fig. 4. Diagram of strip tension in TS no. 2 (width: 1850 mm) (during the passage of a welding joint, tension should be multiplied by 0.2)

Перейдем к анализу работы натяжной станции №3. Данные по приводам НС №3 представлены в **табл. 4**.

Таблица 4. Данные по приводам НС №3

Table 4. Data on drives of TS no. 3

Мощность двигателя А, кВт	1650
Мощность двигателя Д, кВт	70
Момент двигателя А, Н·м	10866,8
Момент двигателя Д, Н·м	461,0
Максимальное натяжение (ролик 4), кН	180,0

Особенностью работы данной натяжной станции является механическая связь через планетарную передачу между двигателями А и В, а также А и Д.

Момент на валу двигателя А зависит от моментов на валу роликов 3 и 4 (см. **рис. 1**) и момента двигателя В:

$$M_a = \frac{M_3}{18,683} + \frac{M_4}{19,617} - \frac{M_b \cdot 170,777}{18,683}, \quad (8)$$

где 18,683 – передаточное отношение между двигателем А и роликом 3 (см. **табл. 1**);

19,617 – передаточное отношение между двигателем А и роликом 4, 170,77 – передаточное отношение между двигателем В и роликом 3 [1, табл. 3]. Знак «-» перед моментом двигателя В обусловлен тем, что привод А работает в двигательном режиме (момент положителен), а при-

вод В – в генераторном режиме (момент отрицателен). Расчет натяжения полосы, создаваемого НС №3, в зависимости от нагрузок двигателей А и В приведен в **табл. 5**.

Таблица 5. Зависимость натяжения НС №3 от загрузки двигателей А и В (Полоса 2,2×1850 мм)

Table 5. Dependence of tension of TS no. 3 on load of motors A and B (strip dimensions: 2.2×1850 mm)

ka, %	kb, %	T3_4, кН	T3_3, кН	T _{НС3} (от 2-х роликов), кН
10	10	111,5	53,7	165,2
10	20	111,5	86,1	197,6
10	30	111,5	118,5	230,0
10	40	111,5	150,9	262,3
10	50	111,5	183,2	294,7
20	10	111,5	86,2	197,7
20	20	111,5	118,6	230,1
20	30	111,5	151,0	262,4
20	40	111,5	183,3	294,8
20	50	111,5	215,7	327,2
30	10	111,5	118,7	230,2
30	20	111,5	151,1	262,5
30	30	111,5	183,4	294,9
30	40	111,5	215,8	327,3
30	50	111,5	248,2	359,7

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

– Натяжение, создаваемое двигателем Д, равно 111,5 кН и не зависит от режима работы двигателей А и В.

– Изменение нагрузки привода удлинения (двигатель В) напрямую связано с изменением натяжения, создаваемого 3-м роликом, например, при изменении коэффициента загрузки привода В kb от 10 до 50% натяжение увеличилось с 53,7 до 183,2 кН (для случая, когда привод А был нагружен на 10% от номинальной мощности). Аналогичное изменение переднего натяжения, создаваемого 3-м роликом, наблюдается и при других нагрузках привода А, например, если привод А загружен на 30%, то при изменении нагрузки привода В от 10 до 50% переднее натяжение изменяется от 118,7 до 248,2 кН.

Выясним, как при изменении заднего натяжения ИРМ меняется переднее натяжение.

Формулы для расчета заднего и переднего натяжений, создаваемых роликами № 1, 2, 3 и 4 ИРМ сведены в **табл. 6**.

Таблица 6. Расчет заднего и переднего натяжений ИРМ
Table 6. Calculation of rear and forward tension of TL

$T_{HC2} = (Mb \cdot 184,191 + Mc \cdot 14,01) / (D / 2)$	(9)
$T_{HC3} = (Ma \cdot 18,683 + Mb \cdot 170,777) / ((D / 2) + T3 - 4 \cdot (1 - 18,683 / 19,617))$	(10)

Анализ формул из **табл. 6** показывает, что благодаря планетарной передаче между 2-м и 3-м роликами ИРМ $92\% = 170,777 / 184,191 \cdot 100\%$ энергии заднего натяжения, создаваемого приводом удлинения, передается по механической передаче вперед и через 3-й ролик превращается в переднее натяжение. Это объясняет, почему при изменении нагрузки привода удлинения нагрузка главного привода не меняется: главный привод лишь добавляет переднее натяжение, но основная его часть создается задним натяжением, передаваемым вперед механическим образом. Одновременно с изменением заднего натяжения меняется и переднее, причём поскольку датчика натяжения прямого действия на ИРМ не установлено, то указанные изменения переднего натяжения невозможно зафиксировать.

При перегрузках привода удлинения, обусловленных некорректным ведением технологического процесса, нагрузка на планетарную передачу также значительно возрастает, поскольку

через нее передается энергия заднего натяжения, которое многократно вырастает. Очевидно, что подобная ситуация приводит к ускоренному износу и выходу из строя планетарной передачи.

Анализ изменения заднего и переднего натяжения полосы в функции загрузки двигателей главного привода и привода удлинения

Выше была проанализирована работа каждой из трех натяжных станций № 2, 3 и 4 в отдельности. Дальнейший материал обобщает полученные выше результаты и дает общую картину распределения натяжений полосы в ИРМ.

Были выделены четыре участка, в которых рассчитывалось натяжение:

- натяжение Т3 полосы на выходе из накопителя;
- натяжение Т5 полосы на входе в ИРМ;
- натяжение Т6 полосы на выходе из ИРМ;
- натяжение Т10 полосы перед ваннами.

Натяжение полосы на выходе из накопителя и перед ваннами рассчитывалось по формулам фирмы Techint. Натяжение полосы перед ИРМ складывалось из натяжения в накопителе и натяжения от НС №2. Натяжение полосы после ИРМ складывалось из натяжения полосы перед ваннами, плюс натяжение полосы от НС №3 и 4.

Формулы для расчета натяжения полосы сведены в **табл. 7**.

Таблица 7. Формулы для расчета натяжения полосы на участке ИРМ
Table 7. Formulas used to calculate strip tension on the TL section

$T3 = 2,6449 \cdot H^{-0,6405} \cdot H \cdot B$	(11)
$T10 = 1,111 \cdot H^{-0,0606} \cdot H \cdot B$	(12)
$T5 = T3 + T_{HC2} = T3 + (Mb \cdot 184,191 + Mc \cdot 14,01) / (D / 2)$	(13)
$T6 = T10 + T_{HC3} + T_{HC4} = T10 + (Ma \cdot 18,683 + Mb \cdot 170,777) / (D / 2) + T3 - 4 \cdot (1 - 18,683 / 19,617) + T_{HC4}$	(14)

В **табл. 8** представлены результаты расчета натяжений для нескольких вариантов. Варьировалась нагрузка привода удлинения и главного привода, а также толщина полосы. Ширина принималась равной 1850 мм.

Таблица 8. Расчет натяжений полосы на участке ИРМ
Table 8. Calculation of strip tension on the TL section

Толщина, мм	2,2	2,2	2,2	2,2
Нагрузка главного привода, %	10	20	10	20
Нагрузка привода удлинения, %	20	30	40	50
Натяжение - входной накопитель, кН	64,9	64,9	64,9	64,9
Натяжение перед ИРМ, кН	134,8	169,7	204,6	239,6
Натяжение после ИРМ, кН	337,0	401,9	401,8	466,7
Натяжение перед ваннами, кН	43,1	43,1	43,1	43,1

Толщина, мм	4,0	4,0	4,0	4,0
Нагрузка главного привода, %	10	20	10	20
Нагрузка привода удлинения, %	20	30	40	50
Натяжение - входной накопитель, кН	80,5	80,5	80,5	80,5
Натяжение перед ИРМ, кН	150,3	185,3	220,2	255,1
Натяжение после ИРМ, кН	419,3	484,2	484,1	548,9
Натяжение перед ваннами, кН	75,6	75,6	75,6	75,6

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

- натяжение полосы перед ИРМ напрямую определяется нагрузкой привода удлинения, с увеличением нагрузки от 20 до 50% при толщине полосы 2,2 мм натяжение растет от 134,8 до 239,6 кН, при толщине полосы 4,0 мм – 150,3 до 255,1 кН, причем в обоих случаях изменение составляет 105 кН;

- при минимальных нагрузках главного привода и привода удлинения (10 и 20% соответственно) натяжение полосы перед ИРМ приблизительно в 2 раза больше, чем во входном накопителе, то есть натяжная станция №2 дополнительно создает такое же натяжение, как и во входном накопителе;

- при загрузке привода удлинения на 50% натяжение полосы перед ИРМ приблизительно в 4 раза больше, чем во входном накопителе;

- отношение между натяжениями полосы после и до ИРМ составляет порядка 2,0–2,5, то есть приблизительно половина переднего натяжения уравнивает заднее натяжение, а вторая по-

лови́на идет на пластическую деформацию изгиба полосы между роликами;

- сравнивая натяжение полосы после ИРМ с натяжением полосы на входе в ванны, следует отметить, что для тонких полос 2,2 мм их отношение достигает порядка 10, а для толстых полос 4,0 мм – порядка 7. Столь высокий порядок соотношения натяжений очевидно потребовал установки двух натяжных станций № 3 и 4. Для сравнения – во входной части ИРМ данный показатель не превышает 4, поэтому достаточно одной натяжной станции № 2.

Заключение

В результате анализа работы привода ИРМ получены зависимости переднего и заднего натяжений от моментов главного привода и привода удлинения. Установлено, что натяжение полосы перед ИРМ напрямую определяется нагрузкой привода удлинения, при его нагрузке на 50% натяжение полосы перед ИРМ приблизительно в 4 раза больше, чем во входном накопителе. Показано, что отношение между натяжениями полосы после и до ИРМ составляет порядка 2,0–2,5, причем половина переднего натяжения уравнивает заднее натяжение, а вторая половина идет на пластическую деформацию изгиба полосы между роликами. Благодаря планетарной передаче между 2-м и 3-м роликами ИРМ 92% энергии заднего натяжения, создаваемого приводом удлинения, передается по механической передаче вперед и через 3-й ролик превращается в переднее натяжение. Таким образом, главный привод лишь добавляет переднее натяжение, но основная его часть создается задним натяжением, передаваемым вперед механическим образом. Полученные зависимости для расчета нагрузочных режимов позволяют скорректировать задания на скорости и моменты электроприводов таким образом, чтобы не допустить перегрузок привода удлинения и чрезмерных нагрузок на планетарную передачу, тем самым повышается ресурс и стабильность ее работы.

Список литературы

1. Исследование привода изгибо-растяжной машины непрерывно-травильного агрегата холодной прокатки / Г.П. Корнилов, А.М. Филатов, О.А. Филатова, Т.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №1. С. 71–79.
2. Теоретическое исследование процесса прохождения горячекатаной полосы через изгибно-растяжной окатиноломатель непрерывно-травильного агрегата / Д.В. Суфьянов, Н.Н. Огарков, Е.А. Мурзаева, В.В. Курбан, С.В. Денисов // Производство проката. 2012. №10. С. 31–34.
3. Оптимизация параметров настройки машины правки для эффективного разрушения окалина / В.Л. Корнилов, Г.А. Куницын, В.А. Дьяконов, А.П. Буданов, П.П. Полецков // Сталь. 2009. №10. С. 77–78.

4. Девятченко Л.Д., Маяченко Е.П. Operation of an extension and bending machine in scale removal from hot-rolled strip. Steel in translation. 2013. Том 43. № 2. С.59–63.
5. Daniel Magura, Viliam Fedák, Padmanaban Sanjeevikumar, Karol Kyslan. Tension Controllers for a Strip Tension Levelling Line. Advances in Systems, Control and Automation. 2018, pp. 33–44.
6. Полецков П.П. Об изменении показателей профиля и плоскостности тонколистового проката в процессе правки растяжением с изгибом // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №3 (35). С. 60–62.
7. Исследование систем управления непрерывного стана на математической модели / И.А. Селиванов, В.М. Салганик, И.Г. Гун, О.И. Петухова, Ю.И. Мамлеева // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №3 (35). С. 11–14.
8. Совершенствование модели настройки изгибо-растяжного окалиноломателя для автоматизированного проектирования скоростного режима непрерывно-травильного агрегата, совмещенного с прокатным станом / М.И. Румянцев, И.Д. Зелинов, И.О. Новицкий, Ю.А. Зелинова // Технические науки – от теории к практике. 2015. № 53. С. 122–130.
9. Magura D., Kyslan K., Padmanaban S., Fedák V. Distribution of the Strip Tensions with Slip Control in Strip Processing Lines. Energies 2019, 12, 3010.
10. Mathieu N., Potier-Ferry M., Zahrouni H. Reduction of flatness defects in thin metal sheets by a pure tension leveler. International Journal of Mechanical Sciences. Volume 122, March 2017, 267–276.
11. Zhang J., Zhou C.L., Li H.B., Zhang X. C. and Li M. Influence of Tension Leveling Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Steel Strip. JOM 69 (2017), 937–941.
12. Nigam, Aditya, Jain, Sandeep. Modelling and Structural Analysis of Planetary Geared Winch. International Journal of Science and Research (IJSR). Volume 4, January 2015, 330–333.

References

1. Kornilov G.P., Filatov A.M., Filatova O.A., Khrumshin T.R., Khrumshin R.R. Studying drives of the tension leveler on the continuous pickling line of the cold rolling mill. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol.18, no. 1, pp. 71–79. (In Russ.)
2. Sufianov D.V., Ogarkov N.N., Murzaeva E.A., Kurban V.V., Denisov S.V. Theoretical research on hot rolled strips passing through a tension-bending scale breaker of a continuous pickling line. *Proizvodstvo prokata* [Rolled Products Manufacturing], 2012, no. 10, pp. 31–34. (In Russ.)
3. Kornilov V.L., Kunitsyn G.A., Dyakonov V.A., Budanov A.P., Poletskov P.P. Optimizing settings parameters of the straightening machine for efficient scale breaking. *Stal* [Steel], 2009, no. 10, pp. 77–78. (In Russ.)
4. Devyatchenko L.D., Mayachenko E.P. Operation of an extension and bending machine in scale removal from hot-rolled strip. Steel in Translation, 2013, volume 43, no. 2, pp. 59–63.
5. Daniel Magura, Viliam Fedák, Padmanaban Sanjeevikumar, Karol Kyslan. Tension controllers for a strip tension levelling line. Advances in Systems, Control and Automation, 2018, pp. 33–44.
6. Poletskov P.P. On the change in profile and flatness of rolled sheets during flattening by tension and bending. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 3 (35), pp. 60–62. (In Russ.)
7. Selivanov I.A., Salganik V.M., Gun I.G., Petukhova O.I., Mamleeva Yu.I. Research on control systems of a continuous rolling mill using a mathematical model. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 3 (35), pp. 11–14. (In Russ.)
8. Rumyantsev M.I., Zelinov I.D., Novitsky I.O., Zelinova Yu.A. Improving a model for setting the tension-bending scale breaker for a computer-aided design of speed of the continuous pickling line combined with the rolling mill. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike* [Engineering Sciences – from Theory to Practice], 2015, no. 53, pp. 122–130. (In Russ.)
9. Magura D., Kyslan K., Padmanaban S., Fedák V. Distribution of the strip tensions with slip control in strip processing lines. *Energies*, 2019, 12, 3010.
10. Mathieu N., Potier-Ferry M., Zahrouni H. Reduction of flatness defects in thin metal sheets by a pure tension leveler. International Journal of Mechanical Sciences, volume 122, March 2017, 267–276.
11. Zhang J., Zhou C.L., Li H.B., Zhang X.C., Li M. Influence of tension leveling parameters on the microstructure and mechanical properties of steel strip. JOM 69 (2017), 937–941.
12. Nigam Aditya, Jain Sandeep. Modelling and structural analysis of planetary geared winch. International Journal of Science and Research (IJSR), volume 4, January 2015, 330–333.

Поступила 14.05.2020; принята к публикации 07.09.2020; опубликована 25.09.2020

Submitted 14/05/2020; revised 07/09/2020; published 25/09/2020

Корнилов Геннадий Петрович – д-р техн. наук, проф., Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. E-mail: korn_mgn@mail.ru.

Филатова Ольга Анатольевна – канд. техн. наук, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: feleodor@mail.ru.

Филатов Анатолий Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: filam50@mail.ru.

Храмшин Тимур Рифхатович – канд. техн. наук, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: timur.hramshin@mail.ru.

Храмшин Рифхат Рамазанович – канд. техн. наук, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: hramshinrr@mail.ru.

Gennadiy P. Kornilov – DrSc (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: korn_mgn@mail.ru.

Olga A. Filatova – PhD (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: feleodor@mail.ru.

Anatoliy M. Filatov – PhD (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: filam50@mail.ru.

Timur R. Khrumshin – PhD (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: timur.hramshin@mail.ru.

Rifkhat R. Khrumshin – PhD (Eng.), Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: hramshinrr@mail.ru.

ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ

ECONOMICS, MANAGEMENT AND PRODUCT MARKET

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

УДК 656.078.11, 656.27

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-79-89



РАЗВИТИЕ МЕХАНИЗМОВ ИНТЕГРАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В ЕДИНОЕ ТРАНСПОРТНО-ИНФОРМАЦИОННОЕ ПРОСТРАНСТВО

Зубков В.В.¹, Сирина Н.Ф.²¹ АО «Федеральная грузовая компания», Московское представительство, Екатеринбург, Россия² Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): промышленные и производственные предприятия, транспортные компании функционируют при затянувшемся кризисе. В условиях стагнации производства и интеллектуализации систем управления необходимо развитие более эффективных подходов в управлении производственными и транспортными процессами, таких подходов, которые способны создать условия промышленному и транспортному комплексам для ускоренного выхода из сложившейся кризисной ситуации. Решение данной задачи возможно путем развития механизмов интеграции промышленных предприятий в единое транспортно-информационное пространство, для чего требуется консолидация бизнес-процессов, информационных ресурсов, технологий, создание межотраслевых информационно-интеллектуальных моделей управления, формирующих анализ проблемных участков (областей) единых транспортно-производственных процессов, а также обеспечивающих контроль их фактических состояний и результатов, прогнозирование возможных их состояний и результатов от реализации производственных и транспортных процессов. **Цель работы:** формирование механизмов интеграции промышленных и производственных предприятий в единое транспортно-информационное пространство. **Новизна работы:** впервые разработана концептуальная межотраслевая информационно-интеллектуальная модель управления информационными потоками в категориях внутренних промышленных и промышленных транспортно-производственных услуг, которая взаимоувязывает и преобразовывает информационные потоки распределенных (корпоративных) информационных систем в межотраслевом пространстве функционирования транспортно-производственных процессов. Сформирована концептуальная модель управления транспортно-производственными процессами, которая основана на накоплении и применении полученных знаний, в контексте с используемым ресурсным потенциалом. Разработана методика представления форм знаний о транспортно-производственных процессах. **Результат:** принципы построения концептуальных моделей и методики представления форм знаний о транспортно-производственных процессах использовались при создании интегрированных информационно-интеллектуальных систем управления «Производственного предприятия Комплексной Транспортной Услуги» и «Проблемные вопросы», которые прошли государственную регистрацию. **Практическая значимость:** разработанные межотраслевые интегрированные информационно-интеллектуальные системы управления «Производственного предприятия Комплексной Транспортной Услуги» и «Проблемные вопросы» применяются при реализации и управлении транспортно-производственными процессами на производственных, промышленных предприятиях и транспортных участках, подразделениях в границах Восточного полигона.

Ключевые слова: промышленные предприятия, транспортные участки, информационные потоки, транспортно-производственные процессы, концептуальная модель, интеллектуализация, информационные системы.

© Зубков В.В., Сирина Н.Ф., 2020

Для цитирования

Зубков В.В., Сирина Н.Ф. Развитие механизмов интеграции промышленных предприятий в единое транспортно-информационное пространство // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 79–89. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-79-89>



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

DEVELOPMENT OF THE MECHANISMS FOR INTEGRATING INDUSTRIAL ENTERPRISES INTO A COMMON TRANSPORT AND INFORMATION AREA

Zubkov V.V.¹, Sirina N.F.²

¹JSC Federal Freight Transport Company, Moscow Representative Office, Yekaterinburg, Russia

²Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): Industrial and manufacturing enterprises and transport companies operate in the conditions of a prolonged crisis. In the conditions of the stagnation of production and intellectualization of management systems, it is necessary to develop more efficient approaches to managing production and transport processes. Such approaches should create conditions for industrial and transport complexes to speed up their recovery from the current crisis situation. The solution to this problem is possible by developing mechanisms for integrating industrial enterprises into a common transport and information area, which requires the consolidation of business processes, information resources, technologies, the creation of inter-industry information and intellectual management models that form the analysis of problem areas of unified transport and production processes, as well as ensuring control of their actual status and results, as well as forecasting their possible status and results obtained from the implementation of production and transport processes. **Objective:** Formation of the mechanisms for integrating industrial and manufacturing enterprises into a common transport and information area. **Originality:** For the first time, the authors developed a conceptual inter-industry information and intellectual model for managing information flows in the categories of internal industrial and industrial transport and production services, which links and transforms the information flows of distributed (corporate) information systems in the inter-industry area of transport and production processes. A conceptual model for managing transport and production processes has been formed and based on the accumulation and application of knowledge obtained in the context of the resource potential used. The authors developed a method of presenting forms of knowledge about transport and production processes. **Findings:** The principles of building conceptual models and methods of presenting forms of knowledge about transport and production processes were used in the creation of integrated information and intelligent management systems "Production enterprises of Integrated Transport Services" and "Problem issues", which were officially registered. **Practical Relevance:** The developed inter-industry integrated information and intellectual management systems "Production enterprises of Complex Transport Services" and "Problematic issues" are used, when implementing and managing transport and production processes at production, industrial enterprises and transport sites, divisions within the boundaries of the Eastern Polygon.

Keywords: industrial enterprises, transport sites, information flows, transport and production processes, conceptual model, intellectualization, information systems.

For citation

Zubkov V.V., Sirina N.F. Development of the Mechanisms for Integrating Industrial Enterprises into a Common Transport and Information Area. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 79–89. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-79-89>

Введение

В настоящее время задачи по динамизированному выходу промышленных и производственных предприятий, транспортных компаний из сложившегося кризиса и дальнейшего эффективного роста их объемов производства, а также задачи по подготовке к новым этапам эволюции кризисных процессов требуют развития новых определяющих подходов в моделях управления транспортно-производственными процессами. Таких подходов, которые способны обеспечить промышленную и транспортную отрасли механизмами интеграции в условиях развития стратегий интеллектуализации систем управления и формирования единого транспортно-информа-

ционного пространства, с учетом различных осциллирующих течений, зарождающихся на всех этапах и уровнях экономики страны. Для реализации процесса развития и совершенствования моделей управления как производственными, так и транспортными бизнес-процессами в сложившихся условиях требуется:

- консолидация информационных ресурсов, технологий, инфраструктур промышленной и транспортной отраслей на уровне промышленных, производственных предприятий и транспортных участков, объектов, направлений;
- структурализм информационных потоков;
- создание комплекса интегрированных информационно-интеллектуальных систем управления транспортно-производственными процессами;

- разработка искусственных когнитивных систем, обеспечивающих детализацию информационных потоков, получение знаний о производственных и транспортных бизнес-процессах из единой информационной среды и дальнейшее их накопление, для определения оптимальных вариантов решений при управлении процессами.

Поэтапное формирование вышеперечисленных определяющих компонент создает условия для развития механизмов интеграции промышленных предприятий в единое транспортно-информационное пространство как в сегментах внутренних промышленных и промышленных транспортно-производственных услуг, так и в сегментах региональных и межрегиональных транспортно-производственных услуг.

Существует множество исследований методов, информационных технологий и архитектур промышленных и производственных больших потоков информации с точки зрения электронных данных. Однако с точки зрения конкретных моделей внедрения и реализации интеграции больших информационных потоков, в том числе объединения и слияния информационных архитектур в едином информационном пространстве относительно мало научных разработок.

Данная работа является продолжением научных исследований. Так, в [1] рассмотрены достижения промышленного интернета, ключевые технологии, включая эталонные архитектуры. В [2] предложены модели структур реализации для проектирования и планирования больших информационных данных в различных отраслях промышленности, а в [3] представлены варианты облачных вычислений для сетевых производственных предприятий.

Существующий кризис показал актуальность интеллектуализации производственных и транспортных бизнес-процессов, актуальность построения межотраслевых информационно-интеллектуальных моделей управления. Такие модели позволяют заинтересованным субъектам транспортно-производственных процессов определять собственное направление по управлению информационными потоками, использованию полученных знаний, и обеспечивают определение оптимальных вариантов решений при управлении процессами, в контексте ресурсного потенциала и профессионального (квалификационного) интереса [4].

Развитие межотраслевых информационно-интеллектуальных моделей и технологий увеличивает синергетический эффект процесса получения, накопления знаний и процесса компетентного, профессионального управления на

всем этапе функционирования производственных и транспортных бизнес-процессов.

Отметим, что для эффективных упреждений негативных воздействий глобального кризиса на экономику страны в целом необходимо развитие и совершенствование механизмов интеграции основополагающей промышленной отрасли в единое транспортно-информационное пространство, в связи с чем актуально значение анализа проблемных участков (областей) транспортно-производственных процессов, контроля их фактических состояний и результатов, а также прогнозирования возможных их состояний и возможных полученных результатов от реализации производственных и транспортных процессов [5].

Методы исследования, информационно-технологические разработки

Для формирования механизмов интеграции промышленных предприятий в единое транспортно-информационное пространство необходимо разработать методику представления форм знаний о транспортно-производственных процессах, которая должна обеспечивать отображение проблемных участков этих процессов и подпроцессов, при их реализации [6].

Представление форм знаний необходимо взаимоинтересованным субъектам транспортных услуг в категориях внутренних промышленных, промышленных транспортно-производственных услуг, региональных и межрегиональных, для согласованного взаимодействия при определении оптимальных вариантов решений проблемных задач, появляющихся при функционировании процессов [6–7]. Методика должна поддерживать когнитивную связь от отображения проблемного участка (области) функционирования процессов, подпроцессов до произведенных по форме (формального) отображения производственных и транспортных процессов, подпроцессов. При этом процессы, подпроцессы должны отображаться так, чтобы имела возможность формирования их прототипа для дальнейшего моделирования и управления.

Для разработки методики представления форм знаний о транспортно-производственных процессах построена концептуальная межотраслевая информационно-интеллектуальная модель управления информационными потоками в категориях внутренних промышленных и промышленных транспортно-производственных услуг. Данная модель представлена на **рис. 1**.



Рис. 1. Концептуальная межотраслевая информационно-интеллектуальная модель управления информационными потоками

Fig. 1. A conceptual inter-industry information and intelligent model for managing information flows

Развитие концептуальной межотраслевой информационно-интеллектуальной модели управления информационными потоками позволит основополагающим отраслям экономики (промышленной, транспортной) ускоренно выйти на новый качественный уровень управления процессами, при этом за определяющий вектор будет принято формирование многоагентной и многоструктурной комплексности интегрированных информационных систем управления с приумножением количества информационных потоков, качества их сбора, учета, обработки, анализа, хранения, распространения и образования профессионального (квалификационного) стратифицированного слоя, применяемых при определении оптимальных вариантов решений проблемных задач [7, 8].

После построения концепции взаимодействия информационных потоков в межотраслевом пространстве необходимо сформировать концепцию управления транспортно-производственными процессами в едином транспортно-информационном пространстве.

Концептуальная модель управления транспортно-производственными процессами, осно-

ванная на накоплении и применении полученных знаний в контексте с используемым ресурсным потенциалом, представлена на **рис. 2**.

Как видно на **рис. 2**, нижний слой модели представлен уровнем графического представления и уровнем формальных языков описания проблемных участков, областей функционирования транспортно-производственных процессов. Результат этих уровней выражается отображением накопленных знаний о проблемных участках, областях процессов.

Отображение знаний осуществляется универсальным описанием и соответствует конкретному представлению формы знаний, для этих целей в среднем слое концептуальной модели предусмотрен уровень универсального описания проблемных участков, областей транспортно-производственных процессов. Данный уровень в своем сегменте взаимодействует с уровнем инфраструктуры проблемных участков, областей и включает в себя агентную платформу, на основе которой происходит взаимодействие заинтересованных субъектов транспортных услуг при определении оптимальных вариантов решений проблемных задач [9].



Рис. 2. Концептуальная модель управления транспортно-производственными процессами
 Fig. 2. A conceptual model of managing transport and production processes

Представления форм знаний с агентной платформой формируют верхний слой концептуальной модели, который включает в себя уровень транспортно-производственных процессов, уровень управления производственными предприятиями и уровень интеграции предприятий.

В уровне транспортно-производственных процессов происходит их формализация при помощи разработанных форм знаний, с учетом определения ресурсного потенциала, необходимого для эффективной реализации процессов, подпроцессов, а также планируемых к привлече-

нию заинтересованных субъектов. Применение форм знаний, формализация, основывающаяся на накопленных знаниях, создают условия для развития уровня управления производственными предприятиями, который представлен системой определения оптимальных вариантов решений. Взаимодействие этих уровней в верхнем слое модели формирует уровень интеграции предприятий. Главным результатом данного уровня является интеграция производственных предприятий в комплекс интегрированных информационных систем управления процессами на ре-

гиональном уровне в едином транспортно-информационном пространстве. Представления форм знаний в данном сегменте верхнего слоя модели, формируют протокол интеграции интегрированных информационных систем и формируют единые правила и требования, необходимые для успешного взаимодействия заинтересованных субъектов [10].

Для отображения транспортно-производственных процессов применяется система обозначений графов активности UML 2.0 как наиболее применяемая и доступная система формализаций. Исполнители процессов и формализация процессов графически отображаются путем их соотношения с действиями субъектов модели. Определение и указание конкретной формализации обеспечивает контроль над правильным выполнением действия исполнителем процесса, что в том числе обеспечивает правильность и корректность установки взаимосвязи между проблемными участками, областями функционирования процессов и непосредственно самими транспортно-производственными процессами. Исполнителей процессов множество, при этом каждый несет свой функционал. При определе-

нии исполнителей процессов в формализации предусмотрено отображение их реализуемых технологических операций, использование которых обеспечивает выполнение функций транспортно-производственного процесса.

На рис. 3 представлен алгоритм реализации концептуальной модели управления транспортно-производственными процессами.

Как представлено на рис. 3, за реализацию транспортно-производственных процессов отвечает субъект системы «Управляющий процессами». Отображение транспортно-производственных процессов данный субъект получает от субъекта системы «Маршрутизатор процессов». Маршрутизатор транспортно-производственных процессов представляет собой внешнее хранилище с интерфейсом, которое обеспечивает взаимодействие с субъектами внешней среды. Субъект «Управляющий процессами», при коммуникации с субъектом системы «Пользовательский интерфейс», начинает реализацию процессов в соответствии с пользовательскими информационными данными, а также контролирует этапы реализации выполнения самих процессов и при этом выполняет внешнее администрирование системы.

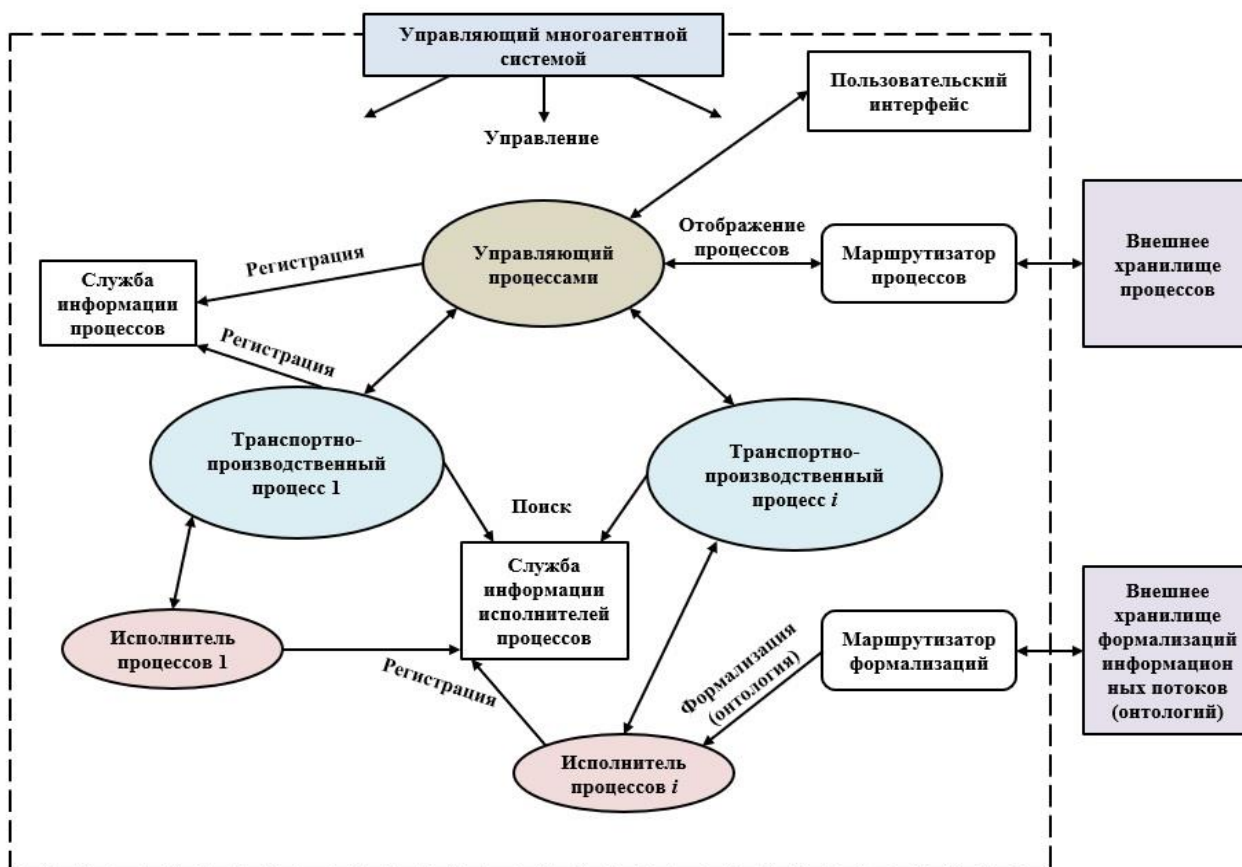


Рис. 3. Алгоритм реализации концептуальной модели управления транспортно-производственными процессами
Fig. 3. The implementation algorithm for the conceptual model of managing transport and production processes

Все транспортно-производственные процессы находятся в разных информационных потоках управления, поэтому для каждого выполняемого процесса субъектом «Управляющий процессами» формируется субъект «Транспортно-производственный процесс», управляющий действиями субъектов системы «Исполнитель процессов».

Генерация субъектов «Транспортно-производственный процесс» обеспечивается субъектом системы «Управляющий процессами» непосредственно в период выполнения конкретного транспортно-производственного процесса и при обеспечении условия регистрации субъектов «Транспортно-производственный процесс» в информационной службе «Служба информации процессов». Для выполнения данных действий субъекты системы «Транспортно-производственный процесс» формируют субъекты системы «Исполнитель процессов» или находят их из уже ранее сформированных за счет «Службы информации исполнителей процессов» и на основании электронных данных их отображающегося конкретного транспортно-производственного процесса.

Каждый субъект «Исполнитель процессов» выполняет свои действия в контексте соответствующей формализации из «Маршрутизатор формализаций», управление такой операцией возложено на конкретно соответствующего субъекта системы «Маршрутизатор формализаций».

Разработанный алгоритм реализации концептуальной модели управления транспортно-производственными процессами обеспечивает выполнение транспортно-производственных процессов на основе формализации информационных потоков, которые включают в себя накопленный опыт и знания о непосредственно процессах и объектах процессов.

Таким образом, концептуальная модель управления транспортно-производственными процессами определяет логические цепочки, взаимосвязи между проблемными участками, областями функционирования процессов и непосредственно самими транспортно-производственными процессами. Авторы в своем исследовании каждое представление формы знаний (R_i) рассматривают как кортеж:

$$R_i = \{R_i^w, R_i^c, R_i^p, R_i^s\}, \quad (1)$$

где R_i^w – множество функций i -го представления формы знаний; R_i^c – множество взаимосвязей между отображениями i -го представления форм

мы знаний; R_i^p – множество процессов функций i -го представления формы знаний; R_i^s – множество подпроцессов функций i -го представления формы знаний.

Множество функций i -го представления формы знаний имеет следующий вид:

$$R_i^w = \{w_{ij} | j = \overline{1, J^w}\}, \quad (2)$$

где J^w – количество функций i -го представления формы знаний, $R_i^w \neq \emptyset$.

Из множества всех функций фиксируем на основных подмножествах:

$$R_i^{wp} \subseteq R_i^{wR} \subseteq R_i^w, \quad (3)$$

где R_i^{wp} – множество функций субъектов, реализующих процессы (подпроцессы) производственных, промышленных предприятий в i -м представлении формы знаний; R_i^{wR} – множество значений применяемого ресурсного потенциала.

Субъекты, реализующие процессы (подпроцессы) и применяемый ресурсный потенциал, определяются конкретно по каждому проблемному участку или области реализации процессов.

Множество взаимосвязей между отображениями i -го представления формы знаний выражаем следующим образом:

$$R_i^c = \{c_{ij} | j = \overline{1, J^c}\}, \quad (4)$$

где J^c – количество взаимосвязей между функциями i -го представления формы знаний, $J^c = |R_i^c|$.

$$c_{ij} = (c_j^f C_j), \quad (5)$$

где c_j^f – множество свойств j -й взаимосвязи; C_j – кортеж j -х взаимосвязей i -го представления формы знаний.

Взаимосвязи между функциями представления форм знаний осуществляют отображение норм, правил, определяющих взаимодействие субъектов (объектов) при управлении транспортно-производственными процессами.

Множество процессов функций i -го представления формы знаний представляем таким образом:

$$R_i^p = \{p_{ij} | j = \overline{1, J^p}\}, \quad (6)$$

где p_{ij} – множество процессов j -й функции i -го представления формы знаний, $J^p = |R_i^p|$. При этом R_i^p может не иметь значений, тогда

$$p_{ij} = \{p_{ija} | A = \overline{1, A_j^p}\}, \quad (7)$$

где p_{ija} – A -й процесс j -й функции i -го представления формы знаний; A_j^p – количество процессов j -й функции i -го представления формы знаний, p_{ij} может быть \emptyset .

Множество подпроцессов функций i -го представления формы знаний представлено следующим образом:

$$R_i^s = \{s_{ij} | j = \overline{1, J^s}\}, \quad (8)$$

где s_{ij} – множество подпроцессов j -й функции i -го представления формы знаний, $J^s = |R_i^s|$, при этом, определяя значения R_i^s , их может не быть, тогда

$$s_{ij} = \{s_{ija} | a = \overline{1, A_j^s}\}, \quad (9)$$

где s_{ija} – a -й подпроцесс j -й функции i -го представления формы знаний; A_j^s – количество подпроцессов j -й функции i -го представления формы знаний, s_{ij} может быть \emptyset .

Отсюда следует, что перед тем как приступить к отображению (описанию) транспортно-производственных процессов (подпроцессов), требуется осуществить формализацию участков, областей функционирования этих процессов (подпроцессов), в том числе формализацию проблемных участков, областей функционирования. Для этого необходимо определить и отобразить (описать) функции представления формы знаний, а именно объекты (правила, стандарты, нормы), которые применяются в информационных потоках и взаимоувязывают транспортно-производственные процессы (подпроцессы) и субъектов их реализации. При определении, отображении (описании) субъектов реализации процессов (подпроцессов) необходимо в представлениях форм знаний отображать (описывать) их ресурсный потенциал, который реализует или не реализует функции конкретного процесса (подпроцесса).

Разработанная методика представления форм знаний о транспортно-производственных про-

цессах нашла свое применение при создании интегрированных информационно-интеллектуальных систем управления «Производственного предприятия Комплексной Транспортной Услуги» и «Проблемные вопросы» [11, 12].

Построение функционала системы «Производственного предприятия Комплексной Транспортной Услуги» происходит поэтапно: получение информационных данных и их обработка, компьютерный учет и анализ, онлайн-визуализация параметров работы производственного предприятия и транспортного участка, онлайн-визуализация интегральных параметров процессов, генерация оптимальных вариантов решений в виде управленческих рекомендаций (онлайн-оповещения заинтересованных пользователей) [11].

Данная система обеспечивает:

- прогнозирование и планирование работы производственных предприятий промышленной отрасли и транспортных участков и подразделений на установленный протоколом период времени;
 - планирование транспортных услуг по организации приема и отправления грузов железнодорожным и автомобильным транспортом;
 - получение информационных данных и контроль над информационными сведениями о потоках корреспонденций грузов, следующих как на предприятия, так и с предприятий;
 - анализ выполнения плановых показателей работы производственных предприятий и транспортных участков, подразделений за установленный протоколом период;
 - сбор электронных данных и формирование отчетности о допущенных отказах технических средств и невыполнении установленного технологического процесса на предприятиях и транспортных участках, с определением причин и ответственных должностных лиц;
 - автоматизацию (исключен человеческий труд) планирования и формирования заказа на транспортные услуги по подводу транспортных средств и подвижного состава для предприятий на установленный протоколом период времени;
 - формирование управленческих рекомендаций (в виде всплывающих информационных полей) по возможным решениям проблемных задач, образующихся при реализации транспортно-производственных процессов.
- Система «Проблемные вопросы» обеспечивает:
- интеллектуализацию управления транспортно-производственными процессами, которая основывается в определении оптимальных вариантов решений проблемных задач;

- оценку и сравнение вариантов решений, которое осуществляется на основе объективных и субъективных информационных данных;

- обработку, ранжирование, хранение информационных данных о приоритетных направлениях функционирования производственных предприятий и транспортных участков, подразделений;

- накопление и хранение знаний о проблем-

ных участках, областях процессов;

- предоставление вариантов решений проблемных вопросов с учетом привлекаемого ресурсного потенциала из возможных вариантов, заинтересованным субъектам (агентам), с дальнейшей оценкой их воздействий [12].

Фрагменты визуализации интегрированных информационно-интеллектуальных систем представлены на **рис. 3, 4**.

АСУ Подразделения Комплексной Транспортной Услуги (ПКТУ)

Назад

Ввод итогов работы предприятия

Сегодня 3 мая 2018

Выберите отчетные сутки: 02 май 2018

Ввод данных Редактирование

Ввод данных за отчетные сутки 02.05.2018

Количество наработанного щебня					Щебня погружено		
	Фракция					Погружено	Комментарии
	0-5мм (тонн)	5-20мм (тонн)	20-40мм (тонн)	40-70мм (тонн)			
Фабрика 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Автомобилей	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Фабрика 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Тонн	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Сохранить

Рис. 4. Фрагмент визуализации цифрового слоя системы «Производственного предприятия Комплексной Транспортной Услуги»

Fig. 4. A visualized segment of a digital layer of the system "Production enterprises of Integrated Transport Services"

АРМ Проблемные вопросы

Вы вошли как: Выход

Главная Ввод

Проблемные вопросы										
№ п/п	Дата регистрации	Проблемные вопросы	Пути решения	Ответственный	Причастная служба, дирекция, департамент	Куратор	Срок исполнения	Категория	Статус	Исполнение
Нет записей для отображения										

Добавить вопрос

Ответственный: ИВЦ

Проблема

Пути решения

Куратор: ИЗТер

Причастная служба, дирекция, департамент:

Срок исполнения: 19.07.2017

Отмена Добавить

Рис. 5. Фрагмент визуализации цифрового слоя системы «Проблемные вопросы»

Fig. 5. A visualized segment of a digital layer of the system "Problem issues"

Заключение

Предложенный метод развития механизмов интеграции промышленных предприятий в единое транспортно-информационное пространство позволяет:

1. Основным отраслям экономики (промышленной, транспортной) перейти на новый качественный уровень управления процессами, в котором определяющим направлением выступает формирование многоагентной и многоструктурной комплексности интегрированных информационных систем управления.

2. Определять логические цепочки, взаимосвязи между проблемными участками, областями функционирования процессов и непосредственно самими транспортно-производственными процессами.

3. Формализовать участки, области функционирования процессов (подпроцессов), в том числе формализовать их проблемные участки и области функционирования.

4. Информационно-интеллектуальным системам управления интегрировать в межотраслевые системы единого транспортно-информационного пространства.

5. Консолидировать информационные потоки многих информационных систем и адаптировать

распределенные системы управления на различных промышленных и производственных предприятиях, транспортных участках и подразделениях.

Разработанные интегрированные информационно-интеллектуальные системы управления «Производственного предприятия Комплексной Транспортной Услуги» и «Проблемные вопросы» прошли государственную регистрацию, и нашли свое применение при реализации и управлении транспортно-производственными процессами на производственных, промышленных предприятиях и транспортных участках, подразделениях в границах Восточного полигона.

Параметры проведенных расчетов использования данных информационно-интеллектуальных систем показывают положительную динамику увеличения качества планирования эксплуатационной работы промышленных предприятий и транспортных участков, обслуживающих эти предприятия, в частности, качество планирования увеличено на 22%, на ряде предприятий достигнуто увеличение объема отгружаемой готовой продукции в 2 раза, непроизводительные производственные издержки снижены на 13%. Наблюдается устойчивая тенденция снижения добавленной стоимости готовой продукции.

Список литературы

1. Wei Qin, Sigi Chen, Mugen Peng. Recent advances in Industrial Internet: insights and challenges. *Digital Communications and Networks*, vol. 6, iss. 1, February 2020, pp. 1–13, doi: 10.1016/j.dcan.2019.07.001.
2. Xianyu Zhang, Xinguo Ming, Dao Yin. Application of industrial big data for smart manufacturing in product service system based on system engineering using fuzzy DEMATEL. *Journal of Cleaner Production*, vol. 265, 20, August 2020, 121863, doi:10.1016/j.jclepro.2020.121863.
3. Istvan Mezgar, Ursula Rauschecker. The challenge of networked enterprises for cloud computing interoperability. *Computers in Industry*, vol. 65, iss. 4, May 2014, pp. 657–674, doi:10.1016/j.compind.2014.01.017.
4. Новая парадигма научных исследований в условиях реализации инновационной стратегии / Гринберг Р.С., Журавин С.Г., Немцев В.Н. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 147–151.
5. Когнитивное управление формализованным математическим контентом / Костенко К.И., Лебедева А.П. // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т.14. №3. С. 615–624.
6. Загорюлько Ю.А. О концепции интегрированной модели представления знаний // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322, №5. С.98–103.
7. Бездушный А.А. Математическая модель системы интеграции данных на основе онтологий // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2018. Т.6, №2. С. 15–40.
8. Использование паттернов онтологического проектирования для разработки онтологий предметных областей / Загорюлько Ю.А., Боровикова О.И., Загорюлько Г.Б. // Материалы Всероссийской конференции с международным участием, ЗОНТ 2017. 2017. Т. 1. С. 139–148.
9. Гагарин А.П., Березняк Т.В. Динамика инновационных процессов в области информационных технологий и подходы к их моделированию // Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15. №1. С. 116–121.
10. Концептуальная модель ситуационного центра промышленного предприятия / Гитман М.Б., Пустовойт К.С., Столбов В.Ю., Федосеев С.А., Гун Г.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 102–106.
11. А.с. 2018616359 Российская Федерация. АСУ Производственного предприятия Комплексной Транспортной Услуги / В.В. Зубков, О.В. Амельченко, Е.А. Негодяев [и др.]. № 2018614531; заявл. 23.04.2018; опубл. 30.05.2018.

12. А.с. 2017660359 Российская Федерация. АРМ Проблемные вопросы / В.В. Зубков, О.В. Амелченко. № 2017617667; заявл. 24.06.2017; опубл. 21.09.2017.

References

1. Wei Qin, Sigi Chen, Mugen Peng. Recent advances in Industrial Internet: insights and challenges. *Digital Communications and Networks*, vol. 6, issue 1, February 2020, pp 1–13. doi: 10.1016/j.dcan.2019.07.001.
2. Xianyu Zhang, Xinguo Ming, Dao Yin. Application of industrial big data for smart manufacturing in product service system based on system engineering using fuzzy DEMATEL. *Journal of Cleaner Production*, vol. 265, 20 August 2020, 121863. doi:10.1016/j.jclepro.2020.121863.
3. Istvan Mezgar, Ursula Rauschecker. The challenge of networked enterprises for cloud computing interoperability. *Computers in Industry*, vol. 65, Issue 4, May 2014, pp 657–674. doi:10.1016/j.compind.2014.01.017.
4. Grinberg R.S., Zhuravin S.G., Nemtsev V.N. The new scientific investigate paradigm under innovatory strategy implementation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1, pp. 147–151. (In Russ.)
5. Kostenko K.I., Lebedeva A.P. The formalized mathematical content cognitive management. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern Information Technologies and IT Education], 2018, vol. 14, no. 3, pp. 615–624. (In Russ.)
6. Zagorulko Yu.A. On the concept of integrated knowledge representation model. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2013, vol. 322, no. 5, pp.98–103. (In Russ.)
7. Bezduzhny A.A. Ontologies based mathematical model of data integration. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Informatsionnye tekhnologii* [Vestnik of Novosibirsk State University. Series: Information Technologies], 2018, vol. 6, no. 2, pp 15–40. (In Russ.)
8. Zagorulko Yu.A., Borovikova O.I., Zagorulko G.B. Application of ontological patterns design for subject domains development. *Materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem ZONT 2017* [Proceedings of the Open Russian Conference with an International Participation KONT 2017]. 2017, vol. 1, pp. 139–148. (In Russ.)
9. Gagarin A.P., Bereznyak T.V. Dynamics of innovative processes in the area of information technologies and approaches to their simulation. *Naukoemkie tekhnologii* [Science Intensive Technologies], 2014, vol. 15, no. 1, pp. 116–121. (In Russ.)
10. Gitman M.B., Pustovoyt K.S., Stolbov V.Yu., Fedoseev S.A., Gun G.S. The conceptual model of the situational center of the industrial enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1, pp. 102–106. (In Russ.)
11. Zubkov V.V., Amelchenko O.V., Negodyaev E.A. et al. *ASU Proizvodstvennogo predpriyatiya Kompleksnoy Transportnoy Uslugi* [The automated control system of the production enterprise of an Integrated Transport Service]. Author's certificate 2018616359, the Russian Federation, no. 2018614531; applied on 23.04.2018; published on 30.05.2018.
12. Zubkov V.V., Amelchenko O.V. *ARM Problemnye voprosy* [Problem Issues Workstation]. Author's certificate 2017660359, the Russian Federation, no. 2017617667; applied on 24.06.2017; published on 21.09.2017.

Поступила 03.07.2020; принята к публикации 07.08.2020; опубликована 25.09.2020
Submitted 03/07/2020; revised 07/08/2020; published 25/09/2020

Зубков Валерий Валерьевич – канд. техн. наук, заместитель начальника Департамента производственной инфраструктуры Московского представительства АО «Федеральная Грузовая Компания», Екатеринбург, Россия. Email: zubkovvv1973@gmail.com

Сирина Нина Фридриховна – д-р техн. наук, проф., проректор по учебной работе и связям с производством, Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия. Email: nsirina@usurt.ru

Valery V. Zubkov – PhD (Eng.), Deputy Head of the Production Infrastructure Department, the Moscow Representative Office, JSC Federal Freight Transport Company, Yekaterinburg, Russia. Email: zubkovvv1973@gmail.com

Nina F. Sirina – DrSc (Eng.), Professor, Vice-Rector for Academic Affairs and Production Relations, Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia. Email: nsirina@usurt.ru

ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ INFORMATION REPORT

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

УДК 669.021:621.762

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-90-97



ВЫБОР МАРКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ КОМПЬЮТЕРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

Мальцев И.М.

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

Аннотация. Представлен метод выбора марки машиностроительной стали с применением программного комплекса и базы данных СТАЛЬ. Показаны возможности применения компьютерных технологий для создания баз данных и алгоритмов отбора параметров при выборе марки стали. Применение компьютерных технологий для выбора и анализа свойств машиностроительных материалов является сегодня самым распространенным методом для оптимального поиска необходимого вида и марки машиностроительной стали. Существуют многочисленные зарубежные и отечественные разработки в этой области информатики, но зарубежные аналоги обычно не представляют пользователям данных о свойствах материалов стран СНГ, в частности России, а большинство разработок организаций и научных центров России написаны в виде марочников и электронных таблиц, что не позволяет использовать их в полной мере для алгоритмического выбора материалов. В НГТУ им. Р.Е. Алексеева работы по созданию и написанию баз данных и алгоритмов выбора марки стали, машиностроительных материалов проводятся с 1995 года. В настоящее время создан и применяется программный комплекс выбора марки машиностроительной стали СТАЛЬ. Программа СТАЛЬ используется машиностроительными предприятиями и техническими университетами для инженерных, научных, маркетинговых и учебных целей.

Ключевые слова: программный комплекс, выбор марки, машиностроительные стали.

© Мальцев И.М., 2020

Для цитирования

Мальцев И.М. Выбор марки машиностроительной стали компьютерными технологиями // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 90–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-90-97>



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

SELECTION OF A MACHINE STEEL GRADE BY APPLYING COMPUTER TECHNOLOGIES

Maltsev I.M.

Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper describes a method of selecting a machine steel grade using the STEEL software package and database. The author shows the possibilities of using computer technologies to create databases and parameter selection algorithms, when choosing the steel grade. Now, the use of computer technologies for selecting and analyzing properties of engineering materials is the most common method for an optimal search for the required type and grade of machine steel. There are numerous foreign and Russian development results in this area of computer science, but foreign similar projects usually do not provide users with data on properties of materials in the CIS countries, in particular Russia, and most of development results of organizations and research centers in Russia are written in the form of steel grade guides and spreadsheets, preventing from using them fully for an algorithmic selection of materials. Work on creating and writing databases and selection algorithms for steel grades and engineering materials has been carried out at Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University since 1995. Now, the STEEL software package for selecting a machine steel grade has been created and is applied. STEEL software is used by engineering companies and technical universities for engineering, scientific, marketing and educational purposes.

Keywords: software package, grade selection, machine steel.

For citation

Maltsev I.M. Selection of a Machine Steel Grade by Applying Computer Technologies. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 90–97. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-90-97>

Введение

Одной из главных задач материаловедения является выбор марки материала для детали. Существует множество научных работ, предлагающие различные подходы к решению этой задачи [1–4]. Единого метода, по которому возможно выбрать марку стали машиностроительного изделия, в настоящее время нет.

В информатике, которая существует в компьютерных технологиях, большое место занимают базы и банки данных (БД). В металлургии и машиностроении применяют марочники, электронные таблицы и БД по сталям. К ним принадлежат программы выбора марки стали МГТУ им. Э. Н. Баумана, МИСиС, МАДИ, НГТУ и др. [5–8]. В INTERNET можно найти информацию по сталям, но все это не позволяет выбирать марку для конкретного, в частности впервые проектируемого, изделия. Подходы к выбору марки стали различны по концепциям и алгоритмам, но все они считают, что при выборе стали необходимо учитывать многообразие показателей свойств (от конструкционных до технологических). Использование БД в выборе стали – это современный метод решения этой задачи. Программные комплексы позволяют исключить рутинные ошибки и их накопление. Достоинство БД в том, что они позволяют видоизменять свою структуру и давать результат с высоким каче-

ством. Качество выбора марки машиностроительной стали по БД зависит от полноты самой БД и формулировки запроса [8–10].

Решение задачи

Разработанная в НГТУ программа выбора марки машиностроительной стали СТАЛЬ используется для поиска марки стали по конструкционным и технологическим критериям. Программа СТАЛЬ содержит следующие характеристики по каждой отечественной марке стали: прочностные; упругие; усталостные (σ_b , σ_{-1} , $\sigma_{0.2}$, E , G , Ψ , δ , λ , τ_{-1} , КСЧ, $T_{\text{эксп}}$ и т. п); назначение и области применения, характеристику стали (текстовые данные – Метод-поля (поля примечаний), включающие несистематизированные данные по особенностям ТО и ХТО, сведения о склонности к обезуглероживанию, способах сварки, категории свариваемости, чувствительности к перегреву, типах изготавливаемых деталей, роли легирующих элементов, заменителей сталей, коррозионной стойкости и других свойствах); прокаливаемость стали (по диаграмме Блантера и данным ГОСТ); рекомендации по типовым (стандартным) вариантам термической и химико-термической обработок; показателей эксплуатации, резания, сварки и обработки давлением; данные химического состава, критических температур сталей и другие данные; данные ГОСТ

по сталям и стальной продукции. Записи БД соответствуют марке стали, прошедшей термическую обработку. Если режимов обработки несколько, то БД содержит соответствующее количество строк по этой марке стали.

В БД СТАЛЬ включены следующие группы сталей: конструкционные легированные; рессорно-пружинные; обыкновенного качества; подшипниковые; углеродистые качественные конструкционные; литейные; повышенной обрабатываемости (автоматные); углеродистые инструментальные; коррозионно-стойкие; инструментальные легированные, в том числе быстрорежущие; мартенсито-

стареющие; порошковые; строительные; с карбонитридным упрочнением; теплоустойчивые. Всего 820 марок. В ГОСТ РФ на стали содержится около 580 марок, остальные в ТУ.

Окно работы с формами СТАЛЬ показано на **рис. 1**. Пользователь с помощью функций ACCESS, вводя известную маркировку, находит информацию по каждому из разделов материаловедения – от термической обработки до конечных свойств (**рис. 1**). Обращение к форме «Технологические свойства» дает сведения, как показано на **рис. 2**.

Рис. 1. Окно работы с формами программы СТАЛЬ / Fig. 1. A window for completing forms of STEEL software

Рис. 2. Форма «Технологические свойства» стали / Fig. 2. Form “Processing properties of steel”

Последняя версия СТАЛЬ [9] 2019 года создает пользователю широкие возможности в выборе марки стали. Существует возможность конструирования запроса (перечня критериев отбора). На **рис. 3** показана форма конструктора программы СТАЛЬ, где с помощью возможностей ACCESS самостоятельно вводятся условия отбора, например учитывать временное сопротивление при растяжении (и другие свойства) и химический состав одновременно (см. **рис. 3**). Марки стали в программе имеют свое текстовое

описание (**рис. 4**). Программа СТАЛЬ в отличие от других разработок может изменять структуру данных. Для этого пользуются функцией ACCESS «таблица» (**рис. 5**). В виде таблицы выводится и результат запроса. Результатом выбора по программе СТАЛЬ является выборка сталей (или одна марка), отвечающих критериям введенного запроса. Приведены режимы термической обработки сталей (**рис. 6**) и свойства сталей после термической обработки (**рис. 7**).

Поле:	MARKASTEEL	PRIMENENIE	HARACT1	BP_SOPROT	LIM_TEKUCH	KR_DIAMET1
Имя таблицы:	UG_STEEL	UG_STEEL	UG_STEEL	UG_STEEL	UG_STEEL	UG_STEEL
Сортировка:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Вывод на экран:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Условие отбора:		> = "шестерни"		> = 950	> = 900	> 100
или:						

Рис. 3. Форма «Конструктора запросов» программы СТАЛЬ / Fig. 3. Form “Query builder” of STEEL software

Рис. 4. Форма «Текстовые поля примечаний» в программе СТАЛЬ
Fig. 4. Form “Text boxes for notes” in STEEL software

MARKASTEЕ ▾	T1_2 ▾	SR_ZAKALK1 ▾	T2_Z ▾	SR_OHLAGD ▾	T_OT ▾	SR_OHL_OT ▾	LIM ▾	BP ▾	O
15X	880	вода	795	вода_масло	600	воздух_масло	355	590	
20X	880	вода, масло	795	вода_масло	180	воздух_масло	635	780	
30X	860		0	масло	500	вода_масло	685	880	
30XPA	900	воздух	860	масло	200	воздух	785	800	
35X	860		0	масло	500	воздух	735	910	
38XA	860			масло	550	вода_масло	785	930	
40X	860			масло	500	вода_масло	785	980	
45X	840			масло	520	масло	835	890	
50X	830	закалка		масло	520	масло	885	1167	
15Г	880	вода		воздух			245	410	
20Г	880	вода, масло		воздух			275	410	
25Г	880			вода_воздух	560	воздух	295	490	
30Г	860			вода_воздух	600	воздух	315	540	
35Г	860			вода_воздух	600	воздух	335	560	
40Г.40ГР	860			вода_воздух	600	воздух	355	590	
45Г	850			масло_воздух	600	воздух	375	620	
47ГТ	845			воздух			375	620	
10Г2	920	вода		воздух	0		245	420	

Рис. 5. Фрагмент главной таблицы программы СТАЛЬ / Fig. 5. Fragment of a main table of STEEL software

Формы

Запрос

Литература

Принятые обозначения

Прокаливаемость сталей

Работа с формами базы дан...

Режимы термической обра...

Свойства после ТО

Сравнение твердости

Тексты по сталям

Технологические свойства с...

Форма зависимость 6-1 от ме...

Формулы по сталям

Химический состав стали

ХТО стали

Режимы термической обработки стали или состояние стали

Марка стали

15X

Температура первой закалки, С

880

Среда охлаждения первой закалки

вода

Температура второй закалки, С

795

Среда охлаждения второй закалки

вода_масло

Температура отпуска после закалки стали, С

600

Среда охлаждения при отпуске

воздух_масло

+

⚙

Рис. 6. Форма – режимы термической обработки сталей / Fig. 6. Form – steel heat treatment schedules

Физико-механические свойства стали после термической обработки

Марка машиностроительной стали по ГОСТ или ТУ	15X
Предел текучести стали, МПа	355
Временное сопротивление стали при растяжении, МПа	590
Относительное удлинение при растяжении, %	17
Относительное сужение при растяжении, %	45
Ударная вязкость стали при комнатной Т, С в КСЧ	59
Критический диаметр прокаливаемости min, мм	14
Критический диаметр прокаливаемости max, мм	26
Стоимость стали в условных единицах	120
Предел выносливости при нагружении растяжением, МПа	
Предел выносливости при нагружении кручением, МПа	
Модуль Юнга, Е	207000
Модуль G	0
Плотность стали, кг/м ³	7740
Твердость после отжига в HB	179
Твердость после термической обработки в HB	179

Рис. 7. Форма – свойства сталей после термической обработки / Fig. 7. Form – steel properties after heat treatment

Программа СТАЛЬ проходила апробацию на машиностроительных предприятиях [9–11]. Программа СТАЛЬ используется в учебном процессе технических университетов при преподавании дисциплин «Материаловедение», «Компьютерные технологии в машиностроении и материаловедении», «САПР термической обработки сталей», «Металловедение и технология металлов» [12–14].

В настоящее время в программе СТАЛЬ существуют специальные подпрограммы ACCESS анализа БД, чтобы определять надежность и долговечность стали при ее выборе для изделия. Например, ужесточение выбора марки стали предлагается вести расчетным методом, используя следующие формулы:

1) предельная удельная энергия деформации $W_c = 0,5 (\sigma_t + \sigma_k) E^{\text{пред}}$, σ_t – предел текучести; $\sigma_k = \sigma_b(1+\delta)$ – истинное сопротивление разрушению; $E^{\text{пред}} = \ln[1/(1-\Psi)]$ – истинное сужение площади поперечного сечения образца к моменту разрушения. Чем выше удельная работа деформации, тем труднее разрушение, то есть труднее зарождаются и распространяются трещины;

2) комплекс зарождения трещины K_{zt} , количественно определяющий способность материала сопротивляться возникновению трещин при де-

формации. Чем выше его значение, тем труднее в материале зарождаются трещины. $K_{zt} = W_c / \sigma_t$;

3) комплекс распространения трещины $K_{рт}$, количественно определяющий способность материала сопротивляться свободному движению трещин при деформациях в условиях достижения критического напряженного состояния. Чем выше его значение, тем труднее в материале распространяются трещины. $K_{рт} = 0,75 W_c \sigma_t$;

4) поведение стали при циклических нагрузках определяется отношением σ_b / σ_t :

$\sigma_b / \sigma_t < 1,2$ – сталь разупрочняется при циклических нагрузках;

$\sigma_b / \sigma_t > 1,4$ – сталь упрочняется при циклических нагрузках;

$1,2 < \sigma_b / \sigma_t < 1,4$ – сталь ведет себя двояко, и упрочняется и разупрочняется при циклических нагрузках [15].

Заключение

Применение компьютерных технологий в выборе марки стали машиностроительного изделия – высоко профессиональный метод поиска оптимального стального материала. Программные комплексы с БД по сталям могут в отличие от картотек и справочников изменять свою структуру, алгоритмы выбора материалов и зна-

чительно ускорять решение задачи выбора марки стали. Програма СТАЛЬ в своем применении дает значительный экономический эффект при оптимальном выборе материала, поводя не только поиск по механическим свойствам сталей, но и по их технологическим показателям. Программные модули СТАЛЬ позволяют решать

задачи не только поиска марки стали, но выполнять расчеты показателей свойств групп сталей, используя содержимое ячеек строк и столбцов таблиц или отчетов, рассчитывая, например, показатели долговечности и надежности. В настоящее время программа СТАЛЬ применяется в учебном процессе университетов.

Список литературы

1. Геллер Ю. А. и др. Металловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1990. 412 с.
2. О выборе критерия пластичности конструкционных материалов / Яковлев В.В., Карпов П.П., Астафьев Г.Н., Шанчуров С.М. // Сталь. 1999. № 9. С. 69–71.
3. Зоткин В. Е. Методы и критерии оценки эффективности использования материалов// Металловедение и термическая обработка металлов. 1985. № 7. С. 46–49.
4. Гуляев А.П. Выбор марки стали деталей машин// Металловедение и термическая обработка металлов. 1983. № 1. С. 54–59.
5. Третьяков В.И., Хасянов М.А., Горничев А.А. Методологические аспекты оптимального выбора конструкционных материалов в автоматизированных системах проектирования// Материаловедение. 1999. № 5. С. 13–28.
6. Струве Н.Э., Шувалова И.С. Автоматизированная система выбора материала и упрочняющей химико-термической обработки зубчатых колес // Металловедение и термическая обработка металлов. 1992. № 5. С. 41–43.
7. Крупин Ю.А., Кудря А.В., Мельниченко А.С. Компьютерные технологии в металлловедении //Металловедение и термическая обработка металлов. 1999. № 4. С. 35–39.
8. Мальцев И.М. База данных и алгоритмы выбора машиностроительной стали// Вестник машиностроения. 1999. №7. С.17–19.
9. Мальцев И.М. Программный комплекс выбора марки машиностроительной стали: свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009614298 от 14 августа 2009 года. Правообладатель НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Н.- Новгород.
10. Sedunov A.N., Mal'tsev I.M. Software for choosing grades of machine-building steel// Metal Science and Heat Treatment 2010 Jul; 52(s 1-2). <https://doi.org/10.1007/S11041-010-9232-7>
11. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении: учебное пособие: в 2-х т. /М.А. Филиппов, В.Р. Бараз, М.А. Герасьев, М.М. Розенбаум. Екатеринбург: УрФУ, 2011. Т. 1. 234 с.
12. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении: учебное пособие: в 2 т. Т. 2. Цветные металлы и сплавы / М.А. Филиппов, В.Р. Бараз, М.А. Герасьев, М.М. Розенбаум. 2-е изд., испр. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2013. Т. 2. 236 с.
13. Зоткин В.Е. Методология выбора материалов и упрочняющих технологий в машиностроении: учебное пособие. 4-е изд., перерб. и доп. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2008. 320 с. : ил. (Высшее образование).
14. Методология выбора металлических сплавов и упрочняющих технологий в машиностроении: учебное пособие: в 2 т. Т1. Стали и чугуны / М.А. Филиппов, В.Р. Бараз, М.А. Герасьев, М.М. Розенбаум. 2-е изд., испр. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2013. 232 с.
15. Мальцев И.М. Связь комплексов разрушения сталей с ударной вязкостью// Материаловедение. 2007. № 6. С. 10–13.

References

1. Geller Yu.A. et al. *Metallovedenie. Metody analiza, laboratornye raboty i zadachi* [Metal science. Methods of analysis, laboratory classes and problems]. 6th ed., revised and updated. Moscow: Metallurgy, 1990, 412 p. (In Russ.)
2. Yakovlev V.V., Karpov P.P., Astafiev G.N., Shanchurov S.M. On the choice of a criterion for plasticity of structural materials. *Stal* [Steel], 1999, no. 9, pp. 69–71. (In Russ.)
3. Zotkin V.E. Methods and criteria for evaluating efficiency of the use of materials. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], 1985, no. 7, pp. 46–49. (In Russ.)
4. Gulyaev A.P. Selecting a steel grade for machine parts. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], 1983, no. 1, pp. 54–59. (In Russ.)
5. Tretyakov V.I., Khasyanov M.A., Gornichev A.A. Methodological aspects of the optimal choice of structural materials in computer-aided design systems. *Materialovedenie* [Materials Science], 1999, no. 5, pp. 13 - 28. (In Russ.)
6. Struve N.E., Shuvalova I.S. An automated system of selecting materials and hardening chemical and heat treatment

- of gears. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], 1992, no. 5, pp. 41–43. (In Russ.)
7. Krupin Yu.A., Kudrya A.V., Melnichenko A.S. Computer technologies in metal science. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], 1999, no. 4, pp. 35 - 39. (In Russ.)
 8. Maltsev I.M. A database and algorithms for selecting engineering steels. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 1999, no. 7, pp. 17–19. (In Russ.)
 9. Maltsev I.M. *Programmyi kompleks vybora marki mashinostroitel'noy stali* [The software package for choosing a machine steel grade]. Software registration certificate, no.2009614298, 2009.
 10. Sedunov A.N., Maltsev I.M. Software for choosing grades of machine-building steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 2010, 52, pp. 1-2. <https://doi.org/10.1007/S11041-010-9232-7>
 11. Filippov M.A., Baraz V.R., Gervasiev M.A., Rozenbaum M.M. *Metodologiya vybora metallicheskih splavov i uprochnyayushchikh tekhnologiy v mashinostroenii: uchebnoe posobie* [Methodology of choosing metal alloys and hardening technologies in mechanical engineering: teaching aid]. In 2 volumes. Yekaterinburg: UrFU, 2011, vol. 1, 234 p. (In Russ.)
 12. Filippov M.A., Baraz V.R., Gervasiev M.A., Rozenbaum M.M. *Metodologiya vybora metallicheskih splavov i uprochnyayushchikh tekhnologiy v mashinostroenii: uchebnoe posobie* [Methodology of choosing metal alloys and hardening technologies in mechanical engineering: teaching aid]. In 2 volumes. Vol. 2. Non-ferrous metals and alloys. 2nd ed., rev. Yekaterinburg: UrFU, 2013, vol. 2, 236 p. (In Russ.)
 13. Zotkin V.E. *Metodologiya vybora materialov i uprochnyayushchikh tekhnologiy v mashinostroenii: uchebnoe posobie* [Methodology of choosing materials and hardening technologies in mechanical engineering: teaching aid]. 4th ed., revised and updated. Moscow: FORUM: INFRA-M, 2008, 320 p. (In Russ.)
 14. Filippov M.A., Baraz V.R., Gervasiev M.A., Rozenbaum M.M. *Metodologiya vybora metallicheskih splavov i uprochnyayushchikh tekhnologiy v mashinostroenii: uchebnoe posobie* [Methodology of choosing metal alloys and hardening technologies in mechanical engineering: teaching aid]. In 2 volumes. Vol. 1. Steel and cast iron. 2nd ed., rev. Yekaterinburg: UrFU, 2013, 232 p. (In Russ.)
 15. Maltsev I.M. The relationship between steel fracture complexes and impact strength. *Materialovedenie* [Materials Science], 2007, no. 6, pp. 10–13. (In Russ.)

Поступила 08.07.2020; принята к публикации 09.09.2020; опубликована 25.09.2020
Submitted 08/07/2020; revised 09/09/2020; published 25/09/2020

Мальцев Илья Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедение, технологии материалов и термическая обработка металлов», Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия. Email: Maltcev@nntu.ru

Ilya M. Maltsev – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science, Materials Technology and Heat Treatment of Metals, Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. Email: Maltcev@nntu.ru

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления научной деятельности ученых МГТУ, в частности:

- РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.
- МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ.
- ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.
- ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
- ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.
- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ.
- СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ.
- МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
- НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ.
- ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ.
- УПРАВЛЕНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ.
- ЭКОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ.
- ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И РЫНОК ПРОДУКЦИИ.
- СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ, ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ.
- ИНФОРМАЦИЯ И ДР.

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРИНИМАЕМЫМ К ПУБЛИКАЦИИ

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ (на русском и английском языках)

1.1. Наименование статьи (не более 15 слов). Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.

1.2. Аффiliation. Указывается фамилия, имя, отчество авторов (транслитерация), ученая степень, звание, должность, индивидуальный авторский идентификатор ORCID, полное название организации (ее официально принятый английский вариант), адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.

1.3. Аннотация (200–250 слов). Включает постановку задачи (актуальность работы), цель, используемые методы (эксперименты), новизну, результаты, практическую значимость (направления развития).

Онлайн-перевод запрещается!

1.4. Ключевые слова: от 5 до 15 основных терминов.

2. СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

2.1. Введение (постановка проблемы)

2.2. Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

2.3. Результаты исследования и их обсуждение

2.4. Заключение (выводы)

2.5. Список литературы (на русском и английском языках)

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

3.1. Рекомендуемый объем статьи – 6–8 стр.

3.2. Текст статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова и список литературы представляются на электронном носителе в виде файла, созданного средствами **Microsoft Word**, и распечаткой на стандартных листах бумаги формата А4.

При наборе статьи в **Microsoft Word** рекомендуются следующие установки:

- **шрифт** – **Times New Roman**, размер – 11 пт, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;

- при вставке **формул** использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation** со стандартными установками, применяется только сквозная нумерация;

- **иллюстрации** не должны превышать ширины колонки (80 мм) или ширины страницы (170 мм). Для подписей элементов на иллюстрации используется шрифт TimesNewRoman 11 пт. Рисунки представляются в редакцию в двух форматах: редактируемом и нередактируемом (*.jpg; качество не менее 300 dpi). В тексте статьи должны быть подрисуночные подписи в местах размещения рисунков. В конце подписи к рисунку точка не ставится. Например:

Рис. 4. Расчётная зависимость $\gamma(t)=I_{\text{н}}/I_{\text{н0}}$ от времени и удалённости КЗ от выводов асинхронного двигателя

- **таблицы** нумеруются, если их число более одной. Заголовков необходимо, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

3.3. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц **СИ**.

4. ДОКУМЕНТЫ, ПРИЛАГАЕМЫЕ К СТАТЬЕ

4.1. Экспертное заключение о возможности опубликования.

4.2. Договор.

Внимание! Публикация статей является бесплатной. Преимущество опубликования предоставляется авторам и учреждениям, оформившим подписку на журнал.

Статьи проходят обязательное научное рецензирование.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Редколлегия журнала «Вестник МГТУ им. Г.И. Носова», М.В. Чукину.

Телефоны: (3519) 29-85-26, 22-14-93.

Email: rio_mgtu@mail.ru; vestnik@magtu.ru (с указанием темы сообщения «Вестник МГТУ»).